

Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique



Université de Ghardaïa



Faculté des Sciences et Technologies  
Département de Automatique et électromécanique

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

## MASTER

**Domaine :** Sciences et Technologies

**Filière :** Automatique

**Spécialité :** automatique et système

**Par :** BITOUR NABILA  
AL SID CHIKH MAROUA

## Thème

**Conceptions d'un Robot Pour le Nettoyage des Panneaux  
Photovoltaïques**

Soutenu publiquement le : ..../...../2024

Devant le jury :

.....NOM.....	.....grade.....	Univ. Ghardaïa	<b>Président</b>
.....NOM.....	.....grade.....	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
.....NOM.....	.....grade.....	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
MOSBAH CHARAF ABDELKRIM	.....MCB.....	Univ. Ghardaïa	<b>Encadreur</b>

# *Remerciement*

On remercie dieu le tout puissant de nous avoir donné la santé et la  
volonté d'entamer et de terminer ce projet.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le  
jour sans l'aide et l'encadrement de Mr MOSBAH CHARAF ABD EL  
KARIM on le remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel,  
pour son aide pratique et son soutien moral, pour sa patience, sa rigueur  
et sa disponibilité durant notre préparation de ce projet.

Comme je souhaite aussi manifester ma reconnaissance à toutes les  
personnes qui, de près ou de loin, m'ont encouragées et aidées à achever  
ce travail.

# *Décidás*

*À mes chers parents, je vous dédie ces mots sincères, pour vous remercier*

*de vous présence, de votre lumière, chaque jour,*

*Vos encouragements illuminent ma vie, réchauffent mon cœur*

*Dans le moment de doute, de peine ou de joie, vous êtes là, fidèles*

*compagnons sur ma voie vos mots doux vos gestes de soutien*

*inconditionnel, m'inspirent, me motivent, me rendent plus forte, plus*

*fidèle, vos partages, vos gestes généreux, je trouve de confort, de la joie, du*

*bonheur précieux, merci du fond du cœur pour votre soutien.*

تُعد الطاقات المتجددة، مثل الطاقة الشمسية، أحد الحلول الأساسية لمواجهة التحديات البيئية وتلبية احتياجات العالم المتزايدة من الطاقة. وتلعب الألواح الشمسية دورًا مهمًا في توليد الكهرباء من الطاقة الشمسية، ولكن للحفاظ على كفاءتها وتحقيق أقصى قدر من إنتاج الطاقة، يجب أن تظل نظيفة وخالية من الأوساخ والغبار والأوراق والفطريات وغيرها من العوائق التي يمكن أن تقلل من قدرتها على امتصاص أشعة الشمس.

لتحقيق ذلك، تمت صناعة نموذج أولي وهو روبوت لتنظيف الألواح الشمسية بشكل أوتوماتيكي. يقوم الروبوت بالتحرك على سطح الألواح وإزالة الأتربة والملوثات باستخدام تقنيات مختلفة، تشمل تصميم الهيكل الخارجي مع توفير مزايا لبعض الظروف الحتمية بعد مروره بمختلف التجارب لضمان فعاليته يتضمن العمل تقييمًا أوليًا وتوصيات لتحسين التصميم ومناقشة التطبيقات المستقبلية. يساعد هذا الابتكار في تقليل تكلفة الصيانة اليدوية ويزيد من كفاءة الألواح، مما يعزز من أداء الأنظمة الشمسية ويطيل عمرها الافتراضي، وبالتالي يُسهم في تحقيق أهداف الطاقات المتجددة لتوفير طاقة نظيفة ومستدامة.

**الكلمات المفتاحية:** روبوت تنظيف، ألواح شمسية، طاقة متجددة، طاقة شمسية.

## Abstract

Renewable energies, such as solar energy, are one of the key solutions to address environmental challenges and meet the world's growing energy needs. Solar panels play an important role in generating electricity from solar energy, but to maintain their efficiency and maximize energy production, they must be kept clean and free of dirt, dust, leaves, fungus and other obstacles that can reduce their ability to absorb sunlight.

To accomplish this, a prototype robot has been created to automatically clean solar panels. The robot moves on the surface of the panels and removes dust and contaminants using different techniques, including the design of the exoskeleton while providing advantages for some inevitable conditions after going through various experiments to ensure its effectiveness. The work includes a preliminary evaluation and recommendations to improve the design and discuss future applications. This innovation helps reduce the cost of manual maintenance and increases the efficiency of the panels, which enhances the performance of solar systems and extends their lifespan, thus contributing to the achievement of renewable energy goals to provide clean and sustainable energy.

**Keywords:** Cleaning robot, solar panels, automation, renewable energy, Solar energy.

## Résumé

Les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire, constituent l'une des principales solutions pour relever les défis environnementaux et répondre aux besoins énergétiques croissants de la planète. Les panneaux solaires jouent un rôle important dans la production d'électricité à partir de l'énergie solaire, mais pour maintenir leur efficacité et maximiser la production d'énergie, ils doivent être maintenus propres et exempts de saleté, de poussière, de feuilles, de champignons et d'autres obstacles qui peuvent réduire leur capacité à absorber la lumière du soleil.

Pour y parvenir, un prototype de robot a été créé pour nettoyer automatiquement les panneaux solaires. Le robot se déplace sur la surface des panneaux et enlève la poussière et les contaminants en utilisant différentes techniques, y compris la conception de l'exosquelette tout en offrant des avantages pour certaines conditions inévitables après avoir passé par diverses expériences pour assurer son efficacité. Le travail comprend une évaluation préliminaire et des recommandations pour améliorer la conception et discuter des applications futures. Cette innovation permet de réduire le coût de la maintenance manuelle et d'augmenter l'efficacité des panneaux, ce qui améliore les performances des systèmes solaires et prolonge leur durée de vie, contribuant ainsi à la réalisation des objectifs en matière d'énergies renouvelables afin de fournir une énergie propre et durable.

**Mots-clés :** Robot de nettoyage, panneaux solaires, énergie renouvelable, Énergie solaire.

---

Remerciement.....	
Décidas .....	
Résumé .....	I
Sommaire .....	II
Liste de figure.....	IV
Introduction général .....	1
Chapitre : 1 <u>Contexte global du nettoyage des panneaux photovoltaïques</u> .....	
I. 1. Introduction .....	3
I. 2. Importance des panneaux photovoltaïques .....	4
I. 2. 1. Rôle crucial des panneaux photovoltaïques dans la production d'énergie solaire ...	4
I. 2. 1. 1. Conversion directe .....	5
I. 2. 1. 2. Source d'énergie propre et renouvelable .....	5
I. 2. 1. 3. Polyvalence d'installation .....	6
I. 2. 1. 4. Réduction des coûts à long terme .....	6
I. 2. 1. 5. Indépendance énergétique.....	6
I. 2. 1. 6. Durabilité environnementale.....	7
I. 2. 2. Efficacité énergétique dans le contexte des systèmes photovoltaïques.....	7
I. 2. 2. 1. Qualité des cellules solaires .....	8
I. 2. 2. 2. Conception du système .....	8
I. 2. 2. 3. Conditions environnementales.....	9
I. 2. 2. 4. Orientation et inclinaison des panneaux .....	9
I. 3. Défis du nettoyage des panneaux photovoltaïques .....	9
I. 3. 1. Nécessité de maintenir la surface des panneaux propre pour garantir leur performance optimale .....	10
I. 3. 1. 1. Augmentation de l'efficacité énergétique.....	10
I. 3. 1. 2. Maximisation du rendement .....	10
I. 3. 1. 3. Prolongation de la durée de vie.....	11
I. 3. 1. 4. Réduction des coûts de maintenance .....	11
I. 3. 1. 5. Amélioration du retour sur investissement .....	11
I. 3. 2. Facteurs environnementaux et types de saletés pouvant compromettre l'efficacité des panneaux.....	12
I. 3. 2. 1. Poussière et particules fines .....	12
I. 3. 2. 2. Débris végétaux .....	12
I. 3. 2. 3. Fientes d'oiseaux et insectes .....	13

I. 3. 2. 4. Pollution atmosphérique .....	13
I. 3. 2. 5. Dépôts de sel et de minéraux .....	13
I. 3. 2. 6. Dépôts de graisse ou d'huile.....	13
I. 3. 2. 7. Dépôts de poussière de pollen.....	13
I.4.Stratégies et technologies pour le nettoyage des panneaux photovoltaïques .....	14
I. 4. 1. Méthodes traditionnelles de nettoyage .....	14
I. 4. 1. 1. Nettoyage manuel .....	14
I. 4. 1. 2. Systèmes de lavage à haute pression .....	14
I. 4. 2. Innovations dans le nettoyage automatisé .....	15
I. 4. 2. 1. Robots de nettoyage .....	15
I. 4. 2. 2. Technologies de nettoyage sans eau .....	15
I. 5. Impact environnemental et durabilité.....	16
I. 5. 1. Minimisation de l'utilisation de l'eau .....	16
I. 5. 1. 1. Recyclage de l'eau de nettoyage .....	16
I. 5. 1. 2. Utilisation de brosses à faible consommation d'eau .....	16
I. 5. 1. 3. Technologies de nettoyage à base de vapeur .....	16
I. 5. 2. Utilisation de produits de nettoyage écologiques .....	17
I. 5. 2. 1. Produits biodégradables .....	17
I. 5. 2. 2. Nettoyage à base de vinaigre .....	17
I. 5. 2. 3. Utilisation de solutions enzymatiques .....	17
I. 6. Importance de la maintenance préventive .....	17
I. 6. 1. Inspection régulière .....	18
I. 6. 1. 1. Détection précoce des problèmes.....	18
I. 6. 1. 2. Analyse de performance .....	18
I. 6. 2. Planification de l'entretien .....	18
I. 6. 2. 1. Calendrier d'entretien .....	18
I. 6. 2. 2. Réparation proactive .....	19
I. 7. Conclusion .....	<b>18</b>
Chapitre 2 : <u>Problématique et solutions proposées dans le contexte du self-nettoyage</u> .....	
II. 1. Introduction.....	20
II. 2. Problématique de recherche .....	20
II. 2.1. Formulation précise de la question de recherche .....	20

