



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



Université Amar Thelidji- Laghouat
FACULTE de TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT d'Electrotechnique
MÉMOIRE

Pour obtenir le Diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologies.

Filière : Electrotechnique

Option : Energies renouvelables en électrotechnique

Réalisé par :

HADJADJ Abdelkader, REZGALLAH Aida

-Thème-

***Étude et réalisation d'un système intelligent pour
l'optimisation du nettoyage des panneaux solaires.***

Soutenue publiquement le : 19/06/2025

Devant le Jury :

Président	CHETTIH Saliha	PR	Univ Lagh
Examinant	BIRANE Mouhoub	PR	Univ Lagh
Encadrant	BOUCHIBA Oumelkhier	MCA	Univ Lagh
Co-encadreur	HADJADJ Ahmed	Dr	Univ Lagh

Année universitaire 2024-2025



REMERCIEMENTS

Le premier à rendre grâces et à louer la nuit et à la fin de la journée est Dieu Tout-puissant, qui nous a remplis de ses innombrables bénédictions et nous a donné sa provision sans fin, éclairé nos chemins, facilité, et nous a permis de faire ce travail humble. Loué soit-il jusqu'à ce que la louange atteigne sa limite.

Nous adressons nos sincères remerciements et notre gratitude à tous nos enseignants qui ont été la raison pour laquelle nous sommes arrivés jusqu'à ce jour avec leurs efforts et leur générosité d'information. En particulier, nous exprimons nos sincères remerciements à nos superviseurs Prof.M.C.A.Bouchiba Omelkhir et Dr.Ahmed Hadjadj, qui ont eu tout le crédit pour la réalisation de ce travail, avec leur présence et surtout leur contribution pour faciliter le travail. Les membres du jury qui nous honoreront dans la discussion de ce mémoire trouveront à l'avance nos sincères remerciements.

Être un scientifique... Si vous ne pouvez pas, apprenez... Si vous ne pouvez pas, aimez les scientifiques.

HADJADJ Abdelkader
REZGALLAH Aida



DEDICACE

*Je dédie cet humble travail aux meilleurs parents
À nos chères mères pour qu'elles trouvent en moi leur source*

Fierté

*Qui nous donne toujours avec amour ce dont nous avons besoin
Nous pouvons devenir ce que nous sommes aujourd'hui.
À mes frères et sœurs, pour qui je souhaite un avenir*

RÉUSSI & BRILLANT

*À nos familles, **HADJADJ** et **REZGALLAH**
À mes amis et collègues,
À tous ceux qui me sont chers, aux gens qui ont toujours été
Aidez-nous et encouragez-nous, nous qui avons toujours été à nos côtés
Qui nous a accompagnés pendant nos études.*

HADJADJ Abdelkader
REZGALLAH Aida

ملخص

تركز هذه الأطروحة على تصميم وتنفيذ روبوت ذكي مستقل مخصص لتنظيف الألواح الكهروضوئية. يهدف هذا المشروع إلى توفير حل فعال واقتصادي وصديق للبيئة لانخفاض الكفاءة الناجم عن تراكم الغبار والشوائب.

يستخدم الروبوت محركات متدرجة للحركة، وفرشاة دوارة للتنظيف، ونظام تحكم يعتمد على اردوينو. يتم توفير الطاقة عن طريق بطارية قابلة لإعادة الشحن مدعومة بلوحة شمسية صغيرة. تم إجراء اختبارات حقيقية لتقييم أداء الروبوت على الألواح المتسخة وأكدت النتائج التجريبية فعالية النظام المقترح، مما مهد الطريق لمزيد من التطورات في مجال التنظيف الآلي لمنشآت الطاقة الشمسية.

RESUME

Cette thèse porte sur la conception et la mise en œuvre d'un robot intelligent autonome dédié au nettoyage des panneaux photovoltaïques. Ce projet vise à fournir une solution efficace, économique et écologique à la diminution de l'efficacité causée par l'accumulation de poussières et d'impuretés.

Le robot utilise des moteurs pas à pas pour le mouvement, une brosse rotative pour le nettoyage et un système de contrôle basé sur Arduino. L'énergie est fournie par une batterie rechargeable alimentée par un petit panneau solaire. Des tests réels ont été réalisés pour évaluer les performances du robot sur des panneaux souillés.

Les résultats expérimentaux confirment l'efficacité du système proposé, ouvrant la voie à de nouveaux développements dans le domaine du nettoyage automatisé des installations solaires.

ABSTRACT

This thesis focuses on the design and implementation of an autonomous intelligent robot dedicated to the cleaning of photovoltaic panels. This project aims to provide an effective, economical and environmentally friendly solution to the decrease in efficiency caused by the accumulation of dust and impurities.

The robot uses stepping motors for movement, a rotating brush for cleaning, and an Arduino-based control system. Power is provided by a rechargeable battery powered by a small solar panel. Real tests were carried out to assess the robot's performance on soiled panels.

Experimental results confirmed the effectiveness of the proposed system, paving the way for further developments in the field of automated cleaning of solar installations.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	1
DEDICACE	
RESUME	
ABSTRACT.....	
SOMMAIRE.....	
LISTE DES FIGURES.....	
LISTE DES TABLEAUX	
LISTE DES ABREVIATIONS.....	
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Chapitre I Les systèmes photovoltaïques (Principes de fonctionnement, composants et défis environnementaux...)	3
I.1 Introduction.....	4
I.2 Énergie solaire photovoltaïque	4
I.3 Le soleil.....	5
I.4 Fonctionnement de la conversion photovoltaïque	7
I.5 Générateur photovoltaïque (champ PV).....	8
I.6 Différents types d'ombrages	9
I.7 L'influence des différents types de salissures sur les modules PV	10
I.8 Effet de la corrosion	11
I.9 Conclusion	14
CHAPITRE II Maintenance et nettoyage des panneaux photovoltaïques	25
II.1 Introduction.....	26
II.2 Les techniques de nettoyage	26
II.3 Fréquence les panneaux solaires photovoltaïques doivent-ils être nettoyés.....	17
II.4 Les éléments à prendre en compte lors du nettoyage des panneaux solaires photovoltaïques	18
II.5 Le bon mécanisme pour nettoyer les panneaux solaires photovoltaïque	18
II.6 Utilisation de brosses et extension d'un réseau d'eau sur le site du projet	18
II.7 Utilisation de brosses avec l'utilisation d'une prise d'eau.....	20
II.8 Utiliser des brosses et adopter le processus de nettoyage à sec (sans utiliser d'eau)	20
II.9 Petit robot mobile	21
II.10 Robots installés sur panneaux solaires photovoltaïques.....	21
II.11 Camions avec largeur de flèche de panneaux solaires photovoltaïque.....	22
II.12 Le nettoyage des panneaux photovoltaïques par drone.....	24
II.13 Conclusion.....	25
Chapitre III Conception et réalisation du robot	26
III.1 Introduction.....	27
III.2 Spécifications techniques et fonctionnelles du robot (Cahier des charges).....	27
III.3 Dimensionnement d'un système	27
III.4 Logicielle AutoCAD.....	35
III.5 Réalisation et conception mécanique	36
III.6 Réalisation et conception électrique.....	41
III.7 Forme finale du robot et résultats des essais sur le terrain	43
III.8 Conclusion	46
CONCLUSION GÉNÉRALE	47
Références Bibliographies	49

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Champ photovoltaïque	4
Figure I.2 Coupe schématique du soleil.....	6
Figure I.3 Coupe transversale basique d'une cellule photovoltaïque à base de silicium	7
Figure I.4 Constituants d'un générateur PV.....	8
Figure I.5 Panneau solaire en état poussiéreux	10
Figure 1.6 Sable sur les bords du cadre.....	12
Figure 1.7 Fientes d'oiseaux.....	12
Figure II.1 Brosse pour nettoyer les panneaux solaires photovoltaïques	19
Figure II.2 Brosse pour nettoyer les panneaux Solaires photovoltaïques Solaire.....	19
Figure II.3 Réservoir d'eau avec ses accessoires est installé sur le pick-up	20
Figure II.4 Petit robot mobile pour nettoyer les panneaux solaires photovoltaïque.....	21
Figure II.5 Robots installés sur panneaux solaires	22
Figure II.6 Camion avec bras pour nettoyer les panneaux solaires photovoltaïque.....	23
Figure II.7 Camion avec une flèche pour nettoyer les panneaux solaires photovoltaïque	23
Figure II.8 Drone pour nettoyer les panneaux solaires photovoltaïque	24
Figure III.1 Moteur 28BYJ-48.....	28
Figure III.2 Moteur RS-3805-4.8V	29
Figure III.3 Cartes Arduino	30
Figure III.4 Panneau Solaire 3.5 W, 6V, 0.85 A.....	31
Figure III.5 Régulateur de charge HW-167.....	32
Figure III.6 Batterie lithium-ion	33
Figure III.7 Dessin en trois dimensions du châssis et des pièces utilisées, réalisé avec AutoCAD	34
Figure III.8 Couper et assembler le châssis du robot	35
Figure III.9 Les roues en plastique.....	36
Figure III.10 Les roues sur le châssis.....	37
Figure III.11 Brosses de nettoyage	38
Figure III.12 Brosses de nettoyage	38
Figure III.13 Structures en plastique	39
Figure III.14 Capteur de fin de course	41
Figure III.15 Schéma électrique fonctionnel	42
Figure III.16 Forme finale du robot (montrant l'unité de commande et les composants électriques)	43
Figure III.17 Forme finale du robot – Vue latérale montrant le système de nettoyage mécanique	44
Figure III.18 Panneau solaire avant nettoyage – Recouvert d'une couche visible de poussière.....	45
Figure III.19 Panneau solaire après nettoyage – La moitié du panneau a été nettoyée par le robot.....	45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 Caractéristiques principales du soleil [3].....	5
--	---

LISTE DES ABREVIATIONS

PV	Photovoltaïque
DC	Direct Current
AC	Alternating Current
MPPT	Maximum Power Point Tracking
I-V	Intensité-Tension / Current-Voltage
SOC	State of Charge
DO	Degré d'Occupation
kWh	Kilowatt-hour
Wc	Watt-crête
STC	Standard Test Conditions
LDR	Light Dependent Resistor
PWM	Pulse Width Modulation

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le monde connaît, au cours des dernières décennies, de profondes mutations dans le domaine énergétique, en raison de la croissance continue de la demande mondiale en énergie d'une part, et de l'aggravation des crises environnementales liées notamment au changement climatique d'autre part.

