

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique



Mémoire de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique industrielle

Par : **BAHLOUL Mohamed cherif**

SEKFALI Kheireddine

Thème

Elaboration d'un Système

Automatisé de nettoyage des panneaux solaires photovoltaïque

Soutenu publiquement le 24/06/2025. Devant le jury composé de :

M. BABOURI Abdesselam	Professeur	Univ. Guelma	Président/Examineur principal
M. MOUSSAOUI Abdelkrim	Professeur	Univ. Guelma	Encadreur
M. SEBBAGH Abdennour	Professeur	Univ. Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions Dieu Tout-Puissant qui nous a donné la force, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien ce travail de fin d'études.

Nous exprimons notre profonde gratitude à **Monsieur Moussaoui Abdelkrim**, notre encadrant académique à l'Université 8 Mai 1945 de Guelma, pour ses précieux conseils, sa disponibilité et son accompagnement tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

Nos remerciements vont également à **Monsieur Azzouzi Ahmidat**, notre encadrant de stage au sein de l'entreprise **INNOVATION CENTER** à Annaba, pour la confiance qu'il nous a accordée, pour ses orientations professionnelles et son soutien continu durant toute la période du stage.

Nous adressons également nos remerciements à l'ensemble du personnel de l'entreprise **POLPRO**, ainsi qu'à son directeur Monsieur **Benkirat Abdelaziz**, pour leur accueil chaleureux, leur disponibilité et leur précieuse collaboration, qui ont grandement facilité notre intégration ainsi que la réalisation de notre travail sur le terrain.

Nous adressons également nos remerciements à **l'Université 8 Mai 1945 de Guelma**, à ses enseignants et à l'ensemble du personnel du département pour la qualité de la formation dispensée et l'accompagnement tout au long de notre cursus.

Enfin, nous tenons à remercier nos familles, nos proches et tous ceux qui nous ont soutenus moralement, de près ou de loin, dans la réalisation de ce projet.

Résumé

Ce mémoire porte sur la conception d'un robot autonome de nettoyage de panneaux solaires, visant à maintenir leur rendement énergétique en éliminant la poussière et les impuretés accumulées. Le système utilise des moteurs pas à pas et DC, une pompe à eau, un réservoir, et une carte Arduino pour automatiser le processus de nettoyage à l'aide de brosses rotatives.

Des tests avant et après nettoyage ont montré une augmentation de la puissance produite par panneau (gain de 13 à 16 W). L'analyse économique confirme que le robot permet de réduire considérablement les coûts de nettoyage, avec un retour sur investissement estimé à moins de 4 ans.

Ce projet apporte une solution pratique, économique et durable pour l'entretien des installations solaires.

ملخص

يتناول هذا العمل تصميم وتنفيذ روبوت ذاتي لتنظيف الألواح الشمسية، بهدف الحفاظ على كفاءتها من خلال إزالة الغبار والشوائب المتراكمة على سطحها. يعتمد النظام على محركات خطوة ومحركات تيار مستمر، بالإضافة إلى مضخة ماء وخزان، ويتم التحكم فيه بواسطة لوحة أردوينو لتنفيذ عملية التنظيف تلقائيًا باستخدام فرش دوّارة.

أظهرت التجارب قبل وبعد التنظيف زيادة في الطاقة المنتجة من كل لوح شمسي (بمعدل ربح يتراوح بين 13 و16 واط). أما من الجانب الاقتصادي، فقد أظهرت التحاليل أن هذا الروبوت يقلل بشكل كبير من تكاليف التنظيف، مع فترة استرجاع تكلفة الاستثمار لا تتجاوز أربع سنوات.

يمثل هذا المشروع حلًا عمليًا وفعالًا واقتصاديًا لصيانة منظومات الطاقة الشمسية بشكل منتظم ومستدام.

Table des matières

Table des matières

Remerciement.....	
Résumé.....	
Table des matières.....	
Introduction générale.....	1
 Chapitre I : Contexte général	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Problématique.....	3
I.3 Objectifs.....	3
I.4 Résultats attendu	4
I.5 Revue de la littérature.....	4
I.5.1 Ecoppia-E4.....	4
I.5.2 Surya drone cleaner.....	5
I.5.3 SolarCleans.....	5
I.6 Etude de la faisabilité des fonctionnalités proposées	6
I.7 Méthodologie de mise en œuvre du projet	6
 chapitre II : Matériel et Conception	
II.1 Contraintes de conception	9
II.2 Méthodologie de conception.....	9
II.3 Description du matériel.....	10
II.3.1 Composants électrique.....	10
II.3.1.1 Moteurs à courant continue.....	10
II.3.1.2 Module relais.....	11
II.3.1.3 Pompe à eau électrique.....	11
II.3.1.4 Module Bluetooth HC-05.....	12
II.3.1.5 Arduino Uno.....	12
II.3.1.6 Alimentation électrique (Batterie 12V).....	13
II.3.1.7 Alimentation électrique (pile 9V).....	13
II.3.1.8 Driver tb6600 pour moteur pas à pas.....	14
II.3.1.9 Driver L298N pour moteur DC.....	14
II.3.1.10 Moteur DC 12V.....	15
II.3.1.11 Panneau solaire.....	16
II.3.2 Composants mécanique	16
II.3.2.1 Roulement.....	16
II.3.2.2 Brosse.....	17
II.3.2.3 Rail en fer.....	17
II.3.2.4 Réservoir d'eau.....	18
II.3.2.5 Buse de lave-glace.....	18
II.3.3 Assemblage du projet.....	19
 Chapitre III : Logiciel et Programmation	
III.1 Introduction.....	21
III.2 Control Unit Circuit.....	21
III.3 System Diagram.....	22
III.4 Arduino Code.....	23
III.5 Conclusion.....	24

Chapitre IV: Résultats et Discussion	
IV.1	Introduction..... 26
IV.2	Tests et évaluation.... 26
IV.3	Faisabilité économique 28
IV.4	Conclusion..... 29
Conclusion générale 31	
Annexe 33	
Références 53	

Liste des figures

Chapitre I	
Figure 01 :	Ecoppia-E4 5
Figure 02 :	Surya drone 6
Figure 03 :	SolarCleanso 6
Figure 04 :	Diagramme en blocs de la méthodologie de mise en œuvre du pro 7
Chapitre II	
Figure 05:	Schéma initial du projet 9
Figure 06 :	Moteurs pas à pas NEMA 17 10
Figure 07 :	Module relais 11
Figure 08 :	Pompe à d'eau électrique 11
Figure 09 :	Module Bluetooth HC-05 12
Figure 10 :	Arduino Uno 12
Figure 11 :	Alimentation de moteurs et du relais et pompes 13
Figure 12 :	Alimentation d'Arduino et HC-05 13
Figure 13 :	Driver tb6600 pour moteur pas à pas 14
Figure 14 :	Driver L298N pour moteur DC 15
Figure 15 :	Moteur DC 12V 16
Figure 16 :	Panneau solaire 16
Figure 17 :	Roulement 17
Figure 18 :	Brosse de nettoyage pour panneaux solaire 17
Figure 19 :	Rail en fer 18
Figure 20 :	Réservoir d'eau 18
Figure 21 :	Buse de lave-glace 19
Figure 22 :	Assemblage du projet
Chapitre III	
Figure 23 :	Schéma électrique de circuit 21
Figure 24 :	System Diagram 22
Chapitre IV	
Figure 25 :	ITECH IT8511A+ 27

Liste des tableaux

Chapitre IV

Tableau 01 : Mesures du module sans charge	27
Tableau 02 : Mesures du module avec charge à différents moments de la journée	28

Introduction générale

Introduction générale

Dans un contexte mondial marqué par la transition énergétique et la recherche de solutions durables, l'énergie solaire représente une alternative propre, inépuisable et accessible. En particulier, les panneaux photovoltaïques permettent de convertir l'irradiation solaire en électricité de manière directe. Toutefois, leur efficacité dépend fortement de leur état de propreté. En effet, la poussière, les débris végétaux, les fientes d'oiseaux ou encore les résidus de pollution réduisent considérablement la quantité de lumière atteignant les cellules, impactant ainsi leur rendement énergétique.

Face à cette problématique, il est nécessaire d'assurer un nettoyage régulier des panneaux, notamment dans des régions comme l'Algérie, où les conditions climatiques (vent, sable, sécheresse) accélèrent l'encrassement. Les méthodes manuelles ou industrielles, bien qu'efficaces, sont coûteuses, peu pratiques pour de grandes surfaces et nécessitent une main-d'œuvre importante.

Pour y remédier, ce projet vise à développer un robot autonome de nettoyage de panneaux solaires, capable de fonctionner de manière automatique avec une consommation d'énergie réduite, tout en assurant une maintenance simple et sécurisée.

Ce rapport est structuré de manière à présenter les différentes étapes de conception et de réalisation du projet.

Premièrement, le chapitre 1 introduit le contexte général du projet, définit la problématique, les objectifs visés et les résultats attendus.

Deuxièmement, le chapitre 2 est consacré à la conception électrique et mécanique et à la description des composants matériels utilisés pour la réalisation du système.

Troisièmement, le chapitre 3 présente la partie programmation, l'architecture logique du fonctionnement, ainsi que les schémas électriques du montage.

Enfin, le chapitre 4 expose les résultats expérimentaux, discute des performances obtenues et propose des pistes d'amélioration et des recommandations pour les futurs travaux.

CHAPITRE I

Contexte général

I.1. Introduction :

L'énergie solaire constitue une ressource abondante à l'échelle mondiale, capable de répondre largement à la demande énergétique actuelle. La quantité de rayonnement solaire atteignant la surface terrestre permettrait, en théorie, de satisfaire plus de 10 000 fois la consommation énergétique mondiale. [1] En moyenne, chaque mètre carré de surface reçoit suffisamment de lumière du soleil pour générer environ 1360 kWh par an. [2]

Les panneaux solaires jouent un rôle essentiel dans la transition énergétique. Ils permettent de produire de l'électricité propre, réduisant ainsi la dépendance aux centrales de production conventionnelles, souvent polluantes. Toutefois, pour garantir leur performance optimale, un nettoyage régulier est nécessaire, généralement tous les trois jours. Cette fréquence varie selon les régions. Par exemple, au Moyen-Orient, un nettoyage quotidien est souvent requis, ce qui engendre des coûts importants.

Dans ce chapitre, nous allons présenter :

- la problématique du projet
- les objectifs visés
- les résultats attendus
- la faisabilité
- ainsi que la méthodologie de conception adoptée
- Une revue de littérature détaillée viendra également compléter cette introduction.

I.2. Problématique :

Il a été constaté que le rendement réel des panneaux solaires est inférieur aux performances prévues en conditions idéales. Cela est principalement dû à l'accumulation de poussières, feuilles, insectes et autres salissures à la surface des modules. La présence de saleté diminue la capacité des cellules à absorber la lumière, réduisant ainsi l'efficacité de la production d'énergie. [3]

Pour remédier à ce problème, ce projet propose la conception d'un système automatisé de nettoyage des panneaux solaires. Cette solution vise à réduire la dépendance à la main-d'œuvre humaine tout en améliorant le rendement énergétique. [4]

I.3. Objectifs :

- Concevoir un système de nettoyage de panneaux solaires permettant d'augmenter leur rendement.
- Réaliser un dispositif simple et automatisé.
- Réduire au minimum l'intervention humaine.
- Concevoir un système non agressif pour les panneaux, qui n'altère pas leur qualité ni ne cause de dommages.