---

II. 2.2. Objectifs du travail .....	20
II. 3. Etude des solutions existantes.....	21
II.3.1. Analyse des approches de self-nettoyage utilisées dans l'autres industries ou applications similaires .....	21
II.3.1.1. Matériaux hydrophobes phototalysés .....	21
II.3.1.2. Nanotechnologies et surfaces superhydrophobes .....	22
II.3.1. 3. Dispositifs de nettoyage automatisé .....	22
II.3.1.4. Equipements de nettoyage à ultrasons .....	23
II. 3. 2. Examen des technologies émergentes ou des concepts innovants pour le self-nettoyage des panneaux photovoltaïques.....	23
II.3.2.1 Revêtements à la fois autolavant et nanomatériaux de pointe .....	23
II.3.2.2. Compositions électrodynamiques .....	23
II.3.2.3 Technologies à base de vibrations et ondes sonores .....	24
II.3.2.4. Systèmes à base de robots autonomes .....	24
II. 4. Proposition de solution : conception et design du robot nettoyeur.....	24
II. 4. 1. Description du concept du robot nettoyeur de dispositifs photovoltaïques .....	25
II. 4. 1. 1. Mécanisme de fonctionnement des robots de nettoyage des panneaux solaires .....	25
II. 4. 1. 2. Technologies intégrées et conceptions .....	25
II. 4. 1. 3. Avantages des robots nettoyeurs .....	26
II. 4. 1. 4. Exemples de robots nettoyeurs existants .....	26
II. 4. 2. Justification des choix de conception et de technologie .....	27
II. 4. 2. 1. Utilisation de capteurs et de caméras pour la navigation et la détection des saletés .....	27
II. 4. 2. 2. Incorporation d'algorithmes d'intelligence artificielle (AI) pour l'optimisation des parcours et la gestion énergétique .....	27
II. 4. 2. 3. Sélection des moyens de déplacement adaptés aux diverses installations de panneaux solaires .....	28
II. 4. 2. 4. Mise en place de système de nettoyage qui ne nécessitent pas d'eau ou à faible drainage .....	28
II. 4. 2. 5. Alimentation par panneaux solaires et batterie rechargeable pour une autonomie prolongée .....	28
II. 4. 2. 6. Adoption de matériaux à long terme et résistants à la corrosion .....	28
II. 4. 2. 7. Utilisation de robots modulaires afin de favoriser la souplesse et l'adaptation .....	29



---

II. 5. Méthodologie de développement et d'évaluation.....	29
II. 5. 1. Planification des étapes de développement du robot nettoyeur .....	29
II. 5. 2. Methodes d'évaluation de l'efficacité et de la performance du robot nettoyeur de panneaux photovoltaïque .....	32
II. 5. 2. 1. Evaluation de l'efficacité de nettoyage .....	33
II. 5. 2. 2. Evaluation des performances de navigation et d'autonomie .....	33
II. 5. 2. 3. Test de durabilité et résistance des composants .....	34
II. 5. 2. 4. Analyse de L'impact environnemental et de la consommation de ressources .....	34
II. 5. 2. 5. Evaluation de la facilité et d'utilisation et de l'entretien.....	35
35	
II. 6. Conclusion.....	36
Chapitre 3 : Conception mécanique et planification de la trajectoire du robot cleaner .....	
III. 1. Introduction .....	39
III. 2. Le Glissement.....	39
III. 2. 1. Sans forces de frottement.....	40
III. 2. 2. Avec forces de frottement.....	41
III. 3. Le Basculement .....	42
III. 4. Optimisation du Mouvement des Robots à Quatre Roues.....	44
III. 4. 1. Problème d'Inégalité de Vitesse des Roues.....	45
III. 4. 2. Simulation dans MATLAB.....	46
III. 4. 2. 1. Les composants du circuit .....	46
III. 4. 2. 2. Equations .....	47
III. 4. 3. Analyser les résultats de la simulation.....	49
III. 4. 3. 1. Évolution du courant de l'induit d'un Moteur DC sous Différentes Charges .....	49
III. 4. 3. 2. Évolution du courant d'excitation d'un Moteur DC sous Différentes Charges .....	50
III. 4. 3. 3. Évolution du courant du couple électrique d'un Moteur DC sous Différentes Charges.....	50
III. 4. 3. 4. Discussion .....	50
III. 4. 4. La solution .....	48
III. 4. 4. 1. Gyroscope MPU6050.....	51
III. 4. 4. 2. Importance du MPU6050 .....	52

III. 4. 4. 3. Discussions.....	52
III. 5. Choix de la Trajectoire Idéale pour les Robots de Nettoyage des Panneaux Solaires .....	52
III. 5. 1. Analyse des différents chemins empruntés par un robot pour nettoyer les panneaux solaires .....	52
III. 5. 1. 1. Balayage d'une ligne en spirale .....	52
III. 5. 1. 2. Balayage de la ligne verticale.....	53
III. 5. 1. 3. Balayage de la ligne horizontale .....	54
III. 5. 1. 4. Diffusion cellulaire spéciale.....	55
III. 5. 2. Analyse des résultats et stratégies de planification des itinéraires .....	56
III. 5. 2. 1. Comparaison entre la voie verticale et la voie horizontale .....	57
III. 5. 2. 2. Comparaison entre la trajectoire en spirale et l'épandage cellulaire .....	57
III. 5. 2. 3. Le meilleur résultat pour la piste de nettoyage des panneaux solaires.....	57
III. 6. Conclusion.....	58
Chapitre 4 : Architecture Electronique et Programmation du robot .....	
IV. Introduction .....	61
IV. 1. Arduino Mega 2560 Rev3 .....	62
IV. 1. 1. Définition.....	62
IV. 1. 2. Caractéristiques de l'Arduino méga 2560.....	62
IV. 2. Motor driver L293D .....	63
IV. 2. 1. Définition.....	63
IV. 2. 2. Caractéristiques de l'armure d'opérateur L293D pour Arduino.....	64
IV. 2. 3. Branchement motor driver L293D Arduino Uno .....	64
IV. 2. 4. commander des servomoteurs et par le driver L293D.....	65
IV. 2. 5. Connection et câblage des moteurs DC .....	65
IV. 3. Moteur DC 5V.....	66
IV. 3. 1. Description des moteurs a courant continue.....	61
IV. 3. 2. Caractéristiques.....	67
IV. 4. Description de Servo_moteur .....	67
IV. 4. 1. Connection servomoteur à l'Arduino .....	69
IV. 5. Module encodeur optique capteur de vitesse FC-03 .....	69
IV. 5. 1. Caractéristiques principales .....	70
IV. 5. 2. brancher capteur de vitesse FC-03.....	70
IV. 6. Relais.....	72

---

IV. 7. Pompe à eau .....	74
IV. 7. 1. Montage de la carte Arduino avec la pompe à eau .....	75
IV. 8. MPU6050 Module.....	76
IV. 8. 1. Gyroscope à trois axes .....	77
IV. 8. 2. MPU6050 Pin Description.....	78
IV. 9. Roues mécaniques multidirectionnelles .....	80
IV. 9. 1. Algorithme de control.....	81
IV .10. Conclusions.....	81
Conclusion général.....	<b>77</b>
Référence.....	78

# Liste

---

Figure I. 1	Schéma de principe de la conversion photoélectrique
Figure I. 2	L'énergie solaire
Figure I. 3	L'installation de modules solaire
Figure I. 4	Nettoyer les abords des Panneaux solaires
Figure I. 5	L'efficacité et la qualité des cellules solaires
Figure I. 6	La conception optimisée des systèmes solaires
Figure I. 7	L'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires par rapport au soleil
Figure I. 8	Les panneaux obstrués par la saleté ou la poussière
Figure I. 9	L'exemple de la corrosion des panneaux photovoltaïques
Figure I. 10	Exemples de salissures
Figure I. 11	Le nettoyage des panneaux solaires manuellement
Figure I. 12	Système de nettoyage robotique
Figure I. 13	Recyclage de l'eau de nettoyage
Figure I. 14	Activités de la maintenance
Figure II. 1	Les automates de nettoyage des poussières
Figure II. 2	Un petit robot mobile pour nettoyer les panneaux solaires photovoltaïque
Figure III. 1	Mouvement du robot sur une surface inclinée sans forces de frottement
Figure III. 2	Mouvement du robot sur une surface inclinée sans forces de frottement
Figure III. 3	Les dimensions du robot en cas de basculement
Figure III. 4	Représentation des forces sur un robot en cas de basculement
Figure III. 5	Montage moteur DC
Figure III. 6	Courant d'induit $i_a$ (A).
Figure III. 7	Courant d'excitation (if) A
Figure III. 8	Couple électrique $T_e$ (n m)
Figure III. 9	MPU6050 Gyroscope
Figure III. 10	Balayage d'une ligne en spirale
Figure III. 11	Balayage de la ligne verticale
Figure III. 12	Balayage de la ligne horizontale
Figure III. 13	Diffusion cellulaire spéciale.
Figure VI. 1	Montage du robot.
Figure IV. 2	Module Arduino Méga.
Figure IV. 3	Module motor driver
Figure IV. 4	Montage deux servomoteurs et le Shield L293D