Ce contexte a poussé de nombreux pays et chercheurs à repenser les modèles traditionnels de production énergétique, largement fondés sur les sources fossiles, considérées comme les principales responsables de la pollution et des émissions de gaz à effet de serre. Dans cette optique, les énergies renouvelables s'imposent comme une alternative incontournable et stratégique, permettant de répondre aux besoins croissants en énergie de manière propre, durable et respectueuse de l'environnement.

Parmi ces sources, l'énergie solaire, en particulier le photovoltaïque, se distingue par sa disponibilité naturelle, sa large répartition géographique et son potentiel d'exploitation durable.

Cependant, malgré les avantages techniques et écologiques indéniables de cette technologie, la performance des panneaux photovoltaïques reste fortement influencée par plusieurs facteurs environnementaux, notamment l'accumulation de poussière, de sable, de fientes d'oiseaux et de polluants atmosphériques à leur surface. Ces dépôts réduisent la capacité des modules à capter le rayonnement solaire et à le convertir en électricité, affectant ainsi significativement leur rendement.

De nombreuses études ont démontré que la saleté accumulée peut entraîner une baisse de la production énergétique pouvant atteindre entre 5 % et 30 %, voire plus dans certaines régions arides ou désertiques. Ainsi, le nettoyage régulier des panneaux photovoltaïques s'avère crucial pour garantir leur bon fonctionnement et prolonger leur durée de vie.

Cependant, les méthodes de nettoyage traditionnelles, qu'elles soient manuelles ou semi-automatisées, présentent plusieurs limites : coût élevé, forte consommation d'eau, besoin de main-d'œuvre spécialisée, et difficulté d'accès dans les installations de grande envergure ou isolées. Face à ces contraintes, le recours à des solutions techniques innovantes et autonomes devient une nécessité afin d'optimiser l'entretien des installations solaires.

C'est dans ce cadre que s'inscrit ce projet de fin d'études, qui a pour objectif l'étude, la conception et la réalisation d'un robot intelligent et autonome, capable d'assurer le nettoyage des panneaux photovoltaïques de manière automatique, efficace et économe en énergie. Ce robot est conçu pour fonctionner sans intervention humaine directe, tout en s'adaptant aux contraintes environnementales et aux caractéristiques des sites d'installation.

Le projet repose sur l'intégration de trois volets technologiques complémentaires : la mécanique (pour la structure mobile et le système de brossage), l'électronique (pour le pilotage et l'alimentation électrique), et la programmation embarquée (pour le contrôle des actions et l'automatisation des tâches). Une carte Arduino a été utilisée comme unité centrale de commande, associée à des moteurs électriques et un petit panneau solaire pour assurer l'autonomie énergétique. Des tests expérimentaux ont été réalisés afin d'évaluer l'efficacité du système dans des conditions réelles, en analysant sa capacité à éliminer la saleté et à améliorer le rendement des panneaux.

Ce mémoire présente l'ensemble des étapes de réalisation du projet, en commençant par une étude théorique et comparative des solutions existantes, jusqu'à la conception finale, l'implémentation du prototype et l'analyse des résultats obtenus. Il est structuré en trois chapitres principaux :

- Le premier chapitre est consacré aux généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque, ses composants et les facteurs influençant son efficacité.
- Le deuxième chapitre présente un état de l'art des différentes techniques de nettoyage disponibles, en mettant en évidence leurs avantages, leurs limites et les défis qu'elles posent.
- Le troisième chapitre décrit en détail la conception du robot intelligent, ses éléments mécaniques et électroniques, le système de commande et les résultats des essais réalisés.

À travers ce travail, nous aspirons à proposer une solution innovante et évolutive, contribuant à l'amélioration de la maintenance des installations photovoltaïques, et à la promotion des technologies intelligentes et durables dans le secteur des énergies renouvelables.

Chapitre I Les systèmes photovoltaïques (Principes de fonctionnement, composants et défis environnementaux...)

I.1 Introduction

L'électricité produite par la conversion solaire photovoltaïque est une alternative importante aux autres sources d'énergie polluantes qui s'épuisent avec le temps. Dans ce chapitre, nous fournirons des informations générales sur les générateurs photovoltaïques, Nous décrirons également la modélisation et le fonctionnement des cellules photovoltaïques ainsi que les propriétés électriques associées. Nous couvrons également certains facteurs qui affectent l'efficacité des panneaux solaires et nous avons présenté certaines méthodes de nettoyage des panneaux solaires qui augmentent considérablement la productivité énergétique [1].

I.2 Énergie solaire photovoltaïque

Le terme "photovoltaïque" vient du grec, signifiant lumière, volts et électricité. L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium ou des matériaux recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure, ce qui est appelé l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant ainsi un courant électrique. Ce courant continu de micro faible puissance, mesuré en watt-crête (WC), peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur. L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe, stockée en batteries pour une utilisation décentralisée de l'énergie électrique) ou injectée dans le réseau.



Figure 1.1 Champ photovoltaïque.

I.2.1 Historique

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque [1] :

- En 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque, qui est le processus d'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide.
- En 1875 : Werner Von Siemens. Présente un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs devant l'Académie des Sciences de Berlin. Cependant, jusqu'à la Seconde Guerre mondiale, le phénomène demeure encore une curiosité de laboratoire.
- En 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, développent une cellule photovoltaïque à haut rendement. Cette avancée arrive à un moment où l'industrie spatiale émergente recherche des solutions innovantes pour alimenter ses satellites.
- En 1958 : Une cellule photovoltaïque avec un rendement de 9% est développée Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- En 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- En 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

I.3 Le soleil

Le soleil est l'étoile la plus proche de la Terre. C'est une sphère gazeuse essentiellement constituée d'hydrogène et d'hélium [2].

Le tableau I.1suivant montre quelques caractéristiques principales du soleil :

Tableau I.1: Caractéristiques principales du soleil [3].

caractéristiques	valeur
Masse	$1.989 \times 10^{30} \text{ kg}$
Diamètre	$1.392 \times 10^9 \text{ m}$
Masse volumique Moyenne	1410 Kg m^{-3}
Puissance rayon	$3.83 \times 10^{26} \text{ W}$
Températuresuperficial	5770K

La structure du soleil est schématisée sur la figure (I.1). On distingue quatre zones

Particulières; le noyau, la photosphère, la chromosphère et la couronne [3]:

Le noyau : c'est le cœur du soleil, sa température est très élevée (15×10^6 K) ainsi qu'est pression (2×10^{11} bars) et sa densité ($\sim 10^5 \text{ Kg m}^{-3}$), on note que cette dernière diminue avec l'éloignement au centre.

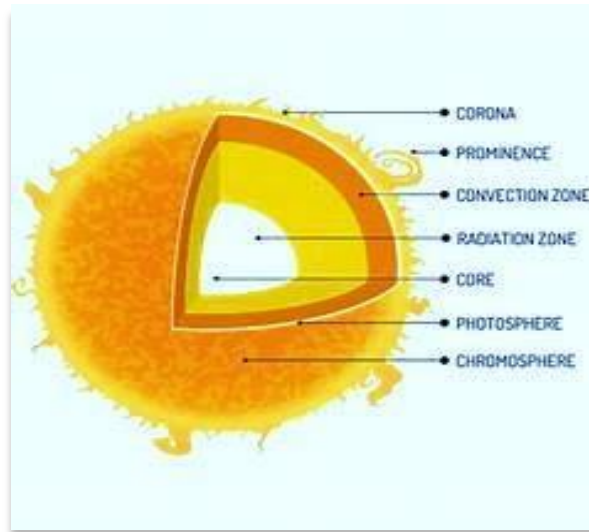


Figure I.2 Coupe schématique du soleil.]3[

L'énergie produite au sein du noyau se propage par diffusion radiative puis par convection Turbulente jusqu'à la photosphère d'où elle s'échappe sous forme de rayonnement électromagnétique vers l'espace.

- La photosphère : est une couche d'environ 300 Km d'épaisseur avec une température de 5770 K. Elle donne l'image visible du soleil.
- La chromosphère : est l'atmosphère du soleil. Elle a une épaisseur d'environ 8 000 Km et une température de 20 000 K environ.
- La couronne : est le prolongement de la photosphère. Sans limite précise, elle est formée de gaz peu denses et ionisés. Invisible depuis la terre, car son éclat (brillance) se confond avec celui du ciel bleu. Elle ne peut être observée que pendant une éclipse solaire. Sa température est très élevée puisqu'elle dépasse le million de degrés.
- Le soleil est composé chimiquement [4] de 70 % d'hydrogène et d'environ 28 % d'hélium et le 2 % restant étant mélange de plus de 100 éléments, soit pratiquement tous les éléments chimiques connus. La distance terre-soleil est égale en moyenne et approximativement à [3] 150×10^6 Km; cette distance est si grande que sa lumière nous parvient [4] 8 minutes après avoir été émise.

I.4 Fonctionnement de la conversion photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un matériau semi-conducteur qui convertit les photons des rayonnements solaires en énergie électrique par l'effet photovoltaïque. Cette conversion s'effectue en trois étapes: (I) L'Absorption de la lumière par le matériau : Le matériau semi-conducteur absorbe les photons du rayonnement solaire. (II) Transfert d'énergie des photons aux électrons : Lorsque les photons sont absorbés, ils transfèrent leur énergie aux électrons du matériau semi-conducteur, ce qui les excite et leur permet de se déplacer. (III) Collecte des charges : Les électrons excités sont collectés et dirigés vers une électrode, tandis que les trous (absence d'électrons) sont également collectés et dirigés vers une autre électrode. Ce déplacement des charges génère un courant électrique.