I.4. Résultats attendus :

- Obtenir une capacité de production améliorée après le nettoyage des panneaux.
- Réduire les coûts liés à l'entretien et au nettoyage.
- Minimiser l'intervention humaine, notamment dans les zones difficiles d'accès.

I.5. Revue de la littérature :

La production d'énergie électrique par les cellules photovoltaïques dépend essentiellement de l'irradiation solaire incidente sur la surface des panneaux. Pour optimiser cette exposition, les panneaux photovoltaïques sont généralement installés en plein air. Toutefois, cette installation extérieure les rend vulnérables à divers éléments, tels que l'accumulation de poussière, les déjections d'oiseaux, la glace ou encore les dépôts salins, qui entravent la transmission efficace de la lumière solaire vers les cellules, diminuant ainsi leur rendement énergétique. Afin de limiter ces pertes, différents systèmes de nettoyage ont été développés pour entretenir les panneaux photovoltaïques.

Surajit et al. (2018) ont réalisé une étude approfondie des différentes technologies de nettoyage appliquées aux installations solaires. [5] Parmi celles-ci, les robots de nettoyage autonomes se démarquent comme l'une des solutions les plus innovantes et efficaces. Ces robots se déplacent directement sur la surface des panneaux à l'aide de brosses souples, conçues pour ne pas rayer les modules. Le déplacement horizontal est généralement assuré par des chariots motorisés, tandis que le mouvement vertical est contrôlé par un système à courroie.

Grando et autres. (2017) ont également analysé plusieurs projets et technologies de nettoyage des panneaux solaires. [6] Leur étude met en lumière des dispositifs tels que le robot aérien l'Ecoppia E4, ainsi que le système de nettoyage NOMAD. Dans Garuda Aerospace,(2022), le drone Surya utilise de l'eau pour nettoyer les panneaux solaires de manière efficace et autonome. Ce système, conçu pour les installations solaires de grande taille, emploie un drone qui pulvérise de l'eau pour éliminer la poussière et les saletés des panneaux. Ce processus permet de maintenir une performance optimale des installations tout en réduisant les coûts de main-d'œuvre et de maintenance. [7]

SolarCleano (2024) Le SolarCleano F1 est un robot autonome, sans rail, qui assure un nettoyage efficace des panneaux solaires grâce à ses brosses rotatives et son design modulaire, capable de couvrir de larges surfaces à un rythme rapide. [8]

I.5.1. Ecoppia-E4 :

Parmi les technologies modernes de nettoyage des panneaux solaires, le système Ecoppia E4 se distingue par son fonctionnement entièrement autonome et son efficacité en milieu aride. Ce robot est conçu pour se déplacer automatiquement sur les rangées de panneaux photovoltaïques, en éliminant la poussière et les saletés superficielles à l'aide de brosses douces et antistatiques. L'un de ses principaux avantages réside dans l'absence totale

d'utilisation d'eau, ce qui en fait une solution idéale pour les installations situées dans des régions désertiques ou sujettes à une pénurie hydrique. [9] Grâce à sa conception légère et intelligente, Ecoppia E4 permet de maintenir un rendement énergétique optimal tout en réduisant considérablement les coûts de maintenance et les besoins en main-d'œuvre est illustré à la figure.



Fig. 01 : Ecoppia E4 [10]

I.5.2. Surya drone cleaner :

Le Surya Drone est une solution innovante de nettoyage automatisé des panneaux solaires, reposant sur une technologie de drone autonome. Conçu pour survoler les installations photovoltaïques avec une grande précision, il est équipé d'un système de nettoyage à air comprimé et, dans certains modèles, de brosses légères ou de mécanismes de pulvérisation. L'un des avantages majeurs du Surya Drone est sa capacité à couvrir rapidement de vastes surfaces sans contact direct prolongé avec les panneaux, réduisant ainsi les risques d'usure ou de dommages mécaniques. Grâce à son autonomie et à sa flexibilité d'intervention, ce drone s'avère particulièrement adapté aux installations situées dans des zones difficiles d'accès. [11]



Fig. 02 : Surya drone [12]

I.5.3. SolarCleanso F1 :

Le SolarCleanso F1 est un robot de nettoyage de panneaux solaires hautement performant, conçu pour fonctionner sans rails. Télécommandé et facilement transportable, il est capable de nettoyer rapidement de grandes surfaces de panneaux, qu'ils soient plats, inclinés ou même légèrement irréguliers. Équipé de brosses rotatives, il peut réaliser un nettoyage à sec ou avec de l'eau, selon le niveau d'encrassement. Son design modulaire permet d'adapter la longueur des brosses aux différentes configurations de champs photovoltaïques. Léger et maniable, le

SolarCleanso F1 se déploie facilement sur site et atteint un rendement de nettoyage allant jusqu'à 3 200 m² par heure. Fabriqué au Luxembourg, il est reconnu pour sa fiabilité, sa robustesse et sa flexibilité.[13]



Fig. 03 : SolarCleanso F1 [14]

I.6. Étude de faisabilité des fonctionnalités proposées :

La faisabilité du système de nettoyage proposé sera évaluée ultérieurement à travers les résultats expérimentaux, tant sur le plan technique que financier. Sur le plan technique, l'accent sera mis sur l'amélioration de l'efficacité, tandis que sur le plan financier, l'objectif sera de démontrer la réduction des coûts de nettoyage.

I.7. Méthodologie de mise en œuvre du projet :

Un diagramme fonctionnel de la méthodologie de mise en œuvre du projet est présenté dans la figure 04

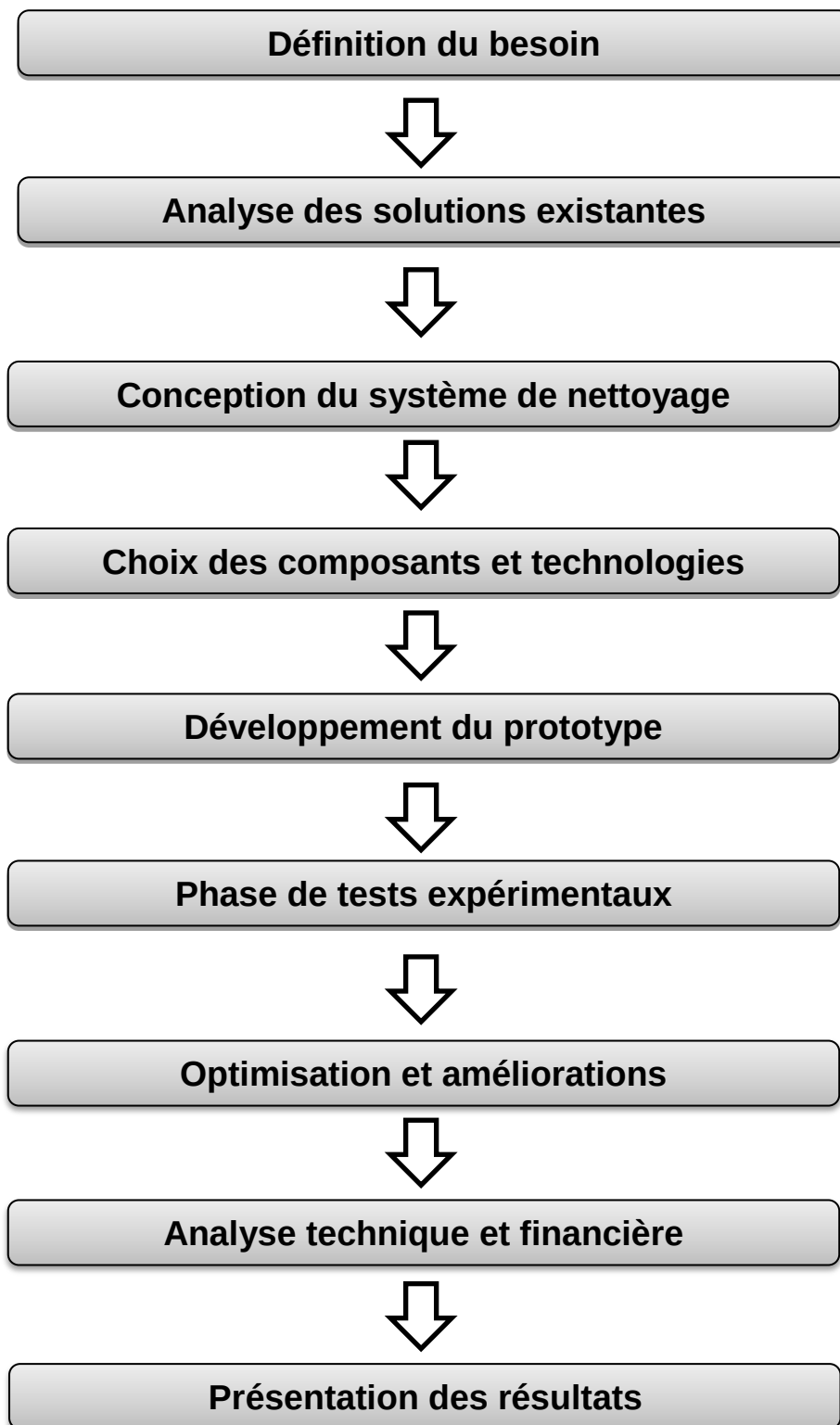


Fig. 04 : Diagramme en blocs de la méthodologie de mise en œuvre du projet

CHAPITRE II

Conception et Matériel

II.1. Contraintes de conception :

Les contraintes de conception sont des conditions essentielles à la réussite d'un projet. Dans le cadre de ce travail, nous avons veillé à aligner notre conception autant que possible avec les normes d'ingénierie. Cela a été réalisé notamment grâce à une revue de littérature approfondie, comme expliqué dans le chapitre précédent, où des experts ont mené des recherches similaires. Ces travaux nous ont été d'une grande utilité lors de la phase de conception.

Le système a été principalement fabriqué en fer. Il fonctionne comme un chariot se déplaçant sur un rail à l'aide de quatre roues fixées aux extrémités des panneaux solaires. Quatre paliers montés (pillow block) ont été utilisés pour supporter les roues installées sur une tige métallique, permettant ainsi leur déplacement sur le rail. Nous estimons que cette méthode de conception est fiable et robuste.

II.2. Méthodologie de conception :

Comme mentionné précédemment, l'objectif principal de ce projet est de concevoir un système intelligent permettant de nettoyer automatiquement les modules de panneaux solaires. Afin d'atteindre cet objectif et de satisfaire à l'ensemble des exigences du projet, celui-ci a été divisé en plusieurs étapes.

Étape 1 : Structure et assemblage du système :

Après avoir étudié les technologies existantes de systèmes de nettoyage de panneaux solaires, nous avons entamé ce projet par la réalisation d'un schéma initial du système proposé, comme illustré à la figure 05

De manière générale, le système est constitué d'un chariot se déplaçant sur un rail à l'aide de quatre roues, transportant la brosse ainsi que l'ensemble des équipements mécaniques et électriques.