# Liste

---

Figure IV. 5	Module Moteur DC 5V
Figure IV. 6	Un servomoteur
Figure IV. 7	Les détaille du servo_motor
Figure IV. 8	Montage servomoteur avec Arduino
Figure IV. 9	Module encodeur FC-03
Figure IV. 10	Brancher capteur de vitesse FC-03
Figure IV. 11	FC-03 branchement Avec A0
Figure IV. 12	FC-03 branchement Avec D0
Figure IV. 13	Relay Connections
Figure IV. 14	Terminal Block Pin Assignments
Figure IV. 15	Affectation des broches de l'entête mâle
Figure IV. 16	Mini Pompe d'eau
Figure IV. 17	Montage pompe d'eau
Figure IV. 18	MPU6050 module
Figure IV. 19	Axes de tangage et de roulis du gyroscope
Figure IV. 20	MPU6050 Pin out
Figure IV. 21	Montage MPU6050 avec Arduino
Figure IV. 22	Roues mécaniques multidirectionnelles
Figure IV. 23	Les mouvements du robot

# **Introduction générale**

# Introduction général

---

Les panneaux solaires sont un moyen efficace de convertir la lumière du soleil en énergie électrique utilisable et sont donc généralement installés sur des toits inclinés à un angle compris entre 15° et 45°, en fonction de la latitude et du niveau d'exposition à la lumière du soleil tout au long de l'année. Ces panneaux sont conçus pour être orientés vers le sud dans l'hémisphère nord, ou vers le nord dans l'hémisphère sud, afin de maximiser l'utilisation de la lumière du soleil. Au fur et à mesure que la technologie évolue, de nouveaux défis et de nouvelles opportunités apparaissent, comme la conception de robots capables de manipuler des surfaces inclinées, car ces conditions peuvent entraîner une perte d'équilibre, un glissement ou un basculement. Pour relever ces défis, il faut des solutions innovantes qui garantissent l'efficacité et la stabilité des robots lorsqu'ils travaillent sur des surfaces inclinées [1].

Le nettoyage régulier des panneaux solaires est un élément essentiel de leur entretien et de leur fonctionnement. Les panneaux captent la lumière du soleil et la convertissent en électricité grâce à des cellules solaires intégrées, mais au fil du temps, la saleté et les débris peuvent s'accumuler sur leur surface, réduisant ainsi leur efficacité à absorber la lumière. L'accumulation de poussière et d'impuretés crée une couche isolante qui empêche la lumière d'atteindre les cellules solaires, ce qui réduit l'efficacité de la conversion énergétique et donc la production d'électricité. Les panneaux solaires encrassés peuvent perdre jusqu'à 20 % de leur efficacité, ce qui a un impact significatif sur le rendement à long terme. En outre, l'accumulation permanente de saletés peut entraîner des dommages à long terme tels que la surchauffe des panneaux et la corrosion de leurs cellules solaires. Un nettoyage régulier est essentiel pour maintenir leur efficacité et garantir une production d'énergie maximale [1-7].

La planification du nettoyage dépend de facteurs tels que l'emplacement de l'installation, le taux de pollution dans la région et les conditions météorologiques locales. Investir dans le nettoyage régulier des panneaux solaires est une étape importante pour garantir leur efficacité et leur durabilité à long terme. L'importance du nettoyage des panneaux solaires peut avoir un impact significatif sur leur efficacité et leur performance, face aux défis associés à la maintenance et au nettoyage manuels traditionnels. C'est pourquoi il est nécessaire de mettre au point des technologies de nettoyage modernes et traditionnelles, en mettant l'accent sur les solutions autonettoyantes qui permettent de surmonter les difficultés liées au nettoyage manuel, telles que les coûts élevés, les risques pour la sécurité, les interruptions potentielles

## Introduction général

---

de la production d'énergie, ainsi que sur les innovations adaptées aux panneaux solaires [7-24].

Dans ce contexte, la conception de robots pour le nettoyage des panneaux solaires est importante. Les détails de la conception du robot proposé se concentrent sur sa structure mécanique, son système de mouvement, son équipement de nettoyage, ses capteurs pour éviter les obstacles et le logiciel qui gère efficacement le processus de nettoyage. Nous abordons les défis techniques auxquels sont confrontés ces robots et la manière de les surmonter pour garantir des performances optimales. Par exemple, le robot doit être capable de rester stable sur des surfaces inclinées sans glisser et de se déplacer avec précision pour éviter les parties sensibles des panneaux solaires. En outre, l'équipement de nettoyage doit être efficace pour enlever la saleté et les débris sans endommager les panneaux [15-16-22].

Un prototype de robot sera développé, expliquant ses principaux composants et leurs fonctions, y compris la conception mécanique, le système de mouvement, l'équipement de nettoyage, les capteurs et le logiciel qui gère le processus de nettoyage. Ce modèle vise à fournir une solution pratique et innovante au problème croissant du nettoyage des panneaux solaires, en mettant l'accent sur l'efficacité et le faible coût. Grâce à ce modèle, nous pouvons évaluer l'efficacité du robot dans l'exécution des tâches de nettoyage dans différentes conditions, et identifier les optimisations possibles pour assurer la meilleure performance possible.

Cette mémoire vise à explorer et à évaluer des solutions technologiques au problème du nettoyage des panneaux solaires, en mettant l'accent sur le développement et la conception d'un robot efficace capable d'effectuer cette tâche avec une grande efficacité et à faible coût, contribuant ainsi à l'efficacité et à la durabilité des systèmes d'énergie solaire. En adoptant de telles solutions innovantes, la dépendance à l'égard de l'énergie solaire en tant que source d'énergie propre et renouvelable peut être renforcée, ce qui contribue à réduire la dépendance à l'égard des combustibles fossiles et à minimiser l'empreinte carbone.



# **Chapitre I**

## **Contexte global du nettoyage des panneaux photovoltaïques**

# **Chapitre I : Contexte global du nettoyage des panneaux photovoltaïques**

---

## **I. 1. Introduction**

Le nettoyage régulier des panneaux solaires est un élément essentiel de la maintenance et de l'exploitation des installations solaires. Ces panneaux reçoivent la lumière du soleil et la convertissent en électricité grâce à des cellules solaires intégrées. Cependant, avec le temps, la saleté, la poussière et les impuretés peuvent s'accumuler à la surface des panneaux, réduisant ainsi leur capacité à absorber efficacement la lumière.

Lorsque la poussière et les impuretés s'accumulent sur les panneaux, elles forment une couche isolante qui bloque la lumière solaire provenant des cellules solaires, ce qui réduit l'efficacité de la conversion énergétique et, par conséquent, la production d'électricité. On sait que des panneaux solaires sales peuvent perdre jusqu'à 20 % de leur efficacité énergétique, ce qui se traduit par une perte de rendement significative à long terme.

En outre, l'accumulation permanente de saletés peut endommager les panneaux à long terme, car ils peuvent surchauffer et provoquer la corrosion des cellules solaires. Un nettoyage régulier des panneaux solaires est donc essentiel pour maintenir leur efficacité et garantir qu'ils continuent à produire de l'énergie solaire au plus haut niveau.

La programmation régulière du nettoyage doit être basée sur des facteurs tels que l'emplacement de l'installation, le taux de pollution dans la région et les conditions météorologiques locales. Le nettoyage régulier des panneaux solaires est un investissement important pour garantir l'efficacité et la viabilité à long terme des installations solaires. [1]

## **I. 2. Importance des panneaux photovoltaïques**

Les panneaux photovoltaïques sont indispensables dans la production d'énergie solaire car ils transforment directement la lumière du soleil en électricité. Ce rôle fondamental repose sur la capacité des cellules photovoltaïques à convertir l'énergie solaire en une source d'énergie utilisable, propre et renouvelable. [2]

### **I. 2. 1. Rôle crucial des panneaux photovoltaïques dans la production d'énergie solaire**

Ce processus, rendu possible grâce aux cellules photovoltaïques, est crucial pour plusieurs raisons.