A l'état pur, les semi-conducteurs ne conduisent pas bien le courant. Ils incorporent donc des atomes d'impuretés pour améliorer leur conductivité; cette manipulation s'appelle le dopage. Les cellules photovoltaïques sont majoritairement principalement composées de deux couches de silicium. Physiquement, les deux couches sont dopées différemment : l'une est de type N, avec des atomes de phosphore ajoutés, pour supporter la conduction électronique, et l'autre est de type P, avec des atomes de bore ajoutés, qui conduit principalement à travers les trous. La région séparant ces deux régions forme une jonction PN avec une barrière de potentiel. La charge est collectée par des électrodes déposées sur les deux couches semi-conductrices. La tension (V) mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque lorsque le courant est nul, est d'environ 0,6 V. Le courant (I) de la cellule photovoltaïque en court-circuité lorsque la tension est nulle, dépend fortement de l'intensité du rayonnement solaire [5].

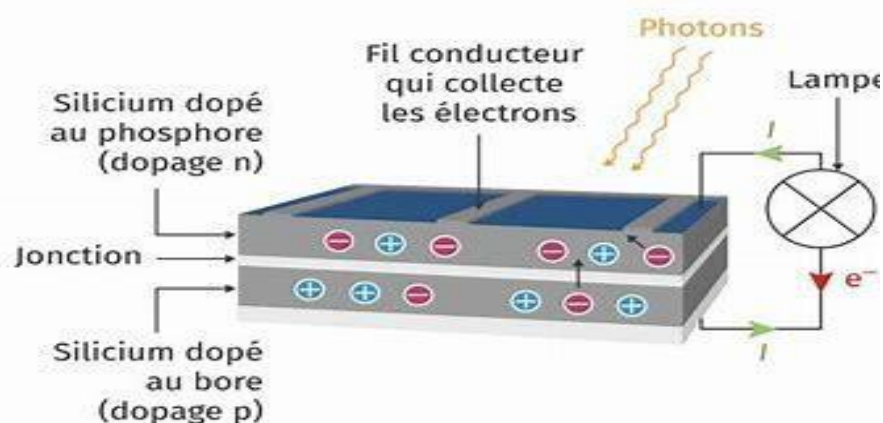


Figure I.3 Coupe transversale basique d'une cellule photovoltaïque à base de silicium.

I.5 Générateur photovoltaïque (champ PV)

Dans des conditions d'ensoleillement standard (1000W/m^2 , 25°C , AM1.5), la puissance maximale délivrée par une cellule en silicium de 150 cm^2 est d'environ 2.3 W sous une tension de 0.5V . Cette faible puissance est insuffisante pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Le générateur photovoltaïque est donc constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques, regroupés en panneaux photovoltaïques constitués de modules identiques [6]. La plupart des panneaux PV commerciaux sont constitués de sous-réseaux de cellules connectées en série. Chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules PV connectées en série. Le nombre de cellules par sous-réseaux est le fruit d'un compromis économique entre protection et pertes en cas de défaut partiel d'une partie importante du GPV [7].

I.5.1 Modules

Pour produire plus de puissance, les cellules solaires sont assemblées pour former un module. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension [8].

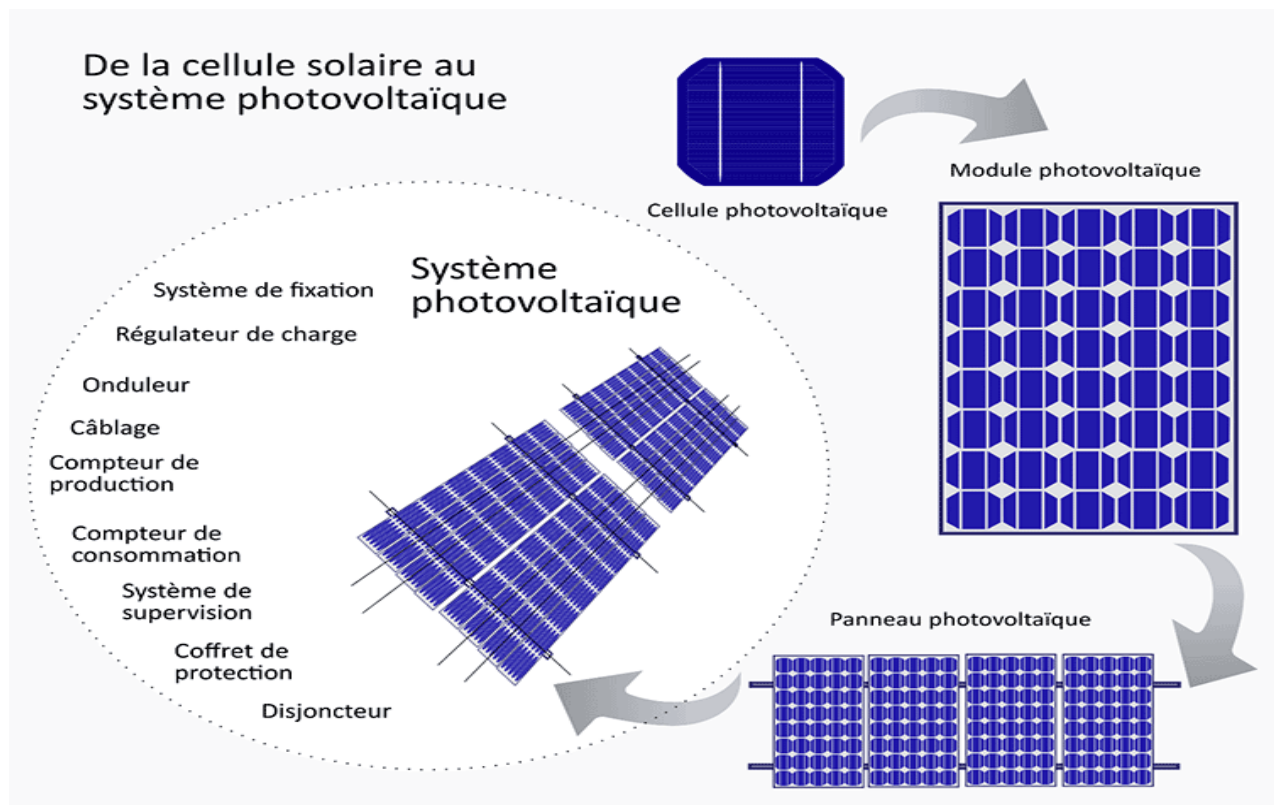


Figure I.4 Constituants d'un générateur PV.

I.5.2 Constituants

Afin de conférer au module une certaine protection et rigidité, il est essentiel de choisir soigneusement ses composants. Pour assurer une bonne captation du rayonnement solaire, il est essentiel de minimiser la réflexion des parties traversées par ce rayonnement [8].

- Cadre en aluminium : Le module est généralement entouré d'un cadre rigide en aluminium, comprenant des trous de fixation.
- Verre trempé : La surface avant est constituée d'un verre, trempé, d'une épaisseur de plusieurs millimètres, afin d'augmenter sa résistance aux chocs. Il assure une stabilité mécanique tout en étant transparent pour la lumière incidente.
- Couches d'encapsulation avant et arrière Les cellules de silicium sont enveloppées dans une résine EVA (éthylène-vinyleacétate).
- Surface arrière : La couche arrière sert de barrière contre l'humidité et les autres contraintes. Selon le fabricant, elle peut être constituée d'une autre plaque de verre ou d'une matière.

I.5.3 Fonction Les modules photovoltaïques assurent les fonctions suivantes

- Protection des cellules contre les agents atmosphériques
- Protection mécanique et support.
- Connexion électrique entre cellules et avec l'extérieur [8].

I.6 Différents types d'ombrages

On peut distinguer deux types d'ombrage : l'ombrage partiel et l'ombrage total.

I.6.1 L'ombrage partiel

C'est un ombrage qui laisse partiellement passer les rayons du soleil ou qui empêche seulement le rayonnement

I.6.2 L'ombrage total

On appelle ombrage complet ou total ce qui recouvre entièrement le panneau ou empêche tout rayonnement (direct et indirect) d'atteindre une partie de cellule photovoltaïque (par exemple, une déjection d'oiseau, une branche d'arbre sur le panneau, une couverture).

Il faut savoir que les cellules photovoltaïques sont connectées en série. Par conséquent, la cellule la plus faible aura un impact sur les performances des autres cellules. L'ombrage total d'une rangée de cellules peut rendre l'ensemble du module photovoltaïque inefficace. [9]

I.7 L'influence des différents types de salissures sur les modules PV

L'effet de la saleté sur les panneaux est le suivant

I.7.1 Effet de la poussière

La poussière est constituée de très petites particules avec un diamètre inférieur à $500\ \mu m$. Elle peut être représentée par des bactéries, des gouttelettes, du petit grain de pollen, des touffes de vêtements et de tapis, des cendres volcaniques, des cellules animales, de la boue ou de la vase, etc. L'accumulation de la poussière dépend de diverses conditions environnementales et météorologiques, des activités humaines, telle que la fumée des voitures, de l'activité volcanique, de la pollution de l'air, des activités industrielles, ainsi que de l'érosion des murs et des montagnes par les facteurs météorologiques et les tornades de boue, de sorte que la poussière varie d'une région à l'autre [10].

I.7.2 Effets de l'obstruction

La poussière adhère à la surface des panneaux solaires, ce qui bloque, absorbe et réfléchit la lumière. L'effet le plus importante est le blocage de la lumière. La réflexion, l'absorption et l'ombrage des particules de poussière sur la lumière affectent l'absorption de la lumière par les

Panneaux photovoltaïques, ce qui réduit leur efficacité de la production d'énergie (voir Figure I.5) Des recherches ont indiqué montré que la poussière déposée sur la surface réceptrice de lumière des modules solaires réduit d'abord la transmission de la lumière à travers la surface du panneau solaire puis modifie l'angle d'incidence de certains rayons lumineux, ce qui entraîne une répartition inégale de la lumière à travers la couche de verre [11].



FigureI.5 Panneau solaire en état poussiéreux

I.8 Effet de la corrosion

La surface des panneaux photovoltaïques est principalement constituée de verre, et dont les principaux composants du verre sont la silice et le calcaire. Lorsque de la poussière humide contenant de l'acide ou des alcalis adhère à la surface de la lamelle couvre-objet, les composants de la lamelle couvre-objet peuvent réagir avec l'acide ou l'alcali. Au fil du temps, dans un environnement acide ou alcalin, la surface en verre se corrode lentement, entraînant la formation de piqûres., ce qui entraînera la réflexion de la lumière diffuse sur la surface de la plaque de couverture, et l'uniformité de diffusion dans le verre est détruite.