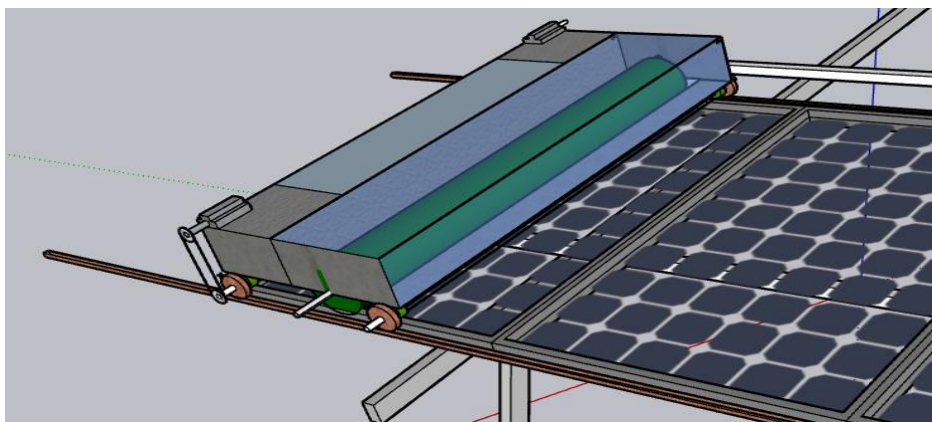


Fig. 05 : Schéma initial du projet

Étape 2 : Commande du système :

L'unité de commande est basée sur une carte Arduino Uno. Le système repose principalement sur deux moteurs à courant continu et une électrovanne pour l'eau. Un module de relais, associé à l'Arduino, est utilisé pour contrôler le fonctionnement de ces équipements.

Par ailleurs, le contrôle de la vitesse et du sens de rotation (avant/arrière) des moteurs DC a été mis en œuvre avec succès. De la même manière, la commande de l'électrovanne (activation/désactivation) a été assurée à l'aide d'un relais.

II.3. Description du matériel :

II.3.1 Composants électriques :

II.3.1.1 Moteurs à courant continue :

Les moteurs pas à pas sont des moteurs électriques qui convertissent l'énergie électrique en mouvement mécanique par incréments angulaires précis appelés "pas". Contrairement aux moteurs à courant continu classiques, les moteurs pas à pas ne tournent pas de manière continue, mais avancent pas à pas, ce qui permet un contrôle très précis de la position, de la vitesse et de l'accélération.

Le modèle NEMA 17 est l'un des moteurs pas à pas les plus couramment utilisés dans les systèmes embarqués, l'automatisation légère et les projets robotiques, notamment pour les imprimantes 3D, les traceurs et les petits robots. Il offre un bon compromis entre couple, compacité et facilité de commande, avec des spécifications typiques d'un angle de pas de 1.8° (soit 200 pas par tour).

Dans notre projet, deux moteurs pas à pas NEMA 17 sont utilisés pour assurer le déplacement contrôlé du système sur les rails. Leur précision et leur capacité à être commandés numériquement font d'eux un choix idéal pour automatiser le mouvement du robot de nettoyage des panneaux solaires. Leur intégration est illustrée à la figure 06



Fig. 06 : Moteurs pas a pas NEMA 17

II.3.1.2. Module relais :

Un relais est un interrupteur commandé électriquement. La plupart des relais utilisent un électroaimant pour actionner mécaniquement un contact, mais d'autres principes de fonctionnement existent, comme les relais à état solide. Les relais sont utilisés lorsqu'il est nécessaire de contrôler un circuit à partir d'un signal faible et séparé, ou lorsque plusieurs circuits doivent être commandés par un seul signal. Un exemple typique de relais est montré à la figure 07.

De plus, dans l'industrie, un relais commande la vanne électrique d'eau en recevant un signal provenant du module relié à la carte Arduino.



Fig. 07 : Module relais

II.3.1.3. Pompe à eau électrique :

La pompe à eau électrique représentée à la figure 2.8 est un dispositif compact fonctionnant en courant continu (12V ou 24V). Elle est conçue pour assurer le transfert de l'eau dans des systèmes autonomes, comme le nettoyage de panneaux solaires. Sa structure en plastique renforcé la rend légère et résistante à la corrosion, tandis que ses embouts cannelés facilitent le raccordement aux tuyaux. Elle génère un débit stable grâce à une turbine entraînée par un moteur intégré, offrant ainsi une solution fiable et économe en énergie pour des applications embarquées.



Fig. 08 : Pompe à d'eau électrique

II.3.1.4. Module Bluetooth HC-05 :

Le HC-05 est un module Bluetooth série maître/esclave largement utilisé pour établir une communication sans fil entre un microcontrôleur (comme Arduino) et un autre appareil compatible Bluetooth (PC, smartphone, etc.). Il fonctionne via une interface UART (TX/RX) à une tension de 3,3V en logique et 5V en alimentation. Il permet d'échanger des données jusqu'à 10 mètres avec une vitesse de transmission configurable (par défaut 9600 bauds). Grâce à sa simplicité et à sa compatibilité avec de nombreux projets embarqués, il est idéal pour les systèmes de contrôle à distance ou les applications domotiques.

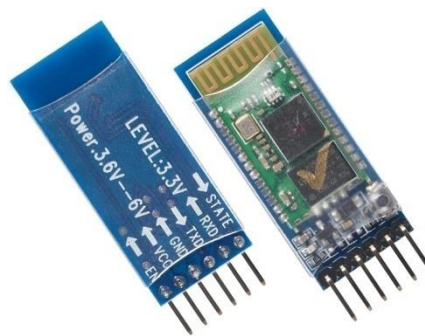


Fig. 09 : Module Bluetooth HC-05

II.3.1.5. Arduino Uno :

L'Arduino UNO est une carte microcontrôleur programmable open source, économique, flexible et facile à utiliser, pouvant être intégrée dans une grande variété de projets électroniques. Elle peut être interfacée avec d'autres cartes Arduino, des shields Arduino, des cartes Raspberry Pi, et peut contrôler des relais, des LED, des servomoteurs et des moteurs en sortie. [15]



Fig. 10 : Arduino Uno

II.3.1.6. Alimentation électrique (Batterie 12V) :

Le système est alimenté par une batterie au plomb-acide de 12 volts, couramment utilisée dans les applications mobiles et autonomes. Cette source d'énergie fournit une tension stable et suffisante pour faire fonctionner les composants du projet, tels que les moteurs, la pompe à eau. Elle présente l'avantage d'être rechargeable, fiable et facilement intégrable dans des environnements extérieurs, notamment pour les systèmes de nettoyage de panneaux solaires.



Fig. 11 : Alimentation de moteurs et du relais et pompes

II.3.1.7. Alimentation électrique (pile 9V) :

Une pile 9V est utilisée pour fournir l'alimentation nécessaire au microcontrôleur Arduino et au module Bluetooth HC-05. Elle permet d'assurer une tension suffisante pour les circuits logiques tout en garantissant une portabilité au système. Cette solution est pratique pour les tests ou les projets de courte durée. Toutefois, en raison de sa capacité limitée, son autonomie reste réduite et elle convient mieux aux applications à faible consommation.



Fig. 12 : Alimentation d'Arduino et HC-05

II.3.1.8. Driver tb6600 pour moteur pas à pas :

Le driver TB6600 est un module de commande robuste conçu pour contrôler des moteurs pas à pas bipolaires, comme le NEMA 17 ou NEMA 23. Il fonctionne avec une tension d'entrée allant de 9V à 40V et peut fournir jusqu'à 4 A par phase, ce qui le rend adapté aux applications nécessitant un couple élevé.

Ce driver est compatible avec les microcontrôleurs tels qu'Arduino ou ESP32 grâce à ses entrées logiques simples :

- ENA (Enable)
- DIR (Direction)
- PUL (Pulse)

Le TB6600 permet le microstepping, c'est-à-dire la division des pas pour améliorer la fluidité et la précision du mouvement (jusqu'à 1/32 de pas). Il est protégé contre les surintensités, les courts-circuits et la surchauffe, ce qui garantit une utilisation fiable dans les projets de robotique, de CNC ou de systèmes automatisés.



- deux entrées logiques (IN1/IN2 et IN3/IN4) pour contrôler le sens de rotation de chaque moteur
- deux entrées PWM (ENA, ENB) pour ajuster la vitesse via un signal de modulation de largeur d'impulsion
- des bornes de sortie moteur (OUT1 à OUT4)
- un régulateur 5V intégré, qui peut être activé ou non selon les besoins

Ce driver est souvent utilisé dans les projets Arduino et robotiques pour sa simplicité, son faible coût et sa compatibilité avec une large gamme de moteurs.



Fig. 14 : Driver L298N pour moteur DC

II.3.1.10. Moteur DC 12V :

Un moteur à courant continu de 12 volts est utilisé pour entraîner la brosse de nettoyage du robot. Ce type de moteur est apprécié pour sa simplicité, sa facilité de contrôle et sa capacité à fournir un couple suffisant pour faire tourner la brosse de manière régulière. Il permet ainsi de détacher efficacement la poussière et les saletés accumulées sur la surface des panneaux solaires. Son fonctionnement peut être contrôlé à l'aide d'un module de puissance comme le L298N ou un relais, selon les besoins du système.



Fig. 15 : Moteur DC 12V

II.3.1.11. Panneau solaire :

Le robot est équipé d'un petit panneau solaire embarqué qui permet de recharger sa batterie de manière autonome. Ce système prolonge l'autonomie du robot et réduit la dépendance à une source d'alimentation externe, tout en assurant une recharge continue grâce à un régulateur de charge.



Fig. 16 : Panneau solaire

II.3.2. Composants mécaniques :

II.3.2.1. Roulement :

Les roulements sont utilisés pour assurer une **rotation fluide et stable des roues** du robot, en réduisant les frottements et en facilitant le mouvement de l'axe. Ils permettent d'améliorer la précision, la durabilité et la performance globale du système, comme illustré à la figure 16



Fig. 17 : Roulement

II.3.2.2. Brosse :

Les brosses à poils doux pour le nettoyage des panneaux solaires permettent d'éviter les rayures durant le nettoyage. La poussière s'accumule sur la surface des panneaux photovoltaïques, ce qui réduit l'irradiation solaire effective reçue. De même, les déjections d'oiseaux, la glace et les dépôts de sel sur les panneaux bloquent aussi la lumière solaire. C'est pourquoi une brosse est utilisée pour les nettoyer.



Fig. 18 : Brosse de nettoyage pour panneaux solaires

II.3.2.3. Rail en fer :

Il est utilisé pour guider la trajectoire des roues tout en supportant la structure du projet.



Fig. 19 : Rail en fer

II.3.2.4. Réservoir d'eau :

Le réservoir d'eau est un composant essentiel du système de nettoyage. Il sert à stocker l'eau utilisée pour laver la surface des panneaux solaires. Il est généralement fabriqué en plastique léger et résistant, ce qui permet de l'intégrer facilement à la structure mobile du robot. Sa capacité est choisie en fonction de la durée de fonctionnement souhaitée et de la consommation du système de pompe. Il est relié à la pompe par un tuyau souple, permettant une alimentation continue en eau lors du processus de nettoyage.



Fig. 20 : Réservoir d'eau

II.3.2.5. Buse de lave-glace :

La buse lave-glace est utilisée pour pulvériser l'eau de manière contrôlée sur la surface des panneaux solaires. Elle est connectée à la pompe via un tuyau souple et assure une diffusion fine et ciblée de l'eau, permettant de mouiller efficacement la surface à nettoyer sans gaspillage. Ce type de buse est léger, facile à installer et conçu pour fonctionner sous une faible pression, ce qui le rend parfaitement adapté aux petits systèmes de nettoyage automatisés comme les robots de maintenance photovoltaïque.