# Chapitre I : Contexte global du nettoyage des panneaux photovoltaïques

## I. 2. 1. 1. Conversion directe

Les panneaux solaires exploitent le phénomène photovoltaïque pour convertir la lumière du soleil en électricité. Lorsque les photons solaires heurtent les cellules, ils libèrent des électrons, générant ainsi un courant électrique. Ce mécanisme permet une conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique, rendant ce processus très efficace et durable. [3-12]

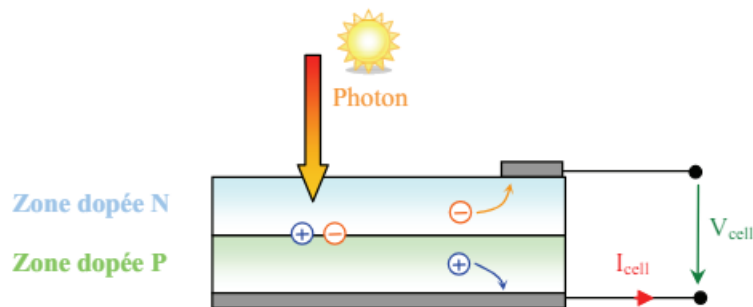


Figure I. 1. Schéma de principe de la conversion photoélectrique [12]

## I. 2. 1. 2. Source d'énergie propre et renouvelable

Contrairement aux combustibles fossiles, l'énergie solaire est propre et renouvelable. En utilisant les panneaux photovoltaïques pour capter cette énergie, on réduit la dépendance aux énergies polluantes et non renouvelables, tout en limitant les émissions de gaz à effet de serre. Cela contribue à la lutte contre le changement climatique et à la protection de l'environnement. [4-12]

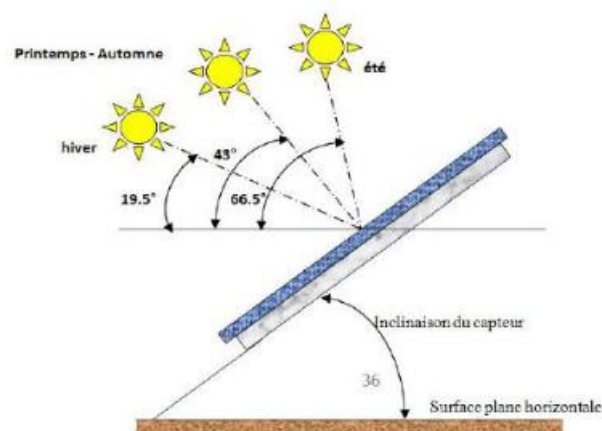


Figure I. 2. L'énergie solaire [3]

## I. 2. 1. 3. Polyvalence d'installation

Les modules solaires peuvent être installés sur une variété de surfaces, y compris les toits des bâtiments, les terrains inutilisés et même les structures flottantes sur l'eau. Leur adaptabilité les rend appropriés pour de nombreuses applications, tant résidentielles que commerciales. Cette flexibilité permet d'exploiter divers espaces pour la production d'énergie solaire. [3-4]



Figure I. 3. L'installation de modules solaire [3]

## I. 2. 1. 4. Réduction des coûts à long terme

Bien que l'installation initiale des systèmes photovoltaïques puisse représenter un investissement, leurs coûts d'exploitation sont relativement bas une fois en place. Cela permet de réduire les coûts à long terme et peut même entraîner des économies sur les factures d'électricité. De plus, les avancées technologiques continuent de réduire les coûts de production et d'installation de ces dispositifs, les rendant de plus en plus accessibles. [4]

## I. 2. 1. 5. Indépendance énergétique

En produisant de l'électricité localement à partir de la lumière du soleil, les installations photovoltaïques peuvent contribuer à accroître l'indépendance énergétique d'une région ou d'un pays, réduisant ainsi la dépendance aux importations d'énergie. Cette indépendance

# **Chapitre I : Contexte global du nettoyage des panneaux photovoltaïques**

---

énergétique renforce la sécurité énergétique et offre une plus grande résilience face aux fluctuations des marchés de l'énergie. [5]

## **I. 2. 1. 6. Durabilité environnementale**

En générant de l'électricité sans émissions nocives, les capteurs solaires contribuent à la durabilité environnementale en réduisant la pollution de l'air et en limitant les impacts sur le climat. Leur utilisation aide à préserver les ressources naturelles et à protéger les écosystèmes fragiles.

Les technologies solaires jouent donc un rôle essentiel dans la transition vers un système énergétique plus durable et respectueux de l'environnement, offrant une solution clé pour répondre aux défis énergétiques actuels et futurs. [4-5]



**Figure I. 4.** Nettoyer les abords des Panneaux solaires [3]

## **I. 2. 2. Efficacité énergétique dans le contexte des systèmes photovoltaïques**

L'efficacité énergétique des systèmes solaires est cruciale dans le domaine de l'énergie solaire, car elle mesure la capacité d'un système à convertir efficacement l'énergie solaire en électricité utilisable. Cette efficacité dépend de plusieurs facteurs, notamment la qualité des cellules solaires, la conception du système, les conditions environnementales et l'orientation des modules par rapport au soleil.

Pour améliorer cette efficacité, des recherches sont menées pour développer des matériaux de cellules plus performants, capables de convertir une plus grande partie du spectre solaire en électricité. De plus, des progrès sont réalisés dans la conception des systèmes, notamment en ce qui concerne les onduleurs, les dispositifs de suivi solaire et les techniques de concentration solaire. [6]

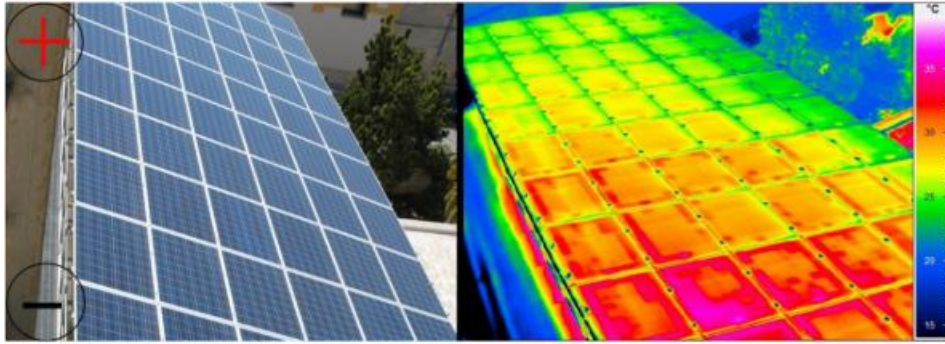


Figure I. 5. L'efficacité et la qualité des cellules solaires [6]

### I. 2. 2. 1. Qualité des cellules solaires

Les cellules de haute qualité sont essentielles pour maximiser l'efficacité de conversion de l'énergie solaire. Des matériaux innovants comme le silicium monocristallin, les pérovskites et d'autres composés semi-conducteurs offrent des taux de conversion plus élevés et une meilleure performance globale. Les recherches actuelles visent à améliorer ces matériaux pour rendre les panneaux encore plus efficaces et durables. [5-6]

### I. 2. 2. 2. Conception du système

La conception optimisée des systèmes solaires, incluant des onduleurs de haute efficacité et des dispositifs de suivi solaire, permet d'améliorer la quantité d'énergie capturée et convertie. Les systèmes de suivi solaire, en particulier, ajustent automatiquement la position des panneaux pour suivre la trajectoire du soleil, maximisant ainsi l'exposition solaire tout au long de la journée. Les techniques de concentration solaire, qui utilisent des miroirs ou des lentilles pour concentrer la lumière sur les cellules photovoltaïques, augmentent également l'efficacité.

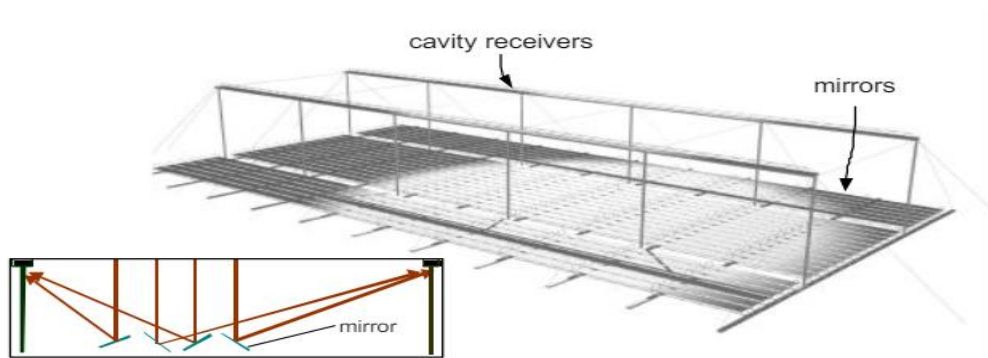


Figure I. 6. La conception optimisée des systèmes solaires [13]