De plus, plus la surface du revêtement du module photovoltaïque est rugueuse, moins l'énergie de la lumière réfractée est élevée, ce qui signifie que moins d'énergie réelle atteint la surface de la cellule photovoltaïque. Par conséquent, la production d'énergie de la cellule photovoltaïque diminue. Les surfaces rugueuses et collantes, contenant des résidus adhésifs, ont tendance à accumuler plus de poussière que les surfaces lisses. De plus, la poussière elle-même attire davantage de poussière. Une fois que de la poussière initiale est présente, elle entraîne une accumulation plus importante de poussière et accélère la détérioration de la production d'énergie photovoltaïque [11].

I.8.1 Nettoyage des systèmes photovoltaïques

L'un des principaux problèmes qui entravent le développement de l'industrie solaire dans les zones à forte densité de poussière est la contamination des modules PV par la poussière. Face à ce problème, une solution courante consiste à nettoyer les modules PV en utilisant les moyens de nettoyage disponibles sur le site d'installation du système PV. [12]

I.8.2 Méthodes de nettoyage

Afin d'assurer un rendement maximal, il est essentiel que les panneaux solaires doivent être propres. Si la surface des panneaux photovoltaïques est obstruée par de la poussière ou toute autre forme de salissure, ils ne pourront pas convertir efficacement l'énergie solaire. Heureusement, l'entretien d'une installation solaire est relativement simple. Le nettoyage des panneaux solaires et la maintenance de l'équipement être effectués par vous-même sans problème difficulté [13].



Figure 1.6 Sable sur les bords du cadre



Figure 1.7 Fientes d'oiseaux

I.8.3 Nettoyage naturel

Les modules PV bénéficient d'un nettoyage naturel grâce à la pluie et à la vitesse du vent. L'angle incliné des modules favorise l'écoulement des eaux de pluie, ce qui permet de nettoyer la saleté à la surface des modules PV. Ce type de nettoyage présente certainement de nombreux avantages, mais il peut également présenter quelques inconvénients [14].

I.8.4 Nettoyage manuel

Le nettoyage manuel est une méthode très primitive de nettoyage des panneaux solaires, effectuée entièrement à la main. Cette méthode a présente une faible efficacité de travail, un cycle de nettoyage long, un coût élevé de main-d'œuvre élevé et des risques potentiels pour la sécurité des personnes. Les centrales photovoltaïques à grande échelle utilisent rarement le nettoyage manuel.

D'autre part, le nettoyage à l'eau consiste à pulvériser de l'eau sur la surface du module photovoltaïque à l'aide d'une buse connectée à une roue hydraulique (ou à la une conduite d'eau), afin d'atteindre l'objectif de nettoyage. Cette méthode de nettoyage est supérieure au manuel sec, une efficacité de nettoyage est plus élevée, mais elle nécessite une consommation d'eau plus importante. De plus, une fois que le panneau solaire est naturellement séché à l'air, des taches d'eau peuvent se former à la surface, créant des micro-ombrage, qui affectent l'efficacité de la production d'énergie. De plus, l'utilisation de canons à eau à haute pression en hiver peut entraîner la formation d'une couche de glace qui affaiblit sérieusement l'effet optique des modules [13].

I.8.5 Nettoyage automatique

Les premiers appareils de nettoyage automatisé des modules PV ont été fabriqués aux Etats-Unis, plus précisément à Boston. Ce type de nettoyage consiste à faire glisser le nettoyeur principal verticalement sur les rails fixés à l'extrémité des panneaux solaires. Le robot est généralement combiné à un système automatique d'injection d'eau à basse pression sur les surfaces des panneaux solaires, ce qui permet de nettoyer les salissures sur les modules PV [14].

I.8.6 Robots de nettoyage intelligents

Il existe déjà des robots de nettoyage intelligents en Chine. Cette méthode consiste à installer un robot de nettoyage pour chaque rangée des panneaux photovoltaïques dans la une centrale électrique, permettant un nettoyage automatique et régulier, sans surveillance, ce qui permet d'économiser les coûts de main-d'œuvre Cette méthode convient aux centrales photovoltaïques à terrain plat Comparé aux méthodes de nettoyage traditionnelles, le robot de nettoyage intelligent est autonome en énergie et dispose d'un stockage d'énergie, éliminant ainsi le besoin d'une alimentation externe. Il effectue un nettoyage sans eau (sec), ce qui permet d'économiser de l'énergie, de protéger l'environnement, et d'économiser l'eau. La fréquence de fonctionnement peut être réglée selon les besoins du site, permettant ainsi un nettoyage régulière fonction de l'environnement. La force de nettoyage est uniforme ce qui évite d'endommager les panneaux solaires, et il le robot peut fonctionner la nuit [15].

I.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé une vision globale de l'énergie solaire photovoltaïque, une solution durable et propre pour faire face à la crise énergétique mondiale. Nous avons expliqué en détail le fonctionnement des cellules photovoltaïques, leur structure et les composants d'un générateur photovoltaïque. En outre, nous avons mis en lumière l'impact des facteurs environnementaux, notamment les ombrages et l'accumulation de saletés, sur le rendement des modules photovoltaïques. Il est apparu clairement que l'efficacité des panneaux solaires dépend fortement de leur propreté et de leur exposition optimale au rayonnement solaire.

CHAPITRE II Maintenance et nettoyage des panneaux photovoltaïques

II.1 Introduction

Les panneaux solaires photovoltaïques ont pour fonction de convertir le rayonnement solaire incident en courant continu. Ce courant est ensuite acheminé vers des onduleurs photovoltaïques (Peters) qui le transforment en courant alternatif (AC), permettant ainsi son injection dans le réseau électrique public ou son utilisation directe par les charges électriques.

Cependant, l'accumulation de poussière sur la surface vitrée des modules peut réduire la quantité de lumière atteignant les cellules photovoltaïques, entraînant une baisse significative de leur rendement. Par ailleurs, une accumulation irrégulière de salissures ou la présence d'éléments opaques, tels que des fientes d'oiseaux, peut engendrer des points chauds susceptibles d'endommager les panneaux à long terme.

II.2 Les techniques de nettoyage

Il existe plusieurs techniques de nettoyage utilisées dans différents domaines tels que l'entretien ménager, l'industrie, l'automobile, et bien d'autres. Voici quelques-unes des techniques couramment utilisées :

II.2.1 Nettoyage à sec

Cette technique est utilisée pour éliminer la saleté et les taches sans utiliser d'eau. Elle repose généralement sur l'utilisation de solvants ou de produits chimiques spéciaux. Le nettoyage à sec est souvent utilisé pour les vêtements délicats ou les tissus sensibles à l'eau [16].

II.2.3 Nettoyage humide

Le nettoyage humide implique l'utilisation d'eau ou d'un mélange d'eau et de détergent pour éliminer la saleté, la poussière et les taches. Cette méthode est couramment utilisée pour le nettoyage des surfaces dures telles que les sols, les carreaux, les fenêtres, etc [17].

II.2.4 Nettoyage à la vapeur

Cette technique utilise de la vapeur d'eau sous pression pour éliminer la saleté et les taches. La vapeur chaude peut dissoudre la saleté et tuer les bactéries, ce qui en fait une méthode efficace pour le nettoyage des tapis, des matelas, des meubles rembourrés et d'autres surfaces. [18]

II.2.5 Nettoyage par aspiration

L'aspiration est une méthode courante pour éliminer la poussière, les débris et les particules de saleté des surfaces telles que les tapis, les moquettes et les meubles rembourrés. Les aspirateurs utilisent un système d'aspiration pour collecter la saleté dans un réservoir ou un sac. [19]

II.2.6 Nettoyage à ultrasons

Cette technique utilise des ondes ultrasonores pour éliminer la saleté, la graisse et les contaminants des objets. Les objets à nettoyer sont placés dans un bain de liquide de nettoyage, et les ondes ultrasonores créent des vibrations qui délogent la saleté, permettant ainsi un nettoyage en profondeur [20].

II.3 Fréquence les panneaux solaires photovoltaïques doivent-ils être nettoyés

Le processus de détermination de la fréquence de nettoyage des panneaux photovoltaïques dépend du site du projet, des conditions d'installation et d'encrassement pris en compte lors de l'étude de productivité du projet d'électricité solaire. Par conséquent, il n'est pas possible de spécifier un nombre fixe de nettoyages pour les projets solaires photovoltaïques, même s'ils sont situés dans une certaine zone géographique.

Il est possible d'installer un appareil dans les projets de grande envergure qui calcule les pertes résultant du non nettoyage des panneaux. Cet appareil se compose de deux panneaux : le premier panneau n'est nettoyé que lorsque les panneaux du projet sont nettoyés, tandis que le deuxième panneau est nettoyé quotidiennement. Ensuite, le débit de la carte propre est comparé au débit de la carte sale afin de déterminer les pertes causées par l'absence de nettoyage.

Une fois que le montant des pertes résultant du non-nettoyage des panneaux est connu, il est possible de comparer le coût du processus de nettoyage avec le montant des pertes de productivité. Cela peut être réalisé en comparant le coût du nettoyage avec le prix de vente du kilowattheure (exprimé en cents/kilowattheure). [21]

II.4 Les éléments à prendre en compte lors du nettoyage des panneaux solaires photovoltaïques

- **Moment du nettoyage:** Il est recommandé de nettoyer les panneaux tôt le matin ou le soir, lorsque la différence de température entre l'eau utilisée et les panneaux solaires PV est minimale.
- **Arrêt des onduleurs électriques:** Le nettoyage des panneaux solaires photovoltaïques doit être effectué lorsque les onduleurs électriques ne fonctionnent pas. (Les chaînes des panneaux doivent être en position de circuit ouvert afin de ne pas affecter la productivité des panneaux et de réduire les risques de chocs électriques pour les travailleurs qui effectuent le nettoyage.
- **Éviter les produits chimiques :** Aucun produit chimique ne doit être utilisé dans le processus de nettoyage des panneaux solaires PV. Il est préférable d'utiliser une éponge humide ou un chiffon doux pour essuyer la surface vitrée des panneaux. Cette méthode convient aux projets résidentiels et de petite taille. Pour les projets de grande taille, l'utilisation de machines et de brosses spéciales est recommandée. [21]

II.5 Le bon mécanisme pour nettoyer les panneaux solaires photovoltaïque

Dans les petits projets résidentiels, l'utilisation d'éponges humides ou des chiffons doux est appropriée pour nettoyer les panneaux solaires photovoltaïques. Dans les projets de grande envergure et les projets dédiés à la vente d'électricité, comprenant des dizaines de milliers de panneaux, cette méthode devient peu pratique et peu rentable en termes de coûts techniques et financiers. Ci-dessous, nous expliquerons certaines des méthodes de nettoyage utilisées dans ces projets à grande échelle. [21]

II.6 Utilisation de brosses et extension d'un réseau d'eau sur le site du projet

Des brosses spéciales peuvent être utilisées pour nettoyer les panneaux solaires photovoltaïques, car ces brosses sont équipées d'une alimentation en eau et en électricité. La brosse se déplace sur les panneaux tout en pompant de l'eau sur leur surface. [21]



Figure II.1 Une brosse pour nettoyer les panneaux solaires photovoltaïques.