Fig. 21 : Buse de lave-glace

II.3.3. Assemblage du projet :

Il s'agit d'une structure réalisée en filament plastique imprimé en 3D, renforcée par des plaques en Alucobond, afin d'assurer une meilleure résistance mécanique et une stabilité structurelle. Ce choix de matériaux permet d'obtenir une structure légère, solide et adaptée à l'environnement extérieur du système, comme illustré à la figure 22

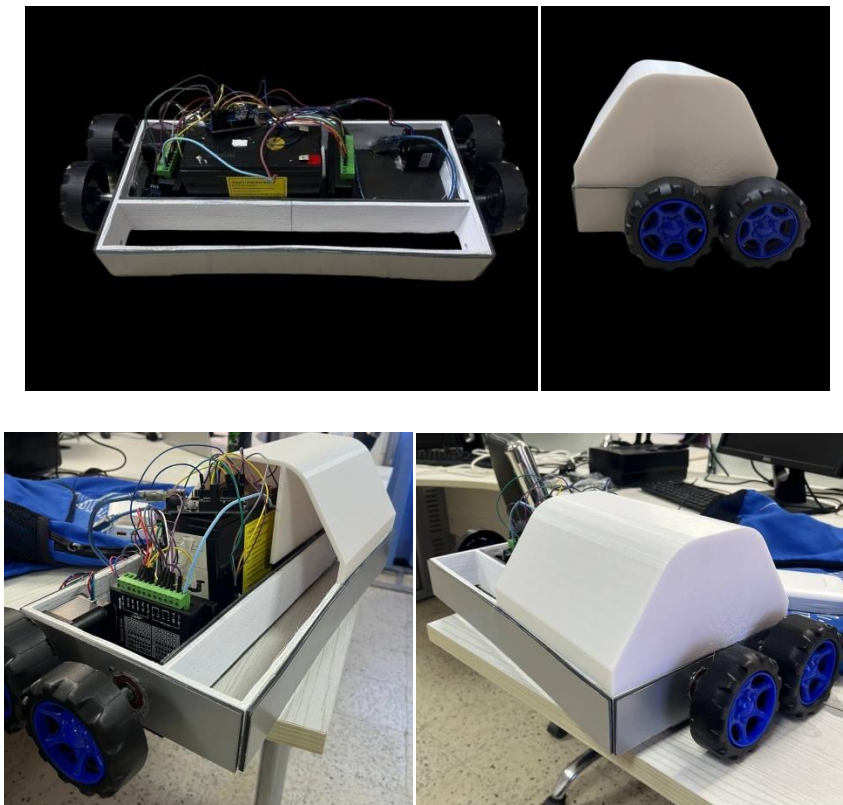


Fig. 22 : Assemblage du projet

CHAPITRE III

Logiciel et Programmation

III.1. Introduction :

L'unité de commande du système de nettoyage des panneaux solaires est basée sur un microcontrôleur Arduino, qui gère la séquence de nettoyage à l'aide d'interrupteurs de fin de course et de relais.

III.2. Control Unit Circuit :

Schéma électrique de circuit comme illustré à la figure 23.

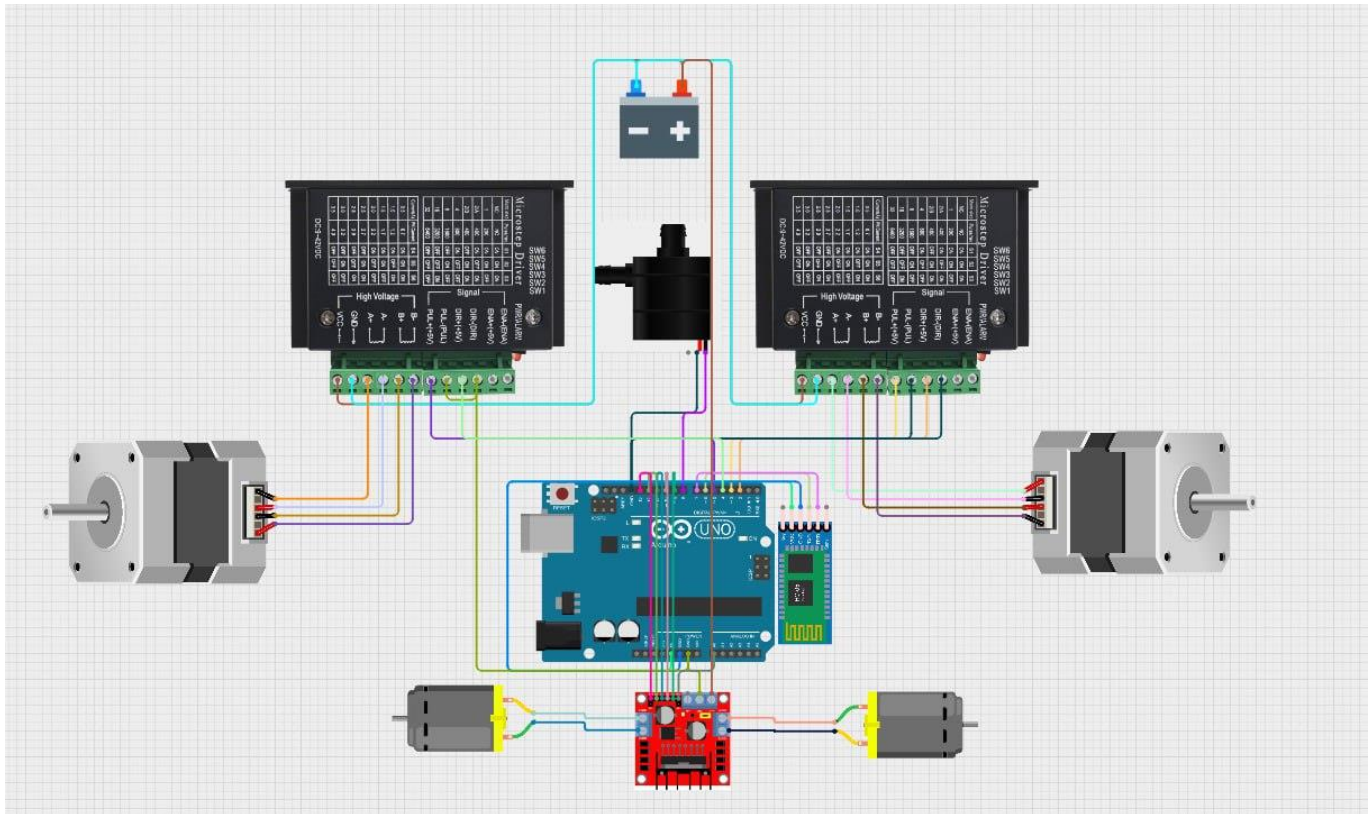


Fig. 23 : schéma électrique de circuit

III.3. System Diagram :