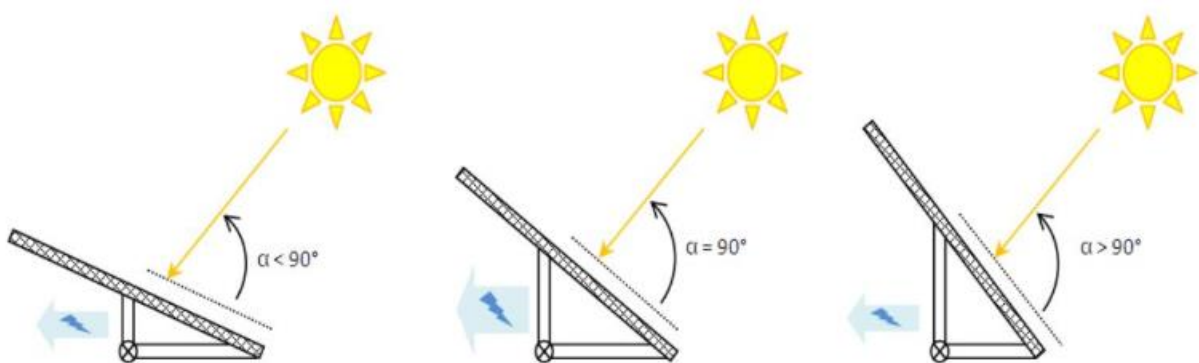
# Chapitre I : Contexte global du nettoyage des panneaux photovoltaïques

## I. 2. 2. 3. Conditions environnementales

Les conditions environnementales, telles que l'ensoleillement, la température et l'absence d'ombrage, influencent directement l'efficacité des modules solaires. Une analyse minutieuse de ces conditions permet d'optimiser l'installation et le fonctionnement des systèmes photovoltaïques. Par exemple, dans les régions avec des niveaux d'ensoleillement élevés, les panneaux peuvent produire plus d'électricité, augmentant ainsi l'efficacité du système.

## I. 2. 2. 4. Orientation et inclinaison des panneaux

L'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires par rapport au soleil sont des paramètres cruciaux pour maximiser l'efficacité énergétique. Une orientation optimale permet de capturer le maximum de lumière solaire, augmentant ainsi la production d'électricité. Les systèmes de suivi solaire peuvent ajuster l'inclinaison et l'orientation des panneaux pour suivre le mouvement du soleil, augmentant considérablement l'efficacité énergétique. [6]



**Figure I. 7.** L'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires par rapport au soleil [1]

## I. 3. Défis du nettoyage des panneaux photovoltaïques

Le maintien de l'efficacité énergétique des panneaux photovoltaïques est essentiel, mais le nettoyage présente divers défis qui doivent être abordés pour assurer des résultats durables. Ces défis comprennent des aspects tels que l'accès aux panneaux, la sécurité des opérations, les coûts impliqués et l'impact environnemental. Explorer ces défis de manière approfondie est essentiel pour une planification efficace et une exécution réussie des opérations de nettoyage. [7]

## **Chapitre I : Contexte global du nettoyage des panneaux photovoltaïques**

---

### **I. 3. 1. Nécessité de maintenir la surface des panneaux propre pour garantir leur performance optimale**

Pour garantir une performance optimale des panneaux solaires, maintenir leur surface propre est impératif. Voici les principaux points à considérer. [7]

#### **I. 3. 1. 1. Augmentation de l'efficacité énergétique**

Les panneaux obstrués par la saleté ou la poussière captent moins de lumière solaire, ce qui réduit leur capacité à produire de l'électricité. Un nettoyage régulier est donc nécessaire pour maximiser l'exposition des cellules solaires à la lumière du soleil. La poussière, les feuilles mortes, et autres débris peuvent créer une couche opacifiante qui bloque la lumière, réduisant ainsi l'efficacité des modules jusqu'à 20%.



**Figure I. 8.** Les panneaux obstrués par la saleté ou la poussière [1]

#### **I. 3. 1. 2. Maximisation du rendement**

Un nettoyage régulier permet de maximiser la quantité d'énergie solaire convertie en électricité, augmentant ainsi le rendement global du système solaire. En maintenant les panneaux propres, on assure une conversion efficace de la lumière solaire en énergie électrique, ce qui est particulièrement crucial dans les zones à forte concentration de poussière et de pollution.

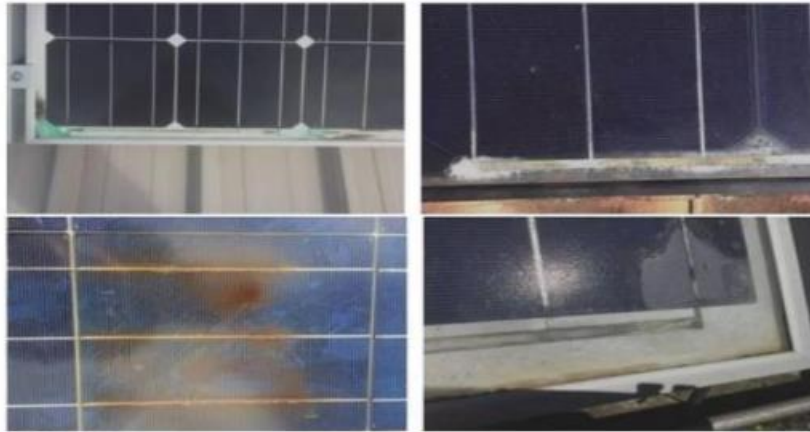


# Chapitre I : Contexte global du nettoyage des panneaux photovoltaïques

---

## I. 3. 1. 3. Prolongation de la durée de vie

Un entretien régulier, y compris le nettoyage des panneaux, peut prolonger leur durée de vie en réduisant l'usure et en maintenant leur efficacité. Les saletés accumulées peuvent causer des points chauds et d'autres dommages qui peuvent dégrader les matériaux des panneaux, accélérant leur vieillissement et réduisant leur durée de vie opérationnelle.



**Figure I. 9.** Exemple de la corrosion des panneaux photovoltaïques [1]

## I. 3. 1. 4. Réduction des coûts de maintenance

Prévenir l'accumulation de saletés et de débris réduit la fréquence et le coût des réparations et du remplacement des panneaux endommagés, contribuant ainsi à des économies à long terme. Moins de nettoyage et de réparation signifient des coûts d'exploitation réduits et une meilleure rentabilité du système solaire.

## I. 3. 1. 5. Amélioration du retour sur investissement

Le maintien des panneaux propres et performants garantit une production d'électricité maximale tout au long de leur durée de vie, améliorant ainsi le retour sur investissement du système solaire. Une meilleure performance des panneaux signifie une récupération plus rapide des coûts d'investissement initiaux, avec des gains plus élevés en termes de production d'énergie. [7]

# Chapitre I : Contexte global du nettoyage des panneaux photovoltaïques

## I. 3. 2. Facteurs environnementaux et types de saletés pouvant compromettre l'efficacité des panneaux

Plusieurs facteurs environnementaux et types de saletés peuvent affecter négativement l'efficacité des panneaux solaires. [8-14]



Figure I. 10. Exemples de salissures [14]

### I. 3. 2. 1. Poussière et particules fines

La poussière atmosphérique, le pollen et d'autres particules fines peuvent s'accumuler sur la surface des panneaux, réduisant ainsi la quantité de lumière solaire atteignant les cellules. Dans les régions désertiques, les tempêtes de sable peuvent rapidement recouvrir les panneaux de particules fines, nécessitant des nettoyages fréquents. [14]

### I. 3. 2. 2. Débris végétaux

Les feuilles, les brindilles et autres débris végétaux peuvent obstruer la surface des panneaux, réduisant leur efficacité et nécessitant un nettoyage régulier. Ces débris sont souvent transportés par le vent ou tombent des arbres environnants, créant une barrière physique à la lumière solaire.

## **Chapitre I : Contexte global du nettoyage des panneaux photovoltaïques**

---

### **I. 3. 2. 3. Fientes d'oiseaux et insectes**

Les débris organiques, tels que les fientes d'oiseaux et les insectes, peuvent se déposer sur les panneaux, diminuant ainsi leur capacité à capter la lumière solaire. Ces contaminants biologiques peuvent également entraîner la croissance de micro-organismes qui dégradent les surfaces des panneaux.

### **I. 3. 2. 4. Pollution atmosphérique**

Les panneaux situés à proximité de sources de pollution atmosphérique peuvent être recouverts de particules de suie et d'autres contaminants, réduisant ainsi leur efficacité. Les zones industrielles et urbaines, avec leurs émissions de véhicules et d'usines, présentent un risque accru de pollution des panneaux. [8]

### **I. 3. 2. 5. Dépôts de sel et de minéraux**

Dans les zones côtières ou désertiques, les panneaux peuvent être exposés à des dépôts de sel et de minéraux, ce qui peut réduire leur performance et nécessiter un nettoyage spécifique. Le sel en particulier peut corroder les composants des panneaux, entraînant des défaillances précoces.

### **I. 3. 2. 6. Dépôts de graisse ou d'huile**

Dans les environnements industriels ou près de routes très fréquentées, les panneaux peuvent être exposés à des émissions de graisse ou d'huile, affectant ainsi leur efficacité. Ces dépôts peuvent créer une pellicule sur les panneaux qui est difficile à nettoyer et qui bloque efficacement la lumière solaire. [8-14]

### **I. 3. 2. 7. Dépôts de poussière de pollen**

En période de floraison, la poussière de pollen peut s'accumuler sur la surface des panneaux, réduisant leur efficacité et nécessitant un nettoyage régulier. Le pollen peut s'accrocher à la surface des panneaux, formant une couche tenace qui réduit la pénétration de la lumière solaire.