Figure II.2 Une brosse pour nettoyer les panneaux Solaires photovoltaïques Solaire

II.7 Utilisation de brosses avec l'utilisation d'une prise d'eau

Les mêmes brosses que nous avons évoquées au point précédent peuvent être utilisées, mais pour amener l'eau dans les passages entre les panneaux, un réservoir d'eau peut être installé sur un pick-up au lieu de prolonger un réseau d'eau complet au sein du site.

La meilleure option est déterminée entre la première option et cette option en fonction du nombre de temps de nettoyage requis annuellement, des conditions du site et du coût d'extension d'un réseau d'eau par rapport aux coûts d'utilisation d'une camionnette pour transporter l'eau, et si le nettoyage processus sera de la responsabilité du maître d'ouvrage ou de la responsabilité de l'entrepreneur qui a mis en œuvre le projet [21]



Figure II.3 Un réservoir d'eau avec ses accessoires est installé sur le pick-up pour le nettoyage des panneaux solaires photovoltaïques.

II.8 Utiliser des brosses et adopter le processus de nettoyage à sec (sans utiliser d'eau)

Dans certains projets, l'accès aux sources d'eau est limité ou les coûts sont élevés ce qui conduit les propriétaires et les exploitants de projets solaires photovoltaïques à préférer adopter le processus de nettoyage à sec pour les panneaux.

Il est conseillé de vérifier auprès du fabricant des panneaux solaires PV avant d'utiliser ce type de brosse/nettoyeuse, afin de s'assurer qu'elle n'endommagera pas les panneaux, en particulier le revêtement antireflet. (ARC). [18]

II.9 Petit robot mobile

Dans certains projets, en particulier ceux qui sont conçus et installés sur des toits de structures métalliques, où toute la surface est utilisée sans laisser d'espace pour les opérations de nettoyage et d'entretien, il devient nécessaire d'utiliser des robots mobiles dans le processus de nettoyage, comme illustré dans l'image ci-dessous.

Dans ce type de projet, l'utilisation des brosses mentionnées dans les options précédentes est difficile, car la largeur des panneaux solaires photovoltaïques dépasse la portée maximale des bras installés sur les brosses de nettoyage. (Cependant, les brosses peuvent être utilisées en les fixant avec des cordes, en les abaissant aux extrémités inférieures du réseau et en les remontant à nouveau). [21]



Figure II.4 Un petit robot mobile pour nettoyer les panneaux solaires photovoltaïques.

II.10 Robots installés sur panneaux solaires photovoltaïques

Il est également possible d'utiliser des robots installés sur les panneaux solaires photovoltaïques, comme indiqué dans les images ci-dessous. Ce type de robot dépend souvent du processus de nettoyage à sec.

Ces robots sont fixés en permanence sur les rangées de panneaux, éliminant ainsi complètement le besoin de la main-d'œuvre dans le processus de nettoyage à l'exception des opérations de maintenance ou pour réduire les coûts d'investissement (CAPEX). Ces robots peuvent être mobiles et déplacés d'une rangée à l'autre.

Cette méthode de nettoyage des panneaux doit être prise en compte dès la phase de conception du projet, où des structures métalliques supplémentaires sont généralement installées sur les supports

métalliques des panneaux afin d'éviter que ces robots n'exercent une pression ou une contrainte mécanique sur les panneaux. [21]



Figure II.5 Robots installés sur panneaux solaires.

II.11 Camions avec largeur de flèche de panneaux solaires photovoltaïque

La dernière méthode que nous mentionnerons dans cette section pour nettoyer les panneaux solaires photovoltaïques consiste à utiliser un camion équipé d'une flèche qui couvre la largeur des panneaux solaires photovoltaïques. Le nettoyage du panneau s'effectue en positionnant simplement le camion à côté du panneau, à un emplacement approprié.

Il est crucial de spécifier la méthode de nettoyage des panneaux dès la conception du projet. Par exemple, pour utiliser cette méthode de nettoyage, il est nécessaire de prévoir un espace suffisant entre les générateurs photovoltaïques pour permettre le déplacement du camion. De plus, aucun objet obstacle ne doit entraver le mouvement du chariot entre les rangées de panneaux. [21]



Figure II.6 Camion avec bras pour nettoyer les panneaux solaires photovoltaïque



Figure II.7 Un camion avec une flèche pour nettoyer les panneaux solaires photovoltaïque

II.12 Le nettoyage des panneaux photovoltaïques par drone

L'entretien des panneaux solaires par drone n'est pas une tâche à prendre à la légère. En effet, si cela demande de connaissances solides et une expertise exceptionnelle dans le pilotage des drones. Il est essentiel de maîtriser parfaitement les techniques de vol afin de couvrir toute la surface des panneaux. De plus, le choix des produits de nettoyage ne doit pas être négligé. Il peut être nécessaire d'utiliser des solutions dégraissantes pour des panneaux qui n'ont jamais été nettoyés depuis de nombreuses années.

Pour effectuer le nettoyage des panneaux solaires, un télé pilote expérimenté utilise le drone pour voler au-dessus des panneaux et pulvériser le liquide de nettoyage. Le drone est contrôlé avec précision pour s'assurer que toute la surface des panneaux est traitée de manière optimale.

Le nettoyage des panneaux solaires par drone est non seulement efficace, mais il réduit également les risques associés aux méthodes traditionnelles telles que l'utilisation d'échelles ou de plates-formes élévatrices. De plus, cette méthode permet d'économiser du temps et de la main-d'œuvre.

Il est important de faire appel à des professionnels qualifiés et expérimentés pour effectuer le nettoyage des panneaux solaires par drone afin de garantir un nettoyage adéquat et en toute sécurité.

[22]



Figure II.8 Un drone pour nettoyer les panneaux solaires photovoltaïque

II.13 Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les bases fondamentales sur le fonctionnement et la structure des systèmes photovoltaïques. En mettant en lumière les effets néfastes de l'encrassement et des ombrages sur les performances énergétiques, il souligne la nécessité d'intégrer des stratégies de maintenance adaptées, ce qui justifie pleinement l'intérêt pour des solutions automatisées de nettoyage comme celles explorées dans les chapitres suivants.

Chapitre III Conception et réalisation du robot

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons de manière structurée les principales étapes que nous avons suivies lors de la réalisation du projet du robot intelligent pour le nettoyage des panneaux solaires. Notre étude a commencé par l'analyse de l'idée générale du robot et la définition des exigences techniques et fonctionnelles. Ensuite, nous avons procédé au choix et à la conception d'une structure adaptée, en utilisant des matériaux légers et résistants. Par la suite, nous avons développé le système mécanique de déplacement et de nettoyage, en adoptant des solutions innovantes telles que l'impression 3D pour pallier certaines contraintes. Enfin, nous avons installé le système de commande électrique, en programmant un microcontrôleur Arduino pour gérer les mouvements et réagir automatiquement aux capteurs de manière efficace.

III.2 Spécifications techniques et fonctionnelles du robot (Cahier des charges)

Robot de nettoyage des panneaux solaires se déplace avec précision grâce à deux moteurs pas à pas (28BYJ-48) qui actionnent des roues fixées sur les côtés du châssis, assurant stabilité et évitant les chutes. Le nettoyage est assuré par une brosse rotative activée par un moteur, placée parallèlement à la surface du panneau. Le système combine déplacement et nettoyage pour une efficacité optimale avec une faible consommation d'énergie.

III.3 Dimensionnement d'un système

Pour réaliser un robot de nettoyage, le dimensionnement est une étape essentielle. La méthode de détermination des dimensions consiste d'abord à déterminer la largeur du cadre afin que les roues soient compatibles avec la structure du panneau solaire, où il est nécessaire d'accueillir l'équipement nécessaire pour faire fonctionner le robot, tel que les brosses, batterie, moteurs, et le relais de contrôle, et aussi de sorte que sa forme est cohérente et bonne.

III.3.1 Etapes de dimensionnement de l'installation

Les étapes de l'étude des dimensions de chaque partie du robot sont les suivantes

➤ **Moteur 28BYJ-48**

Le 28BYJ-48 est un moteur pas à pas unipolaire largement utilisé dans diverses applications de petite échelle telles que les robots, les imprimantes 3D et les petits appareils électroniques. Ce moteur est reconnu pour son faible coût, sa conception compacte et son couple modéré, ce qui le rend idéal pour des projets nécessitant un contrôle précis des mouvements avec une consommation d'énergie faible. Avec Spécifications techniques

Type : Moteur pas à pas unipolaire

Angle par étape : $5,625^\circ$ par étape

Nombre de pas par révolution : 64 pas

Tension : 5V (compatible avec des microcontrôleurs comme Arduino)

Courant : 20-25 mA par bobine

Couple : Environ 34 N·cm (dans des conditions standards)

Poids : Environ 20 grammes

Câblage : 5 fils (configuration unipolaire)

Vitesse : Réglable via le signal de commande pour ajuster la vitesse de rotation du moteur.