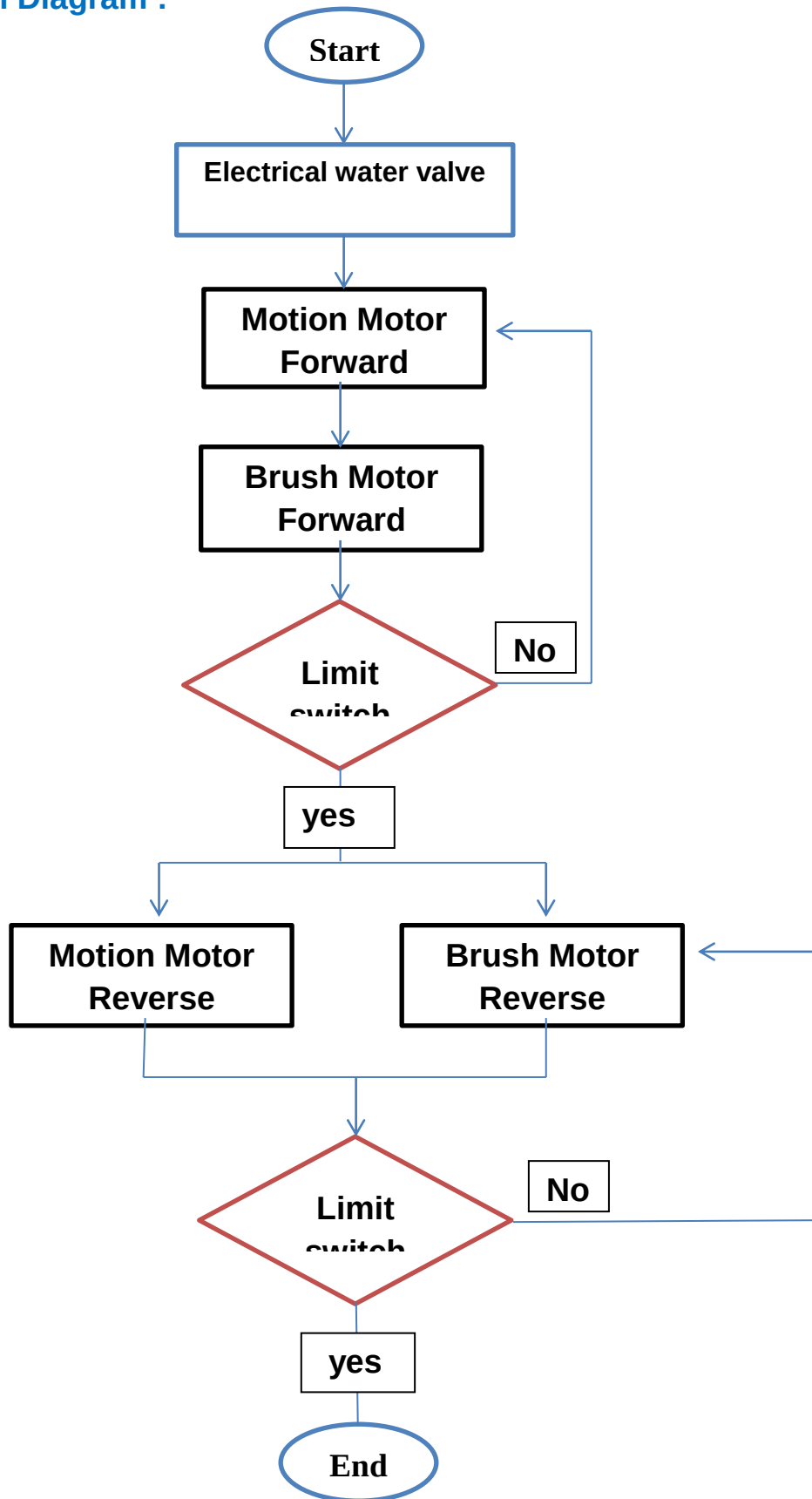


Fig. 24 : System Diagram

III.4. Arduino Code :

```
// ===== Pin Definitions =====

// Pump
#define pumpPin 6

// Stepper Motors (dir/step drivers)
#define dirPin1 2
#define stepPin1 3
#define dirPin2 4
#define stepPin2 5

// DC Motors
#define in1 8
#define in2 9
#define in3 10
#define in4 11

bool systemRunning = false;

void setup() {
    // Pump pin
    pinMode(pumpPin, OUTPUT);
    digitalWrite(pumpPin, LOW); // OFF at startup

    // Stepper pins
    pinMode(dirPin1, OUTPUT);
    pinMode(stepPin1, OUTPUT);
    pinMode(dirPin2, OUTPUT);
    pinMode(stepPin2, OUTPUT);
    digitalWrite(dirPin1, HIGH); // Motor 1 CW
    digitalWrite(dirPin2, LOW); // Motor 2 CCW

    // DC motor pins
    pinMode(in1, OUTPUT);
    pinMode(in2, OUTPUT);
    pinMode(in3, OUTPUT);
    pinMode(in4, OUTPUT);

    // Stop DC motors at startup
    digitalWrite(in1, LOW);
    digitalWrite(in2, LOW);
    digitalWrite(in3, LOW);
    digitalWrite(in4, LOW);

    // Bluetooth serial
    Serial.begin(9600);
    Serial.println("Send 'S' to START motors, 'P' to STOP them");
    Serial.println("Send 'P' to START pump, 'S' to STOP them");
}

void loop() {
    // Bluetooth command
    if (Serial.available()) {
        char command = Serial.read();
        Serial.print("Received: ");
        Serial.println(command);
    }
}
```

```

if (command == 'P') {
    systemRunning = true;
} else if (command == 'S') {
    systemRunning = false;
}
}

if (systemRunning) {
    // === Pump ON ===
    digitalWrite(pumpPin, LOW);

    // === Stepper Motors RUN ===
    digitalWrite(stepPin1, HIGH);
    digitalWrite(stepPin2, HIGH);
    delayMicroseconds(300);
    digitalWrite(stepPin1, LOW);
    digitalWrite(stepPin2, LOW);
    delayMicroseconds(300);

    // === DC Motors RUN (opposite directions) ===
    digitalWrite(in1, LOW);
    digitalWrite(in2, HIGH); // Motor A CW
    digitalWrite(in3, HIGH);
    digitalWrite(in4, LOW); // Motor B CCW
} else {
    // === Stop Everything ===
    digitalWrite(pumpPin, HIGH);

    digitalWrite(in1, LOW);
    digitalWrite(in2, LOW);
    digitalWrite(in3, LOW);
    digitalWrite(in4, LOW);
}
}

```

III.5. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons détaillé la partie logicielle du projet, en mettant l'accent sur la programmation Arduino qui assure le contrôle global du système. Le code développé permet de gérer efficacement les différents composants du robot, notamment les moteurs pas à pas pour le déplacement, les moteurs à courant continu pour l'activation des brosses, la pompe à eau, les capteurs de fin de course, ainsi que la communication via le module Bluetooth HC-05.

La structure du programme repose sur une logique séquentielle qui synchronise les étapes de nettoyage : démarrage, activation de l'arrosage, rotation des brosses, déplacement, arrêt et retour automatique. Cette automatisation permet de réduire l'intervention humaine et garantit un nettoyage régulier, homogène et sécurisé.

En résumé, la programmation Arduino constitue le noyau de fonctionnement intelligent du robot. Elle traduit les objectifs de conception en actions concrètes, fiables et optimisées. Le système est également modulable et peut être amélioré par des ajouts futurs tels qu'une interface mobile ou des capteurs environnementaux.

CHAPITRE IV

Résultat et Discussion

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les tests réalisés ainsi que l'évaluation des performances du système de nettoyage de panneaux solaires proposé. Nous exposerons ensuite les principales conclusions tirées de ce travail. De plus, une synthèse des difficultés rencontrées au cours de la mise en œuvre du projet sera fournie. Enfin, nous formulerons quelques recommandations en vue d'améliorations futures permettant d'optimiser davantage les résultats obtenus.

IV.2. Tests et évaluation :

Cas 1 : Mesures du module sans charge :

Nous avons réalisé une série de mesures simples à l'aide d'un multimètre, sans appliquer de charge au panneau. Bien que la mesure complète de la puissance d'un module solaire nécessite une charge, cette étape permet d'obtenir les valeurs de la tension en circuit ouvert (VOC) et du courant de court-circuit (ISC).

Pour les modules solaires extérieurs de grande taille, un multimètre capable de mesurer jusqu'à 10 A et 50 V est suffisant. Les mesures ont été effectuées par une journée ensoleillée, en s'assurant qu'aucune partie du panneau ne soit ombragée, car même une ombre partielle peut entraîner une perte importante de performance.

Pour mesurer la VOC, le multimètre est réglé sur une échelle de tension continue supérieure à la tension attendue du panneau. Les bornes du multimètre sont alors connectées aux sorties du panneau (positif avec positif, négatif avec négatif), et la tension est relevée.

Pour mesurer l'ISC, il est nécessaire de déconnecter d'abord le multimètre avant de changer le mode de mesure. Le multimètre est ensuite réglé sur une échelle de courant continu supérieure au courant attendu, puis connecté de la même manière aux sorties du panneau, et la valeur du courant est relevée.

Le tableau 1 présente les mesures obtenues sans charge, réalisées sur un panneau solaire poussiéreux puis après nettoyage. Bien qu'il n'y ait pas de variation significative de la tension VOC, une nette augmentation du courant ISC est observée après nettoyage.

Ce résultat constitue un premier indicateur de l'amélioration du rendement du panneau solaire, grâce au système de nettoyage proposé qui élimine la poussière accumulée.

Solar Panel	Voc (V)	Isc (A)
Not Cleaned	35.5	7.76
Cleaned	35.3	10.5

Tableau 01 : Mesures du module sans charge

Cas 2 : Mesures du module avec charge :

Cette méthode de mesure utilise une résistance variable pour simuler une charge sur le module solaire. En faisant varier la résistance appliquée, il est possible de mesurer la tension, le courant et la puissance délivrés par le panneau dans différentes conditions. Cela permet de comparer les performances du panneau avant et après le nettoyage.

À cet effet, nous avons utilisé un dispositif de charge électrique, illustré à la figure 25.



Fig. 25 : ITECH IT8511A+ [16]

La charge électronique ITECH IT8511A+ est un instrument de test de haute précision largement utilisé dans les laboratoires et les environnements industriels pour l'évaluation de sources d'énergie telles que les batteries, les alimentations à découpage, les cellules photovoltaïques et les dispositifs embarqués. Elle permet de fonctionner en modes courant constant, tension constante, puissance constante et résistance constante, avec des mesures très stables. Dans ce projet, nous avons utilisé ce dispositif pour comparer la production d'énergie entre un panneau solaire sale et un autre propre. Les mesures ont été réalisées lors d'une journée ensoleillée, autour de midi, afin d'assurer des conditions optimales. Chaque test a été répété trois fois, et les résultats ont été résumés dans le tableau 2. On observe une légère variation de la tension au point de puissance maximale avant et après nettoyage, mais une différence nette d'environ 1 A dans le courant mesuré. Cette variation a entraîné une amélioration de la puissance maximale produite, passant d'environ 13 W à 16 W pour un seul panneau solaire.

Time 1:27am				
Solar Panel	Load (Ω)	Power (W)	Voltage (V)	Current(A)
Not Cleaned	3.6	218	28	7.8
Cleaned	3.3	231	28	8.4

Time 2:40 am				
Solar Panel	Load (Ω)	Power (W)	Voltage (V)	Current(A)
Not Cleaned	3.9	209	28.6	7.3
Cleaned	3.3	225	27.3	8.3

Time 2:50 am				
Solar Panel	Load (Ω)	Power (W)	Voltage (V)	Current(A)
Not Cleaned	4	208	29	7.2
Cleaned	3.4	223	27.5	8.1

Tableau 02 : Mesures du module avec charge à différents moments de la journée

IV.3. Faisabilité économique :

À partir de calculs pratiques, nous avons estimé que le nettoyage d'un seul panneau solaire prend environ une minute. En nous basant sur cette donnée, nous avons supposé que le système serait utilisé pour nettoyer un ensemble de 60 panneaux solaires, à raison de deux nettoyages par mois.

Coût de nettoyage par une entreprise spécialisée :

- Coût par opération : $60 \text{ panneaux} \times 0,23 \text{ €} = 14 \text{ €} \times 150 \text{ Da} = 2100,00 \text{ Da}$
- Coût annuel (24 nettoyages) : $24 \times 14 \text{ €} = 336 \text{ €} \times 150 \text{ Da} = 50400,00 \text{ Da}$

Coût de nettoyage avec le système proposé :

- Coût par opération (électricité + 80 L d'eau) 60 panneaux : $0,0636 \text{ kWh} \times 0,00115 \text{ €/kWh} + 0,00802 \text{ €} \approx 0,00081 \text{ €} \times 150 \text{ Da} = 1,21 \text{ Da}$
- Coût annuel : $24 \times 0,00081 \text{ €} = 0,01944 \text{ €} \times 150 \text{ Da} = 2,916 \text{ Da}$

Économies réalisées :

- Économie par opération : $14 \text{ €} - 0,00081 \text{ €} = 13,99 \text{ €} \times 150 \text{ Da} = 2098,50 \text{ Da}$
- Économie annuelle : $336 \text{ €} - 0,01944 \text{ €} = 335,98 \text{ €} \times 150 \text{ Da} = 50250,00 \text{ Da}$

Coût total du projet : $899 \text{ €} \times 150 \text{ Da} = 134850,00 \text{ Da}$

Durée d'amortissement estimée : $899 / 335,98 = 2,67 \text{ ans}$

IV.4. Conclusion :

Dans ce projet, nous avons conçu un système automatisé de nettoyage de panneaux solaires avec un minimum d'intervention humaine. Le nettoyage est réalisé à l'aide d'une brosse rotative alimentée en eau. L'assemblage du dispositif ainsi que le mouvement de la brosse sont assurés par des moteurs à courant alternatif. L'unité de commande repose sur une carte Arduino, associée à des capteurs de fin de course, des relais, des vannes électriques, ainsi que d'autres composants électriques et électroniques.

Le système proposé a été testé et évalué en comparant les paramètres électriques (puissance maximale, tension et courant) du panneau avant et après nettoyage.

Deux méthodes de test ont été utilisées :

- La première méthode, sans charge, a permis de mesurer une amélioration notable du courant de court-circuit (ISC), ce qui indique une amélioration de l'efficacité du panneau après nettoyage.
- La seconde méthode, avec charge variable, a montré une augmentation de la puissance maximale produite, passant de 13 W à 16 W après nettoyage.

Ces résultats confirment que le nettoyage régulier améliore considérablement les performances du panneau solaire.

Enfin, l'analyse de faisabilité économique montre que le coût de nettoyage est fortement réduit avec le système proposé, rendant le projet rentable sur le long terme. Le système a rempli les objectifs attendus en matière de conception, de mécanisme et de contrôle.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire a porté sur la conception, la réalisation et l'évaluation d'un robot autonome de nettoyage de panneaux solaires. Ce projet s'inscrit dans une démarche d'optimisation des systèmes photovoltaïques, dont la performance est fortement affectée par l'accumulation de poussière et d'impuretés sur la surface des modules.

L'approche adoptée a combiné des éléments mécaniques, électroniques et programmables pour développer une solution automatisée, économique et simple d'utilisation. Grâce à une structure mobile équipée de moteurs pas à pas et à courant continu, d'une pompe à eau, d'un système de brosses rotatives et d'une carte Arduino pour le contrôle, le robot a pu effectuer des cycles de nettoyage complets de manière autonome.