## I.4.Stratégies et technologies pour le nettoyage des panneaux photovoltaïques

Le nettoyage des panneaux solaires peut être effectué efficacement en utilisant différentes stratégies et technologies. [9]

### I. 4. 1. Méthodes traditionnelles de nettoyage

#### I. 4. 1. 1. Nettoyage manuel

L'utilisation d'eau et de savon biodégradable pour nettoyer les panneaux à la main reste une méthode simple et efficace, bien qu'exigeante en main-d'œuvre. Cette méthode permet un contrôle minutieux du processus de nettoyage, assurant que chaque panneau est propre et fonctionnel. Cependant, elle peut être coûteuse en termes de temps et de main-d'œuvre, et nécessite souvent l'intervention de techniciens spécialisés pour accéder en toute sécurité aux panneaux installés en hauteur ou dans des endroits difficiles d'accès. [9]



**Figure I. 11.** Le nettoyage des panneaux solaires manuellement [1]

#### I. 4. 1. 2. Systèmes de lavage à haute pression

Les systèmes de lavage à haute pression peuvent éliminer la saleté tenace mais doivent être utilisés avec précaution pour éviter d'endommager les panneaux. Cette méthode est rapide et efficace pour les grandes installations, mais le risque de dommages physiques aux panneaux

## **Chapitre I : Contexte global du nettoyage des panneaux photovoltaïques**

et aux joints doit être soigneusement géré. Une pression excessive peut causer des fissures ou des fuites, compromettant l'intégrité structurelle des panneaux. [9-10]

### **I. 4. 2. Innovations dans le nettoyage automatisé**

#### **I. 4. 2. 1. Robots de nettoyage**

Les robots de nettoyage automatisés équipés de brosses et de jets d'eau peuvent nettoyer les panneaux sans intervention humaine, réduisant ainsi les coûts de main-d'œuvre et les risques pour la sécurité. Ces robots sont programmés pour se déplacer sur la surface des panneaux, nettoyant de manière uniforme et efficace. Ils peuvent être particulièrement utiles dans les installations à grande échelle ou dans des environnements dangereux pour les humains. De plus, ils peuvent fonctionner de manière autonome, réduisant ainsi les interruptions et augmentant l'efficacité globale du système de nettoyage. [1]



**Figure I. 12.** Système de nettoyage robotique [1]

#### **I. 4. 2. 2. Technologies de nettoyage sans eau**

Des solutions telles que les systèmes électrostatiques ou les revêtements autonettoyants sont en développement pour réduire l'utilisation d'eau et l'empreinte environnementale du nettoyage. Les systèmes électrostatiques utilisent des charges électriques pour repousser la poussière et les débris, tandis que les revêtements autonettoyants créent une surface sur laquelle la saleté ne peut pas adhérer. Ces technologies promettent de réduire considérablement la consommation d'eau et les besoins en produits chimiques de nettoyage, rendant le processus plus durable et respectueux de l'environnement. [7]

## **I. 5. Impact environnemental et durabilité**

Minimiser l'impact environnemental du nettoyage des panneaux photovoltaïques est crucial. Des pratiques durables peuvent être adoptées pour y parvenir [8] :

### **I. 5. 1. Minimisation de l'utilisation de l'eau**

#### **I. 5. 1. 1. Recyclage de l'eau de nettoyage**

Les systèmes de filtration et de recyclage de l'eau peuvent réduire la consommation d'eau pendant le nettoyage, surtout dans les régions où elle est rare. En recyclant l'eau utilisée, ces systèmes permettent de réduire la quantité d'eau fraîche nécessaire, contribuant ainsi à la conservation des ressources hydriques et à la réduction des coûts d'exploitation. [10]



**Figure I. 13.** Recyclage de l'eau de nettoyage [14]

#### **I. 5. 1. 2. Utilisation de brosses à faible consommation d'eau**

Des brosses spécialement conçues pour minimiser la consommation d'eau peuvent être utilisées lors du nettoyage manuel ou automatisé des panneaux, contribuant ainsi à la conservation de cette ressource. Ces brosses sont efficaces pour éliminer la saleté tout en utilisant une quantité minimale d'eau, ce qui est particulièrement important dans les régions arides. [8]

#### **I. 5. 1. 3. Technologies de nettoyage à base de vapeur**

## **Chapitre I : Contexte global du nettoyage des panneaux photovoltaïques**

---

Les technologies utilisant la vapeur pour nettoyer les panneaux photovoltaïques peuvent être une alternative efficace à l'utilisation de grandes quantités d'eau, tout en offrant un nettoyage en profondeur et une désinfection sans produits chimiques. La vapeur peut pénétrer et éliminer les saletés tenaces, tout en étant respectueuse de l'environnement. [1]

### **I. 5. 2. Utilisation de produits de nettoyage écologiques**

#### **I. 5. 2. 1. Produits biodégradables**

L'utilisation de produits de nettoyage biodégradables et non toxiques réduit l'impact environnemental tout en préservant l'efficacité du nettoyage. Ces produits sont conçus pour se décomposer naturellement sans nuire aux écosystèmes locaux, minimisant ainsi la pollution des sols et des eaux. Ils sont également moins agressifs pour les panneaux eux-mêmes, prévenant les dommages potentiels causés par des produits chimiques plus forts. [1-10]

#### **I. 5. 2. 2. Nettoyage à base de vinaigre**

Le vinaigre est un nettoyant naturel efficace qui peut être utilisé pour éliminer la saleté et les dépôts minéraux des panneaux photovoltaïques sans nuire à leur performance. Il est également peu coûteux et facilement disponible, ce qui en fait une option écologique et économique. Le vinaigre dilué peut dissoudre les minéraux accumulés sans laisser de résidus nocifs, et il peut être rincé facilement avec de l'eau. [9]

#### **I. 5. 2. 3. Utilisation de solutions enzymatiques**

Les solutions enzymatiques sont une autre option écologique. Elles utilisent des enzymes naturelles pour décomposer les matières organiques comme les fientes d'oiseaux et les insectes sans recourir à des produits chimiques agressifs. Ces solutions sont efficaces, sûres pour l'environnement, et n'endommagent pas les panneaux, offrant ainsi une méthode de nettoyage durable et respectueuse de l'environnement.

En adoptant ces différentes méthodes et technologies, il est possible de maintenir l'efficacité des panneaux photovoltaïques tout en minimisant leur impact environnemental, contribuant ainsi à une utilisation plus durable de l'énergie solaire.

### **I. 6. Importance de la maintenance préventive**

## Chapitre I : Contexte global du nettoyage des panneaux photovoltaïques

La maintenance préventive est essentielle pour assurer le bon fonctionnement et la longévité des systèmes photovoltaïques. Voici quelques pratiques clés à suivre. [11]

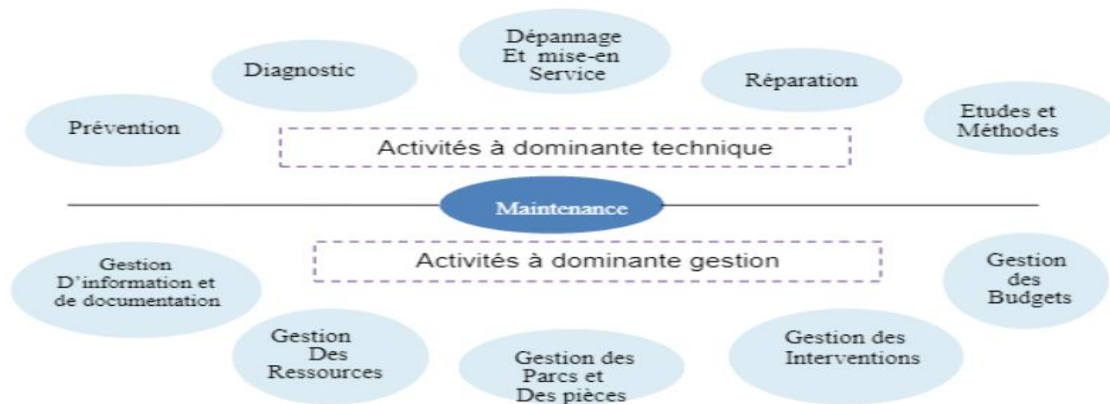


Figure I. 14. Activités de la maintenance [11]

### I. 6. 1. Inspection régulière

#### I. 6. 1. 1. Détection précoce des problèmes

Une inspection régulière permet de détecter les problèmes potentiels, tels que les fissures ou les points chauds, avant qu'ils ne deviennent des problèmes majeurs. Cela permet d'effectuer des réparations proactives et d'éviter des pannes coûteuses. L'utilisation de drones équipés de caméras thermiques peut faciliter ces inspections en fournissant des images détaillées des panneaux depuis le sol. [9-11]

#### I. 6. 1. 2. Analyse de performance

Une analyse régulière de la performance des panneaux permet de s'assurer qu'ils fonctionnent à leur capacité maximale et de détecter tout problème de manière proactive. Des systèmes de surveillance en temps réel peuvent suivre les performances des panneaux et alerter les opérateurs en cas de déviation par rapport aux normes attendues. [11]

### I. 6. 2. Planification de l'entretien

#### I. 6. 2. 1. Calendrier d'entretien



## **Chapitre I : Contexte global du nettoyage des panneaux photovoltaïques**

---

Établir un calendrier d'entretien préventif permet de planifier les nettoyages réguliers, les inspections et les réparations nécessaires, assurant ainsi la cohérence et l'efficacité de l'entretien. Un calendrier bien structuré aide à répartir les tâches sur l'année, évitant les périodes d'inactivité prolongée qui pourraient réduire l'efficacité des panneaux.