Figure III.1 Moteur 28BYJ-48

➤ **Moteur RS-3805-4.8V**

Le RS-3805-4.8V est un moteur à courant continu (DC) largement utilisé dans diverses applications nécessitant une puissance modérée et un facteur de forme compact. Ce moteur est principalement utilisé dans des projets nécessitant une rotation rapide et un contrôle de vitesse simple, comme les robots, les jouets motorisés, et d'autres appareils portatifs. Avec spécifications techniques :

Type : Moteur à courant continu (DC)

Tension : 4,8V

Vitesse à vide : 19 000 tours par minute (RPM) à 4,8V

Courant de fonctionnement : 0,5 A (en fonction de la charge)

Couple : 0,7 N·m à 4,8V

Dimensions : 38 mm de longueur, 28 mm de diamètre

Poids : Environ 60 grammes

Applications : Utilisé dans les petits robots, jouets motorisés, véhicules télécommandés et appareils électroniques nécessitant une puissance modérée.



Figure III.2 Moteur RS-3805-4.8V

➤ Arduino

Arduino est une plateforme de prototypage électronique open-source qui permet de concevoir des circuits électroniques et de développer des applications interactives. Elle est largement utilisée par les ingénieurs, les makers, et les amateurs pour créer des projets électroniques et des systèmes embarqués. Ce qui distingue Arduino des autres plateformes est sa simplicité d'utilisation et son accès facile à des composants électroniques à faible coût, ainsi que sa communauté active qui partage constamment des projets et des idées. Avec Spécifications techniques

Carte de développement : Les cartes Arduino sont basées sur des microcontrôleurs (comme l'ATmega328 pour Arduino Uno) qui permettent de contrôler des composants électroniques tels que des LED, des moteurs, des capteurs, des écrans, etc.

Programmation : La programmation d'un Arduino se fait via l'IDE Arduino (environnement de développement intégré) qui est compatible avec différents langages, principalement le langage C/C++. Les programmes écrits sont appelés "sketches", et ils sont téléchargés sur la carte via un câble USB. [24]

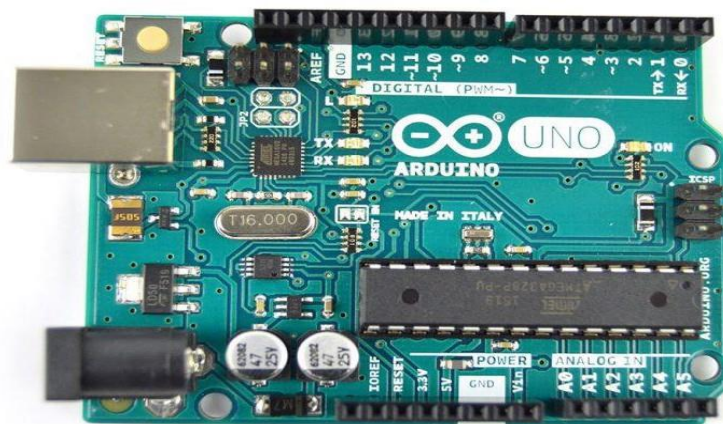


Figure III.3 Cartes Arduino

➤ **Panneau Solaire 3.5 W, 6V, 0.85 A**

Le panneau solaire de 3.5 W, 6 V, et 0.85 A est une unité de production d'énergie solaire de petite taille, idéale pour les applications nécessitant une faible puissance et un fonctionnement continu alimenté par la lumière du soleil. Ce type de panneau est couramment utilisé dans les systèmes à faible consommation tels que la recharge de petites batteries, l'alimentation de petits appareils comme les ventilateurs, ou encore pour des capteurs dans de petits projets.



Figure III.4 Panneau Solaire 3.5 W, 6V, 0.85 A

➤ **Régulateur de charge HW-167**

Le régulateur de charge HW-167 est un dispositif électronique utilisé pour gérer la charge de batteries dans les systèmes photovoltaïques. Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

- Tension nominale : généralement 12 V (adaptable selon les batteries utilisées),
- Courant maximal de charge : jusqu'à 10 A,
- Protection contre la surcharge : empêche la surcharge de la batterie afin d'en prolonger la durée de vie,
- Protection contre la décharge profonde : évite que la batterie ne se décharge complètement,
- Contrôle automatique : ajuste la charge en fonction de la tension et du courant fournis par le panneau solaire,
- Indications LED : fournit des signaux visuels indiquant l'état de charge et le fonctionnement du régulateur,
- Compatibilité : adapté aux petits systèmes solaires embarqués, comme celui du robot de nettoyage des panneaux photovoltaïques. [25]



Figure III.5 régulateur de charge HW-167

➤ **Batterie lithium 3,7 V modèle 14500**

La batterie lithium-ion 14500 est une batterie cylindrique rechargeable très utilisée dans les applications électroniques portables et embarquées. Ses caractéristiques principales sont:

- Tension nominale : 3,7 volts,
- Capacité typique : entre 600 mAh et 800 mAh selon les modèles,
- Dimensions : diamètre d'environ 14 mm et longueur de 50 mm, d'où son nom "14500",
- Chimie : lithium-ion rechargeable, offrant une bonne densité énergétique et une longue durée de vie,
- Utilisation : adaptée aux dispositifs nécessitant une alimentation compacte et légère, comme les robots mobiles, les lampes de poche, ou les petits systèmes électroniques, [26]



Figure III.6 batterie lithium-ion

III.3.2 Dimensionnement physique du robot

Le dimensionnement physique du robot a été réalisé en tenant compte des contraintes mécaniques, de la stabilité et de la compatibilité avec la largeur standard des panneaux photovoltaïques monocristallins. Les dimensions optimisées sont :

- Largeur : 25 cm
- Longueur : 80 cm
- Hauteur : 15 cm

Ces dimensions permettent d'intégrer l'ensemble des composants mécaniques et électroniques (moteurs, batteries, carte de commande, brosse de nettoyage) tout en garantissant la stabilité et en minimisant le risque de chute lors du déplacement sur les panneaux.

III.3.3 Dimensionnement électrique et consommation énergétique

Le dimensionnement électrique du robot repose sur l'évaluation de la puissance totale nécessaire au fonctionnement simultané de tous les composants.

- Moteurs pas à pas ($2 \times 28BYJ-48$)
 - Tension nominale : 5 V
 - Courant moyen par bobine : $25 \text{ mA} \times 4 \text{ bobines} = 0,1 \text{ A}$
 - Puissance par moteur : $5 \text{ V} \times 0,1 \text{ A} = 0,5 \text{ W}$
 - Puissance totale pour deux moteurs : $2 \times 0,5 \text{ W} = 1,0 \text{ W}$
- Moteur à courant continu (RS-3805-4.8V)
 - Tension nominale : 4,8 V
 - Courant : 0,5 A
 - Puissance : $4,8 \text{ V} \times 0,5 \text{ A} = 2,4 \text{ W}$
- Carte Arduino Uno
 - Tension : 5 V
 - Courant estimé : 100 mA
 - Puissance : $5 \text{ V} \times 0,1 \text{ A} = 0,5 \text{ W}$
- Capteurs et relais
 - Consommation estimée : 0,2 W

Puissance totale estimée : $P_{\text{total}} = 4,1 \text{ W}$

Consommation par cycle de 5 minutes : $E_{\text{cycle}} = 0,34 \text{ Wh}$

Capacité totale des batteries : $E_{\text{batteries}} = 8,88 \text{ Wh}$

Autonomie estimée : ≈ 26 cycles complets

Recharge via panneau solaire de 3,5 W : Temps $\approx 2,5$ à 3 heures

Remarque

Ce dimensionnement assure une autonomie énergétique suffisante pour plusieurs cycles de nettoyage avant recharge, avec une capacité de fonctionnement adaptée aux zones isolées.

III.4 Logicielle AutoCAD

AutoCAD est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) développé par la société Autodesk. Il est largement utilisé dans divers domaines tels que l'architecture, l'ingénierie, la mécanique et l'électronique pour la création de dessins techniques en deux et trois dimensions. Grâce à son interface puissante et à ses fonctionnalités précises, AutoCAD permet aux concepteurs de produire des plans détaillés et normalisés. Il est compatible avec plusieurs formats de fichiers, notamment DWG et DXF, ce qui facilite la collaboration entre les professionnels. Ce logiciel reste une référence incontournable dans le monde de la CAO. [23]