Les tests expérimentaux ont mis en évidence une amélioration notable des performances électriques des panneaux après nettoyage, avec un gain de puissance allant jusqu'à 16 watts. L'analyse économique a également montré que le système proposé permet une réduction significative des coûts de maintenance, avec un retour sur investissement estimé à moins de quatre ans.

En conclusion, ce travail a permis de démontrer la faisabilité d'un robot de nettoyage autonome à la fois efficace, peu coûteux et facilement adaptable. Il constitue une base solide pour des améliorations futures telles que l'intégration de capteurs intelligents, d'un système de détection automatique de saleté, ou d'une gestion à distance via une application mobile.

ANNEXE

I. Présentation de projet :

1. Idée du projet (Solution) :

Au sud de l'Algérie, dans une région ensoleillée, un jeune entrepreneur nommé Yacine a investi dans l'énergie solaire pour alimenter sa ferme. Rapidement, il s'est rendu compte que la poussière et le sable s'accumulaient sur ses panneaux solaires, réduisant considérablement leur rendement. Nettoyer manuellement les panneaux était fastidieux, dangereux et coûteux, surtout sous le soleil brûlant du désert.

C'est dans ce contexte qu'est né le projet « HELIOCLEAN, robot autonome de nettoyage de panneaux solaires », une solution innovante destinée à répondre aux besoins croissants des exploitants solaires en Algérie.

L'idée consiste à développer un robot intelligent capable de nettoyer automatiquement les panneaux solaires, sans intervention humaine, tout en optimisant la consommation d'eau et d'énergie. Équipé de capteurs et de systèmes de navigation avancés, ce robot détecte la saleté, évite les obstacles et assure un nettoyage efficace, même sur de grandes installations.



Grâce à ce projet, la performance des installations solaires sera maximisée, la durée de vie des panneaux prolongée, et les coûts d'entretien drastiquement réduits. HELIOCLEAN permettra ainsi de soutenir la transition énergétique en Algérie, d'améliorer la rentabilité des investissements solaires et de créer de nouvelles opportunités économiques pour les jeunes entrepreneurs locaux.

Bien sûr ! Voici un exemple de valeurs proposées adaptées à ton projet de robot nettoyeur de panneaux solaires, rédigé dans le même style que l'exemple que tu as fourni :

2. Valeurs proposées :

2.1. Modernité:

Offrir une solution de nettoyage de panneaux solaires à la pointe de la technologie, intégrant l'automatisation et l'intelligence artificielle pour répondre aux besoins actuels des exploitants d'installations solaires.

2.2. Réponse à des besoins nouveaux :

Proposer un robot autonome qui élimine la contrainte du nettoyage manuel, un besoin croissant avec l'expansion des fermes solaires et la sensibilisation à l'importance du rendement énergétique.

2.3. Performance :

Garantir un nettoyage optimal et régulier grâce à des capteurs de saleté, des brosses performantes et un système de navigation intelligent, permettant de maintenir un rendement énergétique maximal des panneaux.

2.4. Adaptabilité :

Concevoir un robot capable de s'adapter à différents types et tailles de panneaux solaires, ainsi qu'aux conditions climatiques variées de l'Algérie.

2.5. Précision et rapidité d'exécution :

Assurer un nettoyage précis, rapide et uniforme sur l'ensemble de la surface des panneaux, réduisant ainsi le temps d'indisponibilité et les pertes de production.

2.6. Design:

Développer un robot compact, robuste et esthétique, facile à installer et à entretenir, tout en tenant compte des contraintes du terrain et de l'environnement.

2.7. Prix compétitif :

Proposer une solution économique, avec un coût d'acquisition et d'entretien abordable, garantissant un retour sur investissement rapide pour les exploitants.

2.8. Facilité d'accès :

Mettre à disposition le robot via des canaux de distribution variés : vente en ligne, revendeurs spécialisés en énergie solaire, et partenariats avec des installateurs locaux.

2.9. Réduction des risques :

Réduire les risques liés à la baisse de rendement causée par l'encrassement des panneaux, ainsi que les risques d'accident lors du nettoyage manuel.

2.10. Réduction des coûts :

Diminuer les coûts d'entretien et d'exploitation grâce à l'automatisation, à l'économie d'eau et à la réduction de la main-d'œuvre nécessaire.

2.11. Compatibilité :

Offrir une solution compatible avec différents modèles de panneaux et installations solaires, qu'il s'agisse de petites installations domestiques ou de grandes centrales solaires.

2.12. Facilité d'utilisation :

Concevoir une interface utilisateur intuitive, accessible à tous, permettant un contrôle simple du robot et une surveillance à distance via une application mobile ou une plateforme web.

3. Objectifs d'affaires :

Nous présentons ici les objectifs commerciaux du projet HELIOCLEAN ainsi que la part de marché cible à court, moyen et long terme.

3.1. Objectifs commerciaux :

3.1.1. Optimisation de la production d'énergie solaire :

Maximiser le rendement des installations solaires en assurant un nettoyage régulier et efficace des panneaux, permettant ainsi une production d'électricité optimale.

3.1.2. Contribution à la durabilité environnementale :

Réduire la consommation d'eau et d'énergie liée à l'entretien des panneaux grâce à une solution automatisée et économe en ressources.

3.1.3. Augmentation de la rentabilité des installations solaires :

Offrir un retour sur investissement rapide en réduisant les coûts de maintenance et en prolongeant la durée de vie des panneaux.

3.1.4. Renforcement de la compétitivité des exploitants solaires :

Proposer une technologie innovante permettant aux exploitants de se démarquer sur le marché de l'énergie renouvelable.

3.2. Part de marché :

3.2.1. À court terme :

Cibler les propriétaires de petites et moyennes installations solaires (résidentielles et agricoles), représentant environ 15 % du marché national des installations solaires en Algérie.

3.2.2. À moyen terme :

Élargir la clientèle aux grandes fermes solaires et aux entreprises du secteur énergétique, pour atteindre une part de marché de 35 % dans les cinq prochaines années.

3.2.3. À long terme :

Devenir le leader national dans le domaine du nettoyage automatisé des panneaux solaires, avec une part de marché supérieure à 50 %, et envisager une expansion vers les marchés régionaux d'Afrique du Nord.

Ces objectifs constituent la feuille de route stratégique de HELIOCLEAN pour accompagner la croissance du secteur solaire en Algérie et répondre efficacement aux besoins des exploitants en matière d'entretien et de performance énergétique.

4. Calendrier pour la réalisation du projet HELIOCLEAN :

Mois	Tâche	Details	Résultat principal
1 - 4	Préparation du lieu de travail et papiers nécessaires	- Sélection de l'emplacement approprié - Installation des infrastructures de base (électricité, eau, Internet) - Préparation des papiers nécessaires	Le site de travail ainsi que l'ensemble des documents juridiques sont intégralement préparés et en règle.
5	Acquisition des équipements.	- Identification des fournisseurs. - Achat des équipements et outils essentiels (capteurs, unités de contrôle, matériaux de construction)	Équipements et outils disponibles sur site
6	Faire un test du système et assurance de la qualité	- Test de tous les systèmes pour garantir leur bon fonctionnement - Ajustements nécessaires basés sur les résultats des tests.	Systèmes testés et fonctionnant efficacement

7	Initier la commercialisation Et la production	Le lancement de la production, la commercialisation et l'introduction sur le marché des premiers modèles	Le début de la production, de la vente et de la fourniture de nos services
8	Formation des agriculteurs et préparation à l'exploitation	- Développement de programmes de formation complets - Organisation de cours de formation pour les agriculteurs sur l'utilisation du système	Agriculteurs formés et prêts à utiliser la serre intelligente

5. Les aspects innovants :

5.1. Nature des innovations :

En analysant les spécificités du projet "HELIOCLEAN, robot nettoyeur de panneaux solaires", on constate que l'innovation s'inscrit dans plusieurs catégories, selon le contexte et la finalité recherchée. Ce projet peut être considéré comme une innovation technologique, une innovation de marché, ainsi qu'une innovation incrémentale.

5.1.1. Innovations Technologiques :

Cette innovation repose sur l'intégration de technologies avancées telles que :

- Des capteurs intelligents pour détecter le niveau de saleté, les obstacles et les bords des panneaux.
- Un système de navigation autonome permettant au robot de se déplacer efficacement sur différents types de panneaux et d'éviter les chutes.
- Des mécanismes de nettoyage optimisés (brosses rotatives, jets d'eau, microfibres) assurant un entretien efficace sans endommager les surfaces.
- Une interface de contrôle à distance via application mobile ou plateforme web, permettant la gestion, la programmation et la surveillance du robot en temps réel.

5.1.2. Innovations de Marché :

Le projet vise à répondre à de nouveaux besoins du marché de l'énergie solaire et à améliorer la rentabilité des installations :

- Optimisation du rendement énergétique, Grâce à un nettoyage régulier et automatisé, réduisant les pertes de production liées à l'encrassement.
- Accessibilité de la technologie pour les exploitants de toutes tailles, des particuliers aux grandes centrales solaires.
- Réduction des coûts d'entretien et des risques liés au nettoyage manuel, rendant la solution attractive et compétitive.

5.1.3. Innovation Incrémentale :

Le robot HELIOCLEAN représente également une innovation incrémentale :

- Amélioration progressive des solutions de nettoyage existantes, en intégrant l'automatisation, l'intelligence artificielle et l'économie de ressources.
- Renforcement de la durabilité et de la sécurité des opérations de maintenance, sans bouleverser fondamentalement les pratiques actuelles mais en les rendant plus efficaces et fiables.

Conclusion :

L'innovation portée par le projet HELIOCLEAN peut donc être classée principalement comme :

1. Innovation Technologique
2. Innovation de Marché
3. Innovation Incrémentale

Ce positionnement reflète la dimension polyvalente du projet et son impact potentiel sur le secteur de l'énergie solaire, tant sur le plan technique que commercial.

5.2. Domaines d'innovation :

Dans le cadre du projet « HELIOCLEAN », les domaines d'innovation se traduisent par l'introduction de nouveaux produits et services sur le marché de l'énergie solaire, répondant à des besoins spécifiques des exploitants et des entreprises du secteur. Voici une expansion détaillée de ces domaines :

5.2.1. Services Intelligents de Maintenance Solaire :

Offrir des solutions de nettoyage automatisé et programmé, permettant aux exploitants de garantir en continu la propreté de leurs panneaux solaires et d'optimiser la production d'énergie sans intervention manuelle.

5.2.2. Systèmes de Surveillance et de Diagnostic à Distance :

Intégrer des capteurs et des plateformes connectées pour surveiller en temps réel l'état de propreté, détecter les anomalies ou les pannes, et alerter les utilisateurs en cas de besoin d'intervention.

5.2.3. Outils de Gestion et d'Analyse de Performance :

Développer des applications ou tableaux de bord permettant de suivre l'efficacité du nettoyage, d'analyser les gains de rendement et d'optimiser la fréquence des interventions pour maximiser la rentabilité.

5.2.4. Solutions d'Automatisation pour les Installations Solaires :

Concevoir des robots autonomes capables de s'adapter à différentes tailles et configurations de panneaux, réduisant la dépendance à la main-d'œuvre et minimisant les risques liés au nettoyage manuel, tout en assurant une efficacité constante.