### **I. 6. 2. 2. Réparation proactive**

Planifier les réparations de manière proactive permet de maintenir une performance optimale des panneaux et de prolonger leur durée de vie, réduisant ainsi les coûts à long terme associés à des réparations d'urgence. En traitant rapidement les petits problèmes, on peut éviter des dommages plus importants qui nécessiteraient des interventions coûteuses. [11]

### **I. 7. Conclusion**

Le nettoyage des panneaux photovoltaïques est une composante essentielle pour garantir leur efficacité et leur longévité. Face aux défis variés tels que l'accès difficile, les préoccupations de sécurité, les coûts et l'impact environnemental, il est crucial d'adopter des approches stratégiques et des technologies innovantes. En maintenant la surface des modules solaires propre, non seulement nous maximisons la production d'énergie solaire, mais nous prolongeons également la durée de vie des installations et améliorons le retour sur investissement.

Les facteurs environnementaux, allant de la poussière atmosphérique aux dépôts de sel, nécessitent des solutions de nettoyage adaptées et respectueuses de l'environnement. L'adoption de produits biodégradables et de méthodes de nettoyage économes en eau, comme les brosses à faible consommation d'eau et les solutions enzymatiques, permet de réduire l'empreinte écologique du nettoyage.

De plus, la maintenance préventive, comprenant des inspections régulières et des réparations proactives, joue un rôle crucial dans la préservation de la performance des panneaux. Un calendrier d'entretien bien établi assure que les panneaux restent en excellent état, ce qui minimise les interruptions et les coûts associés aux pannes imprévues.

En fin de compte, l'intégration de pratiques durables et l'utilisation de technologies avancées dans le nettoyage et l'entretien des installations solaires sont indispensables pour tirer pleinement parti des avantages des énergies renouvelables. En assurant une performance

## **Chapitre I : Contexte global du nettoyage des panneaux photovoltaïques**

---

optimale des systèmes photovoltaïques, nous contribuons à la transition énergétique vers des sources d'énergie propres et durables, tout en protégeant notre environnement pour les générations futures. Le soin apporté à ces systèmes reflète notre engagement envers un avenir énergétique plus propre et plus efficace, bénéficiant à la fois à la planète et à l'humanité.

## **Chapitre II**

**Problématique et solutions  
proposées dans le contexte du  
self-nettoyage**

# **Chapitre II : Problématique et solutions proposées dans le contexte du self-nettoyage**

---

## **II.1. Introduction**

Le nettoyage des panneaux photovoltaïques (PV) est essentiel pour maintenir leur performance optimale dans la production d'énergie. En effet, les panneaux peuvent accumuler divers types de saletés, comme la poussière, le pollen, les feuilles, les fientes d'oiseaux, et d'autres débris, qui diminuent l'absorption de la lumière solaire et, par conséquent, la production d'électricité. Des recherches ont démontré que cette accumulation peut réduire l'efficacité des panneaux solaires de 15 à 25 % ou plus, selon leur emplacement et les conditions climatiques. Pour surmonter ces obstacles, les solutions de self-nettoyage sont de plus en plus envisagées comme une alternative efficace et durable au nettoyage manuel. [15-16]

Les technologies de self-nettoyage visent à maintenir la propreté des panneaux photovoltaïques tout en minimisant les coûts, l'effort humain et l'impact environnemental. Elles comprennent des approches variées, telles que des revêtements hydrophobes qui empêchent l'adhérence de la poussière, des systèmes automatisés à eau ou à air, et des robots de nettoyage autonomes qui parcourent la surface des panneaux pour éliminer les débris. Ces technologies permettent de maximiser l'efficacité énergétique des panneaux, de prolonger leur durée de vie, et de maximiser le retour sur investissement (ROI) pour les propriétaires. [17]

## **II.2. Problématique de recherche**

Le self nettoyage désigne la capacité d'un système ou d'un matériau à nettoyer automatiquement ses surfaces sans intervention humaine directe.

Malgré les progrès technologiques, la mise au point de méthodes efficaces d'auto nettoyage reste un défi. Les méthodes actuelles peuvent être limitées par leur coût, leur durabilité, leur efficacité à long terme ou leur impact sur l'environnement. [18]

### **II.2.1. Formulation Précise de la Question de Recherche**

Comment les technologies de self-nettoyage peuvent-elles être optimisées pour maximiser l'efficacité énergétique, tout en minimisant leur impact environnemental dans divers environnements climatiques ?

### **II.2.2. Objectifs du Travail**

- **Analyser les conséquences de la saleté sur l'efficacité des panneaux solaires**

## **Chapitre II : Problématique et solutions proposées dans le contexte du self-nettoyage**

---

Effectuer une évaluation des pertes de production énergétique causées par l'accumulation de saleté (poussière, pollen, fientes, etc.) sur les panneaux solaires, en prenant en considération divers environnements et condition climatiques.

### ➤ **Étudier les différentes techniques de nettoyage en place**

Analyser et évaluer les diverses méthodes de nettoyage (manuelles, automatiques, avec ou sans eau) ainsi que leur efficacité relative en fonction des types de saleté et des conditions propres aux sites.

### ➤ **Analyser les conséquences économiques et écologiques du nettoyage des panneaux solaires**

Analyser les dépenses associées au nettoyage, les bénéfices obtenus grâce à l'amélioration de la production énergétique, ainsi que l'impact environnemental de ces pratiques, en particulier en ce qui concerne la consommation d'eau et de produits chimiques.

### ➤ **Évaluer la fréquence de nettoyage idéale :**

Proposer une approche ou des conseils sur la fréquence optimale de nettoyage des panneaux en prenant en compte divers éléments (emplacement géographique, conditions climatiques, niveaux de pollution) afin d'optimiser l'efficacité énergétique tout en réduisant les dépenses disponibles.

## **II.3. Étude des solutions existantes**

### **II.3.1. Analyse des approches de self-nettoyage utilisées dans d'autres industries ou applications similaires**

Dans de nombreuses industries, on utilise des technologies de self-nettoyage afin de diminuer les tâches manuelles et d'améliorer l'efficacité des systèmes. Il existe différentes méthodes qui incluent l'emploi de revêtements hydrophobes, de nanotechnologies, de dispositifs mécaniques automatisés et de systèmes de nettoyage par ultrasons. Voici une étude des méthodes principales de nettoyage personnel qui pourraient être utilisées pour les panneaux solaires.

#### **II.3.1.1. Matériaux hydrophobes et photocatalysés**

Les revêtements hydrophobes (repoussant l'eau) et photocatalytiques (décomposant les contaminants organiques à l'aide de la lumière du soleil) sont fréquemment employés sur les vitres, les pare-brises et les façades de bâtiments. Grâce à ces technologies, il est possible de diminuer l'accumulation de poussière, de saleté et de bactéries. Par exemple, on retrouve fréquemment des revêtements à base de dioxyde de titane (TiO<sub>2</sub>) en raison de leurs

## **Chapitre II : Problématique et solutions proposées dans le contexte du self-nettoyage**

---

caractéristiques autolavantes sous l'action des UV, ils décomposent les matières organiques et rendent le nettoyage plus facile avec de l'eau de pluie. [19]

### **II.3.1.2. Nanotechnologies et surfaces superhydrophobes**

Inspirées des feuilles de lotus, les surfaces superhydrophobes sont développées à l'échelle nanométrique afin de réduire le contact de l'eau avec la surface, ce qui permet aux gouttelettes de pluie de se déplacer et d'emporter avec elles la saleté et les débris. Cette technologie est employée dans le domaine de l'automobile et sur les écrans de smartphones afin de préserver la propreté et la transparence des surfaces. Ces surfaces peuvent éventuellement diminuer la nécessité de nettoyage manuel pour les applications photovoltaïques en empêchant l'accumulation de poussière. [20]

### **II.3.1.3. Dispositifs de nettoyage automatisé**

Il est fréquent d'utiliser des appareils de nettoyage automatisés tels que les robots de nettoyage dans les secteurs du bâtiment et des serres agricoles afin d'entretenir les grandes surfaces vitrées. Il est possible d'équiper ces systèmes de brosses, d'aspirateurs ou de jets d'eau afin de supprimer la saleté. Dans les serres agricoles, par exemple, des robots automatisés effectuent un nettoyage régulier des vitres afin d'optimiser la transmission de la lumière. Ces robots, conçus pour les installations photovoltaïques, peuvent effectuer le nettoyage des panneaux sans avoir besoin de présence humaine sur place, ce qui permet de diminuer les risques associés à l'entretien manuel. [21]



**Figure II.1.** Les automates de nettoyage des poussières [51]

### **II.3.1.4. Équipements de nettoyage à ultrasons**

Dans les domaines médicaux et de précision, les systèmes de nettoyage par ultrasons fonctionnent en utilisant des ondes sonores à haute fréquence qui entraînent des vibrations dans l'eau ou les solvants, ce qui permet de détruire les contaminants de la surface. Ce procédé s'avère performant pour s'occuper de surfaces complexes ou fragiles sans les causer de dommages. Malgré sa rareté pour les grandes surfaces comme les panneaux photovoltaïques, il est intéressant d'explorer son potentiel pour le nettoyage des panneaux solaires, en particulier pour les installations en zones poussiéreuses. [22]

### **II.3.2. Examen des technologies émergentes ou des concepts innovants pour le self-nettoyage des panneaux photovoltaïques**

Il y a une recherche active dans le domaine de l'innovation dans le self-nettoyage des panneaux photovoltaïques, motivée par la volonté de maximiser l'efficacité énergétique et de diminuer les frais d'entretien. Voici une analyse des nouvelles technologies et des idées novatrices qui présentent un potentiel prometteur pour le nettoyage autonome des panneaux solaires.

#### **II.3.2.1. Revêtements à la fois autolavants et nanomatériaux de pointe**

## **Chapitre II : Problématique et solutions proposées dans le contexte du self-nettoyage**

---

Récemment, des études ont été menées sur des revêtements autolavants plus sophistiqués, comme ceux qui utilisent des nanoparticules et des composés superhydrophobes. En plus de repousser l'eau, ces revêtements utilisent également leurs propriétés photocatalytiques pour décomposer les contaminants organiques sous l'action de la lumière solaire. Les nanocomposites de dioxyde de titane (TiO<sub>2</sub>) associés au graphène ou à d'autres oxydes métalliques ont démontré une amélioration notable de l'efficacité de nettoyage et une plus grande durabilité dans différentes conditions environnementales. [23-24]

### **II.3.2.2. Compositions électrodynamiques.**

Les tissus électrodynamiques (EDC) constituent une autre avancée majeure. Les champs électrostatiques sont employés dans ces systèmes afin de faire disparaître les particules de poussière et autres débris de la surface des panneaux solaires. Les impulsions électriques à haute fréquence sont appliquées par un réseau de fils conducteurs intégrés dans le revêtement, ce qui entraîne le détachement et le déplacement des particules. Selon des recherches, les EDC ont la capacité de supprimer jusqu'à 95 % de la poussière, ce qui permet de réduire considérablement les pertes de rendement sans avoir besoin d'eau ou de produits chimiques. [25]

### **II.3.2.3. Technologies à base de vibrations et d'ondes sonores**

L'étude porte également sur les technologies de nettoyage par vibrations mécaniques ou ondes sonores, qui sont adaptées aux techniques de nettoyage des composants électroniques. Ces techniques font appel à des vibrations minces ou à des ondes sonores afin de détacher les particules de poussière sans causer de dommages à la surface du panneau. Des dispositifs intégrés aux panneaux ou des transducteurs montés sur le cadre peuvent générer des vibrations, ce qui en fait une solution de self-nettoyage particulièrement efficace dans les environnements arides où l'eau est rare. [26]

### **II.3.2.4. Systèmes à base de robots autonomes**

Les grandes installations photovoltaïques ont de plus en plus recours aux robots autonomes pour le nettoyage des panneaux solaires. Ces robots, fréquemment alimentés par eux-mêmes des panneaux solaires, font appel à des brosses rotatives, des jets d'eau à haute pression ou des nettoyeurs sans eau afin de supprimer la saleté et la poussière. Quelques-uns de ces robots peuvent se déplacer de manière autonome à travers des rangées de panneaux et revenir à leur station de recharge une fois que le nettoyage est terminé. Les robots autonomes conviennent



## **Chapitre II : Problématique et solutions proposées dans le contexte du self-nettoyage**

---

particulièrement aux grandes exploitations solaires où l'accès humain est restreint ou coûteux. [27]

### **II.3.2.5. Matériaux à mémoire de forme et surfaces biomimétiques**

On étudie les matériaux à mémoire de forme, qui se transforment en fonction de stimuli externes tels que la chaleur ou la lumière, afin de créer un effet d'auto-nettoyage. Ces matériaux ont la capacité de changer leur surface en réponse aux variations de température afin d'éliminer les particules ou de faire glisser les gouttes de pluie de manière régulière. En outre, les surfaces biomimétiques façonnées à partir de structures naturelles (telles que les ailes de papillon ou les feuilles de lotus) présentent des caractéristiques hydrophobes et autonettoyantes novatrices qui diminuent l'accumulation de saletés. [28]

## **II.4. Proposition de solution : conception et design du robot nettoyeur**

### **II.4.1 Description du concept du robot nettoyeur de panneaux photovoltaïques**

Les robots de nettoyage des panneaux solaires sont des appareils autonomes ou semi-autonomes développés pour préserver la propreté des installations solaires en éliminant la poussière, la saleté, les fientes d'oiseaux et d'autres débris qui diminuent l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en électricité. Ces robots sont très pratiques pour les installations photovoltaïques de grande envergure où le nettoyage manuel serait à la fois coûteux, dangereux ou impossible.

#### **II.4.1.1. Mécanisme de fonctionnement des robots de nettoyage des panneaux solaires**

Divers mécanismes de nettoyage sont intégrés aux robots nettoyeurs, comme des brosses rotatives, des jets d'eau, des raclettes ou des tissus microfibrés, afin de supprimer efficacement les saletés de la surface des panneaux. Un certain nombre de modèles plus sophistiqués intègrent des technologies sans eau, telles que le nettoyage par air comprimé ou l'utilisation de revêtements hydrophobes, afin de réduire l'utilisation d'eau dans les zones arides.

Grâce à des capteurs et des algorithmes d'intelligence artificielle, ces robots peuvent opérer de manière autonome. Ils peuvent repérer la saleté, se déplacer à travers les rangées de panneaux et retourner à leur station de recharge ou de nettoyage une fois que la tâche est terminée. Des modèles supplémentaires sont supervisés à distance grâce à des applications mobiles ou des systèmes de contrôle centralisés.

#### **II.4.1.2. Technologies intégrées et conception**

## Chapitre II : Problématique et solutions proposées dans le contexte du self-nettoyage

---

Les robots nettoyeurs de panneaux photovoltaïques incorporent diverses technologies et composants pour assurer un nettoyage efficace et sûr :

- **Capteurs et caméras** : Utilisés pour détecter les obstacles, identifier les zones sales et naviguer de manière autonome entre les rangées de panneaux. Les capteurs peuvent inclure des caméras, des capteurs infrarouges, des lidars, et des capteurs à ultrasons pour la détection précise des environnements.
- **Algorithmes d'intelligence artificielle et de navigation** : Ces algorithmes permettent au robot de planifier son parcours de nettoyage, d'éviter les obstacles et d'optimiser son efficacité énergétique et de nettoyage. [30]
- **Systèmes d'alimentation solaire et batterie** : Beaucoup de robots sont alimentés par des panneaux solaires intégrés, ce qui leur permet de fonctionner de manière indépendante de l'infrastructure électrique, ou disposent de batteries rechargeables qui permettent des opérations prolongées sans interruption.
- **Dispositifs de mobilité** : Les robots peuvent être équipés de roues, de chenilles, ou de systèmes de rail pour se déplacer sur les panneaux. Certains modèles, conçus pour les surfaces inclinées ou verticales, utilisent des systèmes d'aspiration ou de traction par câble pour s'ancrer solidement aux surfaces des panneaux. [29]



**Figure II.2.** Un petit robot mobile pour nettoyer les panneaux solaires photovoltaïque

### II. 4.1.3. Avantages des robots nettoyeurs

- **Amélioration de l'efficacité de nettoyage** : Les robots peuvent effectuer un nettoyage

## Chapitre II : Problématique et solutions proposées dans le contexte du self-nettoyage

---

régulier et précis des panneaux, réduisant ainsi les pertes de rendement énergétique causées par la saleté.

Réduction des dépenses liées à la main-d'œuvre et des dangers pour la sécurité : En automatisant le nettoyage, les robots diminuent la demande d'intervention humaine, notamment dans les environnements difficiles d'accès ou dangereux. [32]

- **Adaptabilité aux conditions environnementales** : Les robots peuvent être programmés pour nettoyer à des fréquences optimales en fonction des conditions environnementales, telles que les niveaux de pollution de l'air ou les précipitations
- **Respect de l'environnement** : Les modèles qui ne nécessitent pas d'eau et ceux qui utilisent des technologies de nettoyage à faible impact environnemental permettent de diminuer la consommation d'eau et de produits chimiques. [31]

### II.4.1.4. Exemples de robots nettoyeurs existants

Plusieurs entreprises développent et commercialisent des robots nettoyeurs de panneaux solaires. Par exemple :

- **Ecoppia** : propose des robots sans eau, autonomes, dotés de brosses en microfibres, et utilisant l'intelligence artificielle pour optimiser les parcours de nettoyage.
- **SolarCleano** : développe des robots modulaires qui peuvent être ajustés pour nettoyer différentes tailles de panneaux et types d'installations.
- **Nomadd** : propose un système de robot autonome qui utilise un nettoyage sans eau, particulièrement adapté aux environnements désertiques où l'eau est rare.

### II.4.2. Justification