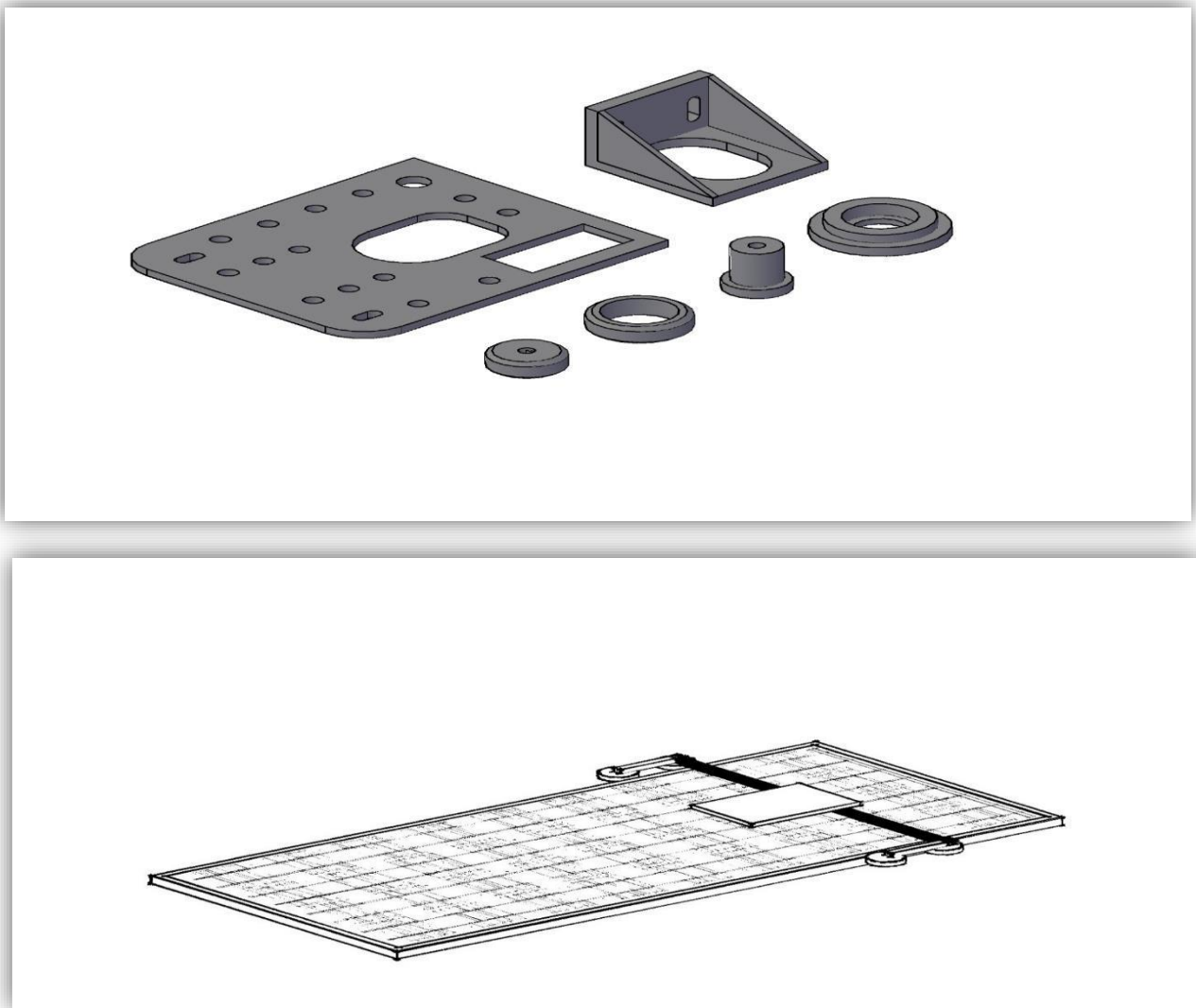


Figure III.7 Dessin en trois dimensions du châssis et des pièces utilisées, réalisé avec AutoCAD.

III.5 Réalisation et conception mécanique

Nous avons suivi les étapes suivantes pour la réalisation de notre robot de nettoyage.

➤ **Première étape**

Tout d'abord, nous avons préparé le châssis du robot. Nous avons utilisé une barre en aluminium, puis mesuré les dimensions du panneau solaire que le robot devra nettoyer. Après avoir pris les mesures nécessaires, nous avons découpé l'aluminium selon les besoins et assemblé les pièces entre elles, en utilisant des outils très simples.



Figure III.8 Couper et assembler le châssis du robot

➤ **Deuxième étape**

Deuxièmement, après avoir formé le châssis, nous avons fabriqué les roues en plastique et les avons montées sur les roulements et les moteurs



Figure III.9 les roues en plastique

➤ **Troisième étape**

À la troisième étape, nous installons les roues sur le châssis, en effectuant des mesures précises afin qu'elles soient placées correctement à l'endroit approprié.



Figure III.10 Les roues sur le châssis

➤ **Quatrième étape**

À la quatrième étape, nous avons utilisé une brosse de nettoyage de bonne qualité, non abrasive, afin de nettoyer le panneau de manière efficace. Nous avons assemblé deux brosses pour qu'elles correspondent à la longueur du panneau. En utilisant quelques astuces, nous avons réussi à fixer la brosse sur le châssis.



Figure III.11 Brosses de nettoyage



Figure III.12 La brosse sur le châssis.

➤ **Cinquième étape**

À la cinquième étape, nous avons constaté que lorsque la brosse tourne, elle renvoie la poussière vers l'arrière. Pour cela, nous avons fabriqué une structure en plastique qui protège le robot de la poussière, tout en protégeant la brosse des conditions climatiques comme les rayons du soleil. Cette structure apporte également un aspect plus esthétique au robot.



Figure III.13 Structures en plastique

III.6 Réalisation et conception électrique

Le système électrique du robot se compose de plusieurs composants permettant la mobilité, le fonctionnement du système de nettoyage, et l'alimentation autonome.

- **Mobilité par moteurs pas à pas**

Le robot est équipé de quatre roues, dont deux sont motorisées par deux moteurs pas à pas (Stepper Motors). Ces moteurs sont contrôlés via des drivers, connectés aux sorties **A** et **Y** de la carte Arduino. Ce dispositif offre un contrôle précis de la vitesse et de la position lors du déplacement le long du panneau solaire.

- **Système mécanique de nettoyage**

Une brosse cylindrique rotative est installée sous le robot et entraînée par un moteur à courant continu (DC). Pour une commande sûre et efficace de ce moteur, un relais électrique est utilisé comme interrupteur, contrôlé par une sortie numérique de l'Arduino. Cette méthode assure une isolation entre la commande logique et la puissance, protégeant ainsi le microcontrôleur.

- **Arduino et contrôle**

La carte Arduino joue un rôle central dans la gestion des composants du robot. Elle reçoit les signaux du capteur de fin de course et commande :

- Les drivers des moteurs pas à pas via les sorties **A** et **Y**,
- Le relais pour la mise en marche ou l'arrêt du moteur DC,
- La logique d'arrêt immédiat lorsque le capteur de fin de course est activé.

III.6.1 Schéma électrique fonctionnel

Le schéma électrique comprend :

- ❖ Deux moteurs pas à pas avec leurs drivers,
- ❖ Un moteur DC pour la brosse, contrôlé par un relais,
- ❖ Un capteur de fin de course unique,
- ❖ Une carte Arduino pour le contrôle central,
- ❖ Une batterie lithium-ion,
- ❖ Une cellule solaire de 3,5 W,
- ❖ Un régulateur de charge solaire.

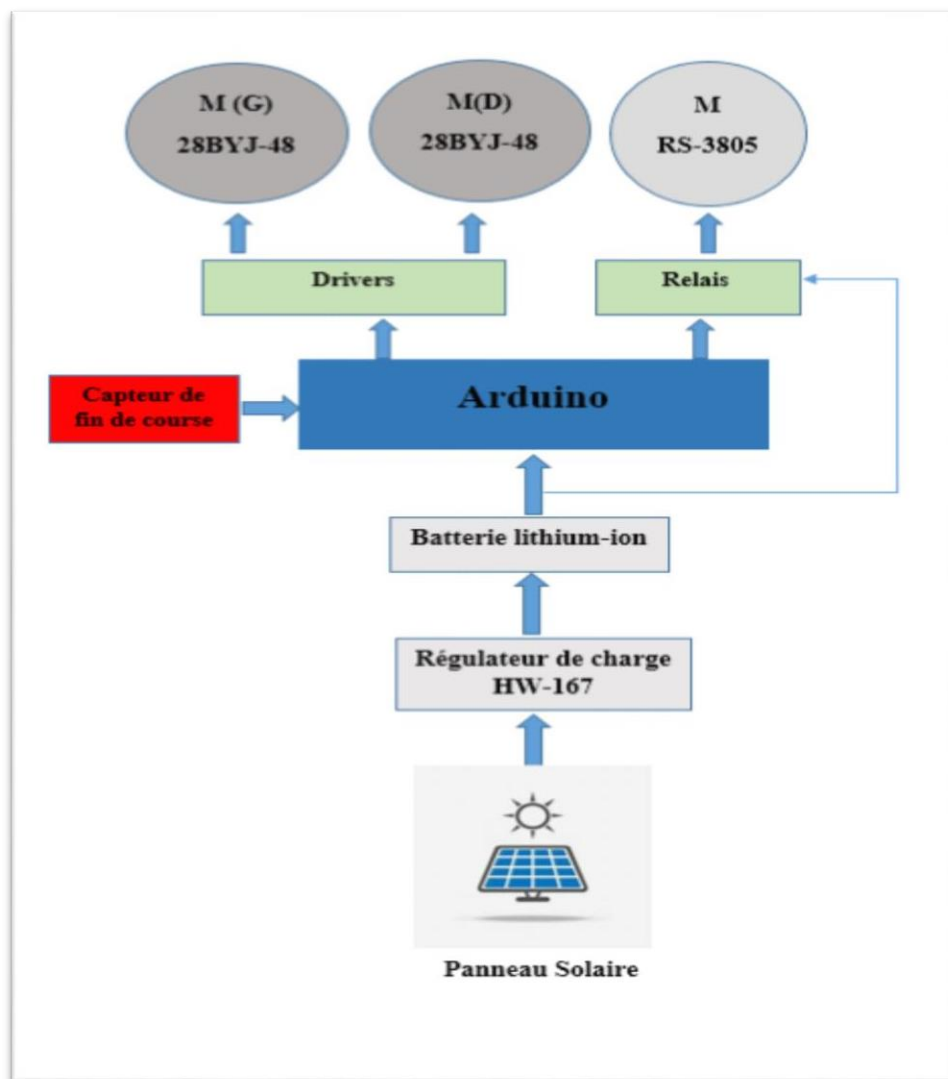


Figure III.15 Schéma électrique fonctionnel

III.7 Forme finale du robot et résultats des essais sur le terrain

Après avoir terminé le robot, nous présenterons sa forme finale et également les résultats de son expérience

➤ **Forme finale du robot**

Après l'assemblage de tous les composants mécaniques et électroniques, la forme finale du robot a été obtenue comme illustré dans les images suivantes. Le design final a été soigneusement étudié pour assurer la stabilité du robot lors de ses déplacements sur la surface des panneaux solaires, avec une répartition équilibrée des composants permettant un fonctionnement efficace sans compromettre la sécurité du panneau ni du robot.

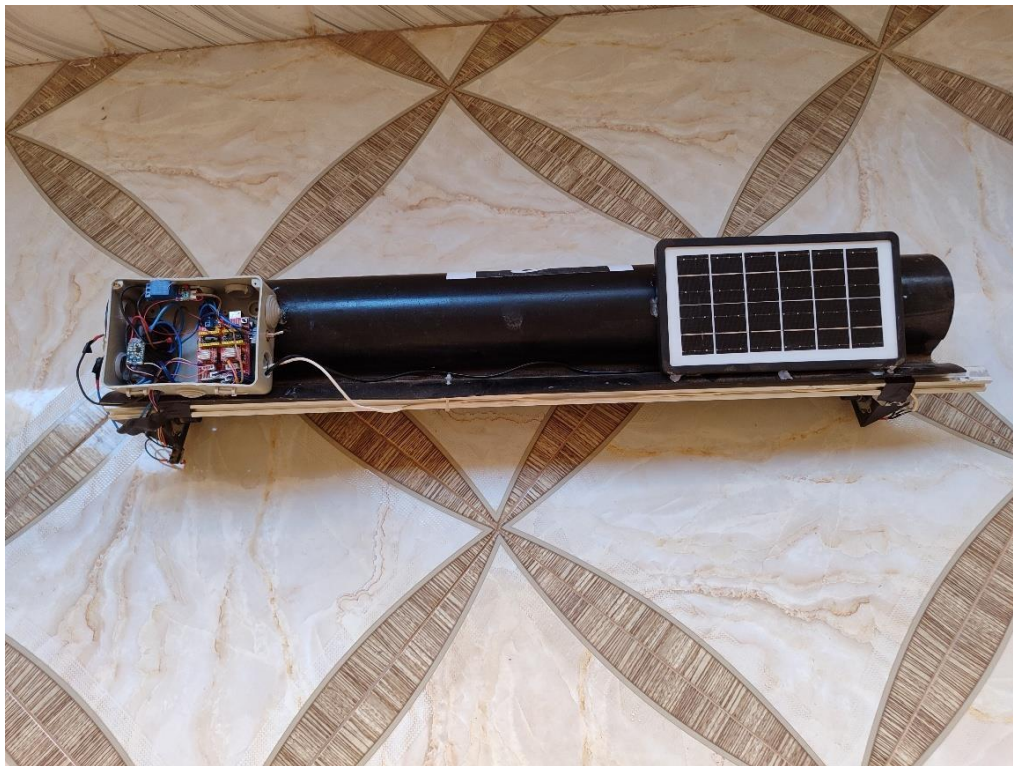


Figure III.16 Forme finale du robot – Vue de dessus montrant l'unité de commande et les composants électriques.



Figure III.17 Forme finale du robot – Vue latérale montrant le système de nettoyage mécanique.

➤ **Résultats de l'essai sur le terrain**

Afin d'évaluer l'efficacité du robot en conditions réelles, une expérience de nettoyage a été réalisée sur un panneau solaire couvert de poussière et de saletés. Seule la moitié du panneau a été nettoyée à l'aide du robot, tandis que l'autre moitié a été laissée intacte, afin de mettre en évidence visuellement la différence entre la zone nettoyée et la zone sale.

➤ **Conditions de l'essai**

- Type de panneau solaire : Monocristallin
- Niveau de salissure : Élevé (accumulation de poussière et de particules)
- Durée de fonctionnement : Environ 5 minutes par cycle de nettoyage
- Méthode de nettoyage : Brosse rotative mécanique
- Source d'énergie : Batterie rechargeable alimentée partiellement par un petit panneau solaire

➤ Résultats visuels

Enfin, nous avons testé le robot sur un panneau solaire exposé à des facteurs climatiques pendant environ trois mois et la poussière s'y est accumulée. Ceci est le résultat du robot qui nettoie la surface du panneau solaire



Figure III.18 Panneau solaire avant nettoyage – Recouvert d'une couche visible de poussière.



Figure III.19 Panneau solaire après nettoyage – La moitié du panneau a été nettoyée par le robot.

➤ Analyse des résultats

La comparaison des images met en évidence une différence notable de propreté entre la partie nettoyée par le robot et celle laissée intacte. La zone nettoyée apparaît plus brillante et réfléchit mieux la lumière, ce qui témoigne de l'efficacité du système de brossage dans l'élimination des poussières.

Cet essai pratique confirme les performances du robot en matière de restauration de la surface optique des panneaux, ce qui peut contribuer à une amélioration significative de leur rendement, notamment dans les environnements sujets à des dépôts fréquents de poussière, comme les zones rurales ou désertiques.

III.8 Conclusion

Ce chapitre a détaillé l'ensemble des étapes de conception, de fabrication et de test du robot de nettoyage. Les résultats obtenus confirment la faisabilité technique du système et sa capacité à répondre aux objectifs d'efficacité et d'autonomie. Néanmoins, des pistes d'amélioration subsistent, notamment en matière d'optimisation énergétique et de contrôle intelligent, ouvrant la voie à des perspectives futures prometteuses.

CONCLUSION GÉNÉRALE

À l'issue de ce travail de fin d'études, nous avons pu concevoir, développer et tester un prototype fonctionnel d'un robot intelligent autonome destiné au nettoyage des panneaux photovoltaïques. Ce système s'inscrit dans une problématique réelle et actuelle liée à l'entretien des installations solaires, dont la performance est directement affectée par l'accumulation de poussière et d'impuretés sur les surfaces actives.

Le robot que nous avons réalisé combine des éléments mécaniques légers et fonctionnels, un système de commande basé sur une carte Arduino, ainsi qu'une alimentation autonome soutenue par l'énergie solaire. Les essais expérimentaux menés sur le terrain ont permis de valider la faisabilité technique de la solution proposée. Ils ont mis en évidence une amélioration notable de la propreté des panneaux, une réduction significative de l'effort humain requis, ainsi qu'un potentiel intéressant pour les petites et moyennes installations solaires.

En dépit de certaines contraintes rencontrées, notamment liées à la stabilité du déplacement ou à l'autonomie énergétique en conditions climatiques défavorables, le système développé constitue une base solide pour des évolutions futures. Le projet a également permis de mobiliser et d'approfondir plusieurs compétences transversales, allant de la conception mécanique à la programmation embarquée, en passant par la gestion énergétique.

Par ailleurs, ce travail ouvre la voie à de nombreuses perspectives d'amélioration, parmi lesquelles

- ❖ L'intégration de capteurs intelligents pour évaluer en temps réel le niveau de salissure des panneaux.
- ❖ Le développement d'un algorithme de navigation autonome permettant au robot d'optimiser ses trajectoires.
- ❖ L'optimisation de la consommation énergétique afin d'accroître l'autonomie de fonctionnement.
- ❖ L'ajout d'une connectivité sans fil pour permettre un suivi à distance et une gestion centralisée.
- ❖ L'adaptation du système à des environnements plus complexes, comme les grandes fermes solaires ou les toitures inclinées.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Nous espérons que cette contribution puisse constituer un point de départ pour d'autres projets visant à rendre l'entretien des systèmes photovoltaïques plus automatisé, économique et durable. Dans un contexte mondial de transition énergétique, chaque avancée en matière de maintenance intelligente représente un pas supplémentaire vers une exploitation plus efficiente et pérenne de l'énergie solaire.

Références Bibliographies

- [1] Energies renouvelables. (2022, 21 avril). *Solaire photovoltaïque*. http://www.energies-renouvelables.org/solaire_photovoltaïque.asp
- [2] Mornay, T., Vernay, A., & Volle, M. (2005). *Les cellules photovoltaïques*. Classes préparatoires CPE.
- [3] CNRS. (n.d.). *Notions de base sur l'énergie solaire photovoltaïque*. <http://www2.cnrs.fr/presse/thema/340.htm>
- [4] CNRS. (n.d.). *Notions de base sur l'énergie solaire photovoltaïque* [Représentation].
- [5] Futura Sciences. (n.d.). *Maison : électricité solaire – énergie rayonnante*. <https://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/maison-electricite-solaire-energie-rayonnante-1225/page/12>
- [6] Abdelaziz, Y. (n.d.). *Contribution à l'optimisation des performances d'un générateur photovoltaïque en présence d'ombrage partiel*. Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès.
- [7] Deffa, C., Djema, A., & Djendi, A. (2021). *Étude de l'effet de la tension directe de la diode by-pass sur la puissance maximale d'un système photovoltaïque en présence d'ombrage partiel*. Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj.
- [8] Azzaoui, B. (2020). *Notes de cours : Chapitre deux – Systèmes photovoltaïques 2.1*. Université de Batna 2.
- [9] M. D. E. Fin. (2021). *Dédicaces*.
- [10] Kiran, R. (2016). An introduction to solar cell technology. *Journal of Applied Engineering Science*, 14, 481-491.
- [11] Solar Energy. (n.d.). <http://www.solarenergy.com.tw/index.php?option=module&lang=cht&task=pageinfo&id>
- [12] Genie, M., & Énergétique, E. T. (2015). *Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : Cas de la région soudano-sahélienne*.
- [13] Maroua, A. (2022). *Étude expérimentale de l'effet de la poussière et des fientes des oiseaux sur le fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques pour le site de M'Sila*. Université Mohamed Boudiaf – M'Sila.
- [14] Djemenda, N. F. (2015). *Mise en place et exécution d'un protocole d'étude et de suivi du nettoyage de modules photovoltaïques en zone très poussiéreuse : Cas de la région soudano-sahélienne*. Laboratoire Énergie Solaire et Économie d'Énergie (LESEE), 2iE, Ouagadougou, Burkina Faso.
- [15] XRP Solar. (2022, 4 mai). <http://xrp-solar.com/m/zixun/274493.html>
- [16] Kleissl, J., et al. (2018). Impact of dust on PV performance: Research status, challenges, and recommendations. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 8(1), 514-524.

- [17] Rekik, A., et al. (2019). Performance enhancement of PV modules via soiling mitigation technologies: A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 115, 109398.
- [18] Wood, D. M., et al. (2016). Solar photovoltaic soiling: A review of literature. *Solar Energy*, 132, 576-592.
- [19] Balaraju, V., et al. (2019). Effects of dust and dirt particles on the performance of photovoltaic modules. *International Journal of Energy Research*, 43(7), 3127-3142.
- [20] Paulseich, R., et al. (2020). Efficiency gains of cleaning photovoltaic panels in dry climates: A systematic review. *Sustainability*, 12(10), 4059.
- [21] The Solarest. (n.d.). <https://thesolarest.com>
- [22] Drone Hub. (n.d.). *Services de nettoyage de panneaux photovoltaïques*. <https://dronehub.fr/services/nettoyage-panneaux-photovoltaïques>
- [23] Autodesk. (2025, mai). *Qu'est-ce qu'AutoCAD ?*. <https://www.autodesk.com>
- [24] Arduino Documentation. (2025, mai). *Arduino sketches*. <https://www.arduino.cc>
- [25] Vecline. (n.d.). *Régulateur de charge 78 – régulateur de charge solaire*. <https://www.vecline.fr/fr/regulateurs-de-charge/78-regulateur-de-charge-solaire-10-a-pwm-3613750060025.html>
- [26] Wikipedia. (n.d.). *Accumulateur lithium-ion*. https://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_lithium-ion