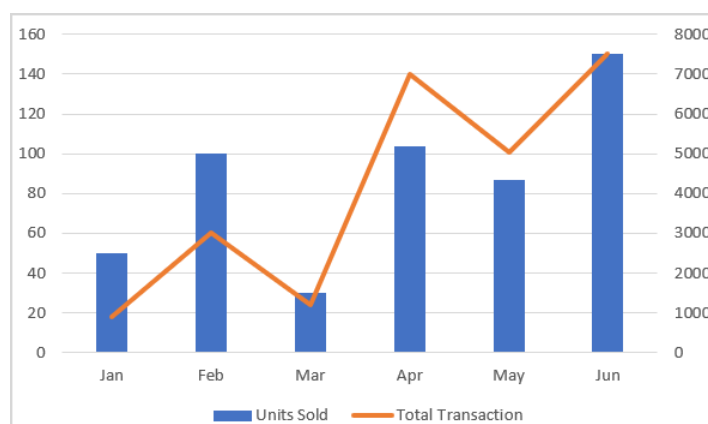
II- Analyse stratégique :

1. Marché potentiel :

1.1. Propriétaires de petites et moyennes installations solaires :

1.1.1. Nombre :

Selon les statistiques du secteur de l'énergie renouvelable, l'Algérie compte plusieurs milliers d'installations solaires individuelles, principalement dans les zones rurales et périurbaines, ainsi que sur les toits de maisons et de petites entreprises.



1.1.2. Besoins :

Accès à des solutions de nettoyage automatisé, abordables et faciles à utiliser, pour maintenir un rendement énergétique optimal sans recourir à des services de maintenance coûteux ou à des interventions manuelles risquées.

1.1.3. Potentiel :

L'amélioration de la performance des panneaux solaires chez ces utilisateurs peut contribuer à la rentabilité de leurs investissements et encourager une adoption plus large de l'énergie solaire à l'échelle nationale.

1.2. Grandes centrales et exploitations solaires :

1.2.1. Nombre :

On estime qu'il existe plus de 100 grandes fermes solaires et plusieurs centaines d'installations industrielles ou institutionnelles en Algérie, avec une croissance rapide prévue dans les prochaines années.

1.2.2. Besoins :

Technologies de nettoyage automatisé à grande échelle, capables de fonctionner de manière autonome sur de vastes surfaces, avec des systèmes de surveillance et de gestion centralisés pour optimiser la maintenance et réduire les coûts d'exploitation.

1.2.3. Potentiel :

L'optimisation du rendement énergétique et la réduction des coûts d'entretien dans ces grandes installations peuvent améliorer la compétitivité du secteur solaire algérien et favoriser l'exportation d'électricité verte.

1.3. Autres segments de marché potentiels :

1.3.1. Entreprises de maintenance et d'installation solaire :

Ces entreprises recherchent des solutions innovantes pour offrir à leurs clients un service complet et différencié.

1.3.2. Institutions de recherche et universités :

Potentiel d'intégration dans des projets pilotes, des laboratoires de recherche ou des programmes de formation en énergie renouvelable.

1.3.3. Gouvernement et collectivités locales :

Soutien potentiel à travers des subventions, des incitations fiscales ou des programmes de modernisation des infrastructures publiques (écoles, hôpitaux, bâtiments administratifs).

1.4. Marché cible :

1.4.1. Grandes et moyennes exploitations solaires :

Justifications du ciblage :

1.4.1.1. Impact significatif sur la production d'énergie :

Ces exploitations représentent une part importante de la capacité solaire installée en Algérie.

1.4.1.2. Capacité d'investissement :

Elles disposent de ressources financières et techniques permettant l'acquisition de solutions automatisées avancées.



1.4.1.3. Recherche de rentabilité et d'efficacité :

Face à la concurrence et à la nécessité d'optimiser les coûts, ces acteurs sont à la recherche de technologies innovantes pour améliorer la performance et la longévité de leurs installations.

2. Propriétaires individuels et petites installations :

2.1. Justifications du ciblage :

2.1.1. Rôle dans la démocratisation de l'énergie solaire :

Les particuliers et petits exploitants constituent la majorité des utilisateurs de panneaux solaires et sont essentiels pour la transition énergétique du pays.

2.1.2. Besoin de solutions simples et économiques :

Beaucoup manquent de moyens pour recourir à des services professionnels de maintenance, d'où l'intérêt pour une solution automatisée, fiable et abordable.

2.1.3. Amélioration du retour sur investissement :

Un nettoyage régulier et efficace permet d'augmenter la production d'énergie, de réduire les coûts d'entretien et d'améliorer la rentabilité des installations solaires domestiques.

2.2. Mesurer l'intensité de la concurrence :

2.2.1. Concurrents directs :

2.2.1.1. Entreprises locales de robots de nettoyage solaire :

Quelques startups et PME algériennes commencent à proposer des solutions automatisées de nettoyage, mais leur présence reste limitée à certaines régions ou à des projets pilotes. Leur part de marché est estimée entre 10 et 20 %, avec une croissance attendue grâce à la demande croissante en énergie solaire.

2.2.1.2. Fournisseurs internationaux de robots de nettoyage :

Des entreprises étrangères, notamment européennes et asiatiques, proposent des robots de nettoyage de panneaux solaires adaptés aux grandes installations. Ces acteurs majeurs peuvent contrôler 30 à 50 % du marché algérien, surtout dans les grands projets industriels ou institutionnels, grâce à leur expérience et à la robustesse de leurs solutions.

2.2.1.3. Prestataires de services de nettoyage manuel :

Les entreprises spécialisées dans le nettoyage manuel des panneaux solaires restent très présentes, surtout auprès des petits exploitants et des particuliers. Elles détiennent environ 30 à 40 % du marché, en raison de leur coût initial plus faible et de la simplicité de leur offre.

2.2.1.4. Utilisateurs individuels (auto-nettoyage manuel)

De nombreux propriétaires de panneaux solaires, notamment dans les zones rurales, continuent de nettoyer eux-mêmes leurs installations, ce qui représente encore 20 à 30 % du marché, mais cette part tend à diminuer avec la démocratisation des solutions automatisées.

2.2.2. Concurrence indirecte :

2.2.2.1. Entreprises d'installation et de maintenance solaire :

Certaines sociétés proposent des forfaits d'entretien incluant le nettoyage, mais sans solutions robotiques. Elles peuvent influencer le choix des clients grâce à leur relation de confiance avec les exploitants.

2.2.2.1. Innovations alternatives

Des solutions comme les revêtements anti-poussière ou les systèmes d'arrosage intégrés représentent une concurrence émergente, bien que leur efficacité soit limitée dans certaines conditions climatiques.

3. Stratégie de marketing :

3.1. Détermination du public cible :

3.1.1. Exploitants de grandes et moyennes installations solaires :

Priorité aux acteurs ayant des besoins récurrents en maintenance et une capacité d'investissement technologique.

3.1.2. Propriétaires de petites installations solaires :

Ciblage progressif des particuliers et petits exploitants à la recherche de solutions abordables et simples à utiliser.

3.1.3. Entreprises d'installation et de maintenance solaire :

Partenariats pour proposer le robot comme complément à leurs offres.

3.1.4. Institutions publiques et collectivités :

Ciblage des écoles, hôpitaux et bâtiments administratifs équipés de panneaux solaires.

3.2. Définition du message marketing :

- Maximisez le rendement de vos panneaux solaires grâce à un nettoyage automatisé, efficace et économique.
- Réduisez vos coûts d'entretien et améliorez la durabilité de vos installations solaires.
- Adoptez une solution innovante, fiable et adaptée à tous types de panneaux et d'environnements.

3.3. Identification des canaux marketing :

3.3.1. Salons et foires sur l'énergie et l'innovation :

Présence lors d'événements nationaux et internationaux pour démontrer le robot en conditions réelles.

3.3.2. Marketing digital :

Création d'un site web, référencement local (SEO), campagnes sur les réseaux sociaux et vidéos démonstratives.

3.3.3. Publicité ciblée :

Annonces dans les magazines spécialisés en énergie et agriculture, spots radio/TV régionaux.

3.3.4. Marketing direct :

Démonstrations sur site, essais gratuits, visites chez des exploitants et entreprises partenaires.

3.3.5. Partenariats :

Collaboration avec des installateurs solaires, sociétés de financement et institutions publiques.

3.4. Développement d'un mix marketing :

3.4.1. Produit :

Focus sur la fiabilité, la performance et la simplicité d'utilisation du robot.

Adaptabilité à différents types de panneaux et de sites.

Service après-vente réactif, assistance technique et formation à l'utilisation.

3.4.2. Prix :

Positionnement compétitif par rapport au nettoyage manuel et aux solutions importées.

Offres de lancement, réductions pour les premiers clients, options de financement ou de location.

3.4.3. Promotion :

- Campagnes de sensibilisation sur les pertes de rendement liées à la saleté.
- Témoignages clients et études de cas démontrant le retour sur investissement.
- Présence sur les réseaux sociaux et contenu éducatif (infographies, vidéos).

3.4.4 Distribution :

- Vente directe via site web et agents locaux.
- Partenariats avec distributeurs spécialisés et entreprises d'installation solaire.
- Options d'achat en ligne, démonstrations sur site et livraison dans tout le pays.

3.4.5. Mesure de l'efficacité de la stratégie marketing :

- Suivi des ventes, du trafic web et des demandes de démonstration.
- Analyse régulière du taux de conversion et de la satisfaction client.
- Ajustement continu des campagnes et des canaux selon les retours et les données collectées.
- Allocation budgétaire flexible pour maximiser le retour sur investissement.
- Enquêtes de satisfaction et recueil de témoignages pour améliorer l'offre et la communication.

III. Plan de production et d'organisation :

1. Processus de production :

1.1. Conception et ingénierie :

1.1.1. Phase de planification :

Définir les besoins des clients (exploitants solaires, entreprises, particuliers), les contraintes techniques (types de panneaux, conditions climatiques) et les fonctionnalités attendues (autonomie, navigation, type de nettoyage).

1.1.2. Phase de conception :

Élaborer des plans techniques 3D du robot, modéliser les composants (châssis, brosses, capteurs, batteries) et simuler les déplacements sur différents types de panneaux.

1.1.3. Phase d'ingénierie :

Sélectionner les composants électroniques (capteurs de saleté, moteurs, cartes de contrôle), concevoir les interfaces logicielles (application mobile/web pour le contrôle à distance), et définir les protocoles de communication entre les modules.

1.2. Fabrication et assemblage :

1.2.1. Phase d'approvisionnement :

Achat des matières premières (aluminium, plastiques techniques), moteurs, batteries, capteurs, modules électroniques et kits de nettoyage auprès de fournisseurs fiables.

1.2.2. Phase de fabrication :

Fabrication des pièces mécaniques (châssis, supports moteurs, bras de brosses) selon les spécifications techniques.

1.2.3. Phase d'assemblage :

Assemblage du robot, intégration des composants électroniques, installation des capteurs et du système de nettoyage, câblage et programmation initiale.

1.3. Test et validation :

1.3.1. Phase de test :

Vérification du fonctionnement de chaque composant (moteurs, capteurs, navigation, nettoyage), tests d'autonomie et de sécurité (détection des bords, obstacles).

1.3.1. Phase de validation :

Étalonnage des capteurs, ajustement des algorithmes de navigation, validation de la performance de nettoyage sur différents types de panneaux solaires et dans différentes conditions environnementales.

2. Gestion de la qualité :

2.1. Système de gestion de la qualité :

Mise en place d'un système qualité inspiré de la norme ISO 9001 pour garantir la fiabilité et la performance du robot.

2.2. Inspection et contrôle :

Contrôles qualité à chaque étape (réception des composants, assemblage, tests finaux) pour assurer la conformité aux spécifications.

2.3. Amélioration continue :

Collecte des retours clients, analyse des pannes et mise à jour régulière des processus de production et des logiciels embarqués.

3. Gestion de la chaîne d'approvisionnement :

3.1. Sélection des fournisseurs :

Choix de fournisseurs algériens et internationaux réputés pour la qualité de leurs composants (moteurs, batteries, capteurs, modules électroniques) et leur capacité à livrer dans les délais.

3.2. Gestion des stocks :

Maintien de stocks optimisés de pièces détachées et composants critiques pour répondre rapidement à la demande et aux besoins de maintenance.

3.3. Suivi et contrôle :

Suivi informatisé des flux de matières premières et de composants, traçabilité des lots pour garantir la transparence et la réactivité.

4. Gestion des opérations :

4.1. Planification de la production :

Organisation de la fabrication en fonction des commandes, des prévisions de ventes et des capacités de production.

4.2. Ordonnancement :

Planification détaillée des tâches d'assemblage et de test, allocation efficace des ressources humaines et matérielles.

4.3. Surveillance et contrôle :

Suivi en temps réel de la production, détection rapide des anomalies et mise en place d'actions correctives.

5. Gestion des ressources humaines

5.1. Recrutement et formation :

Recrutement de techniciens qualifiés en électronique, mécanique et informatique ; formation continue sur les nouvelles technologies et les procédures qualité.

5.2. Motivation et rémunération :

Mise en place d'une politique de rémunération attractive et de primes à la performance pour fidéliser les talents.

5.3. Développement professionnel :

Accès à des formations spécialisées et à des opportunités d'évolution interne pour encourager l'innovation et l'engagement des équipes.

5.4. Offre (exemple de fournisseurs pour HELIOCLEAN) :

5.4.1. Critères de choix des fournisseurs :

Favoriser les fournisseurs locaux pour soutenir l'économie nationale et réduire les coûts logistiques.

Sélectionner des partenaires reconnus pour la qualité, la fiabilité et leur expertise dans le domaine de la robotique et de l'énergie solaire.

Composant	Fournisseur (exemple)	Justification
Châssis aluminium	Metal Algérie (Alger, Algérie)	Spécialiste des profilés aluminium pour l'industrie et la robotique.
Moteurs et actionneurs	ElectroMeca Algérie (Alger, Algérie)	Large gamme de moteurs électriques et de réducteurs adaptés aux robots mobiles.
Capteurs (saleté, proximité)	SensoTech Algérie (Alger, Algérie)	Capteurs de haute précision pour l'industrie et l'énergie.
Batteries lithium	Batteco Algérie (Alger, Algérie)	Fournisseur reconnu pour la qualité et la sécurité des batteries rechargeables.
Modules électroniques	Electronix Algérie (Alger, Algérie)	Composants électroniques et cartes de contrôle pour l'automatisation.
Système de nettoyage (brosses)	TechClean Algérie (Alger, Algérie)	Solutions de brosses industrielles adaptées au nettoyage délicat des panneaux solaires.
Application mobile/web	Développement interne ou sous-traitance locale	Pour garantir l'adaptabilité et la sécurité des données utilisateurs.

IV- La main d'œuvre :

1. Rôle Technique :

1.1. Ingénieurs en Génie Mécanique/Électrique :

Responsables de la conception du robot, du choix des moteurs, de la structure mécanique, de l'intégration des batteries et des systèmes de nettoyage automatisés.

1.2. Ingénieurs en Électronique/Robotique :

Chargés du développement des cartes électroniques, de l'intégration des capteurs (proximité, saleté, température), et de la programmation des microcontrôleurs

1.3. Techniciens en Installation et Maintenance :

Interviennent pour l'installation du robot chez les clients, assurent la maintenance préventive et corrective, et forment les utilisateurs à l'utilisation du système.

1.4. Spécialistes en Automatisation et Contrôle :

Développent et optimisent les algorithmes de navigation autonome, les interfaces de contrôle à distance (application mobile/web) et les systèmes de sécurité du robot.

1.5. Spécialistes en Capteurs et Instrumentation :

Sélectionnent, intègrent et testent les capteurs nécessaires à la détection des obstacles, des bords de panneaux et à l'évaluation de l'efficacité du nettoyage.

2. Rôle Commercial et Marketing :

2.1. Responsable Commercial :

Développe la stratégie commerciale, prospecte de nouveaux clients (exploitants solaires, entreprises, institutions) et gère les relations clients.

2.2. Chef de Produit :

Supervise le cycle de vie du robot, définit ses fonctionnalités, positionne le produit sur le marché et coordonne l'évolution des versions.

2.3. Spécialiste en Marketing et Communication :

Gère la promotion de HELIOCLEAN, crée du contenu marketing (brochures, vidéos, réseaux sociaux) et organise des démonstrations et salons professionnels.

3. Rôle Support et Administration :

3.1. Administrateur Système et Réseaux :

Gère l'infrastructure informatique, la cyber-sécurité des applications et la protection des données clients.

3.2. Responsable Logistique :

Supervise la gestion des stocks, l'approvisionnement en composants, la planification des livraisons et la coordination avec les fournisseurs.

3.3. Assistant de Gestion :

Prend en charge les tâches administratives, la gestion des dossiers clients et fournisseurs, et le suivi des commandes.

4. Opportunités complémentaires :

4.1. Stages en Ingénierie/Robotique/Informatique :

Accueil d'étudiants pour des projets pratiques en développement robotique, automatisation ou développement d'applications mobiles.

4.2. Freelances et consultants :

Recours à des experts externes pour des missions spécifiques (design industriel, développement logiciel, création de contenu marketing, etc.).

L'effectif de HELIOCLEAN évoluera en fonction du développement de l'entreprise, du volume de production et de l'expansion sur de nouveaux marchés.

V- Analyse stratégique :

1-Coûts et charges :

Rubrique	Coût (DZD)	Remarques
Coûts initiaux (investissements)		
- Développement prototype robot	25000,00	Conception, prototypage, tests (châssis, moteurs)
- Achat de composants électroniques	21350,00	Capteurs, batteries, cartes de contrôle, modules de communication
- Outils et équipements d'atelier	5000,000	Outils de fabrication, bancs de test, matériel de sécurité
Total	51350,00	
Coûts opérationnels (courants)		
- Énergie (tests, recharge robots)	2000,00/mois	Électricité pour l'atelier et la recharge des batteries
- Maintenance et pièces detaches	20000,00/mois	Remplacement de pièces, entretien des robots
- Fournitures et consommables	5000,00/mois	Lubrifiants, brosses, produits de nettoyage
Total mensuel	27000,00	
Coûts administratifs		
- Salaires techniciens et ingénieurs	100000,00/mois	Équipe technique et R&D
- Salaires administration	60000,00/mois	Gestion, secrétariat, comptabilité
- Location atelier/bureau	100000,00/mois	Local de production et bureaux
Total mensuel	260000,00	
Coûts marketing		
- Campagnes marketing digital	50000,00/mois	Réseaux sociaux, site web, vidéos promotionnelles
- Promotion et salons professionnels	30000,00/mois	Participation à salons, démonstrations, documentation
Total mensuel	80000,00	

VI- Business model canvas

Partenaires clés	Activités clés	Valeur proposée	Relation avec la Clientèle	Segments de Clientèle
- Fournisseurs de composants électroniques (capteurs, moteurs, batteries) - Fournisseurs de matériaux pour châssis et brosses de nettoyage - Distributeurs et revendeurs de solutions solaires - Partenaires technologiques pour le développement logiciel et applications mobiles	- Conception et développement du robot nettoyeur - Fabrication et assemblage des robots. - Maintenance et support technique - Développement et mise à jour des logiciels de contrôle et applications - Commercialisation et distribution	- Nettoyage automatisé et efficace des panneaux solaires - Optimisation du rendement énergétique des installations solaires - Réduction des coûts et des risques liés au nettoyage manuel - Solution adaptable à différentes tailles et types de panneaux	- Support technique personnalisé - Service client - Formation à l'utilisation du robot - Service client réactif	- Propriétaires de petites et moyennes installations solaires - Exploitants de grandes fermes solaires - Entreprises d'installation et de maintenance solaire
	Ressources clés - Serres équipées de systèmes de surveillance et de contrôle - Technologies de capteurs et de contrôle - Personnel qualifié pour la gestion des cultures et du système		Canaux - Vente directe aux agriculteurs. - Vente aux marchés locaux et nationaux - Plateformes en ligne pour la vente directe aux consommateurs	
Structure de coûts - Coûts initiaux de développement et fabrication des robots - Coûts opérationnels liés à la production, maintenance et support - Dépenses marketing et commerciales - Salaires du personnel technique et administratif		Source de revenue - Vente des robots nettoyeurs - Ventes de pièces détachées et accessoires - Abonnements pour services de maintenance et mises à jour logicielles - Services de formation et support technique		

Références

Références

- [1] International Energy Agency (IEA). Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy, 2014. Disponible sur: <https://www.iea.org>
- [2] Quaschnig, Volker (2016). Understanding Renewable Energy Systems. Routledge.
- [3] Sarver, T., Al-Qaraghuli, A., & Kazmerski, L. L. (2013). A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 698–733.
- [4] Kazem, H. A., Chaichan, M. T., & Al-Waeli, A. H. A. (2019). Dust effect on photovoltaic utilization in Iraq: Review article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 100, 349–363.
- [5] Surajit, S., Rajesh, R., & Abhishek, D. (2018). A review on cleaning mechanism of solar photovoltaic panels. *Energy Reports*, 4, 701–712.
- [6] Grando, L. D., Zilles, R., & Reinehr, S. (2017). *Cleaning photovoltaic panels: A review of available technologies and their impacts on the performance of PV systems*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3306–3312.
- [7] Garuda Aerospace. (2022). *Surya: India's first solar panel cleaning drone*. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.garudaaerospace.com>
- [8] SolarCleanso. (2024). *SolarCleanso F1: Autonomous solar panel cleaning robot*. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.solarcleanso.com>
- [9] Ecoppia. (2023). Ecoppia E4 – Water-Free Robotic Cleaning Solution. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.ecoppia.com>
- [10] <https://www.researchgate.net/publication/357882037/figure/fig6/AS:1113228566376450@1642425781392/Close-view-of-Ecoppia-E4-9.jpg>
- [11] Le Surya Drone, conçu par Garuda Aerospace, est un drone autonome dédié au nettoyage des panneaux solaires (Garuda Aerospace, 2022).
- [12] <https://pbs.twimg.com/media/F2sczv9aUAALYwH.jpg>
- [13] SolarCleanso. (2024). SolarCleanso F1 - Robot de nettoyage de panneaux solaires. Disponible sur: <https://solarcleanso.com/en/solarcleanso-f1/>
- [14] <https://solarcleanso.com/files/products/Website-pics.jpg>
- [15] Arduino, Arduino Uno Rev3 — Datasheet and Technical Information, Arduino Official Website, 2023. [En ligne].
- Disponible: <https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno> (consulté le 1er juin 2025).

[16] ITECH Electronics. (n.d.). IT8500+ Series – Programmable DC Electronic Load. [Fiche technique]. Disponible sur : <https://www.itechate.com/en/product/IT8500.html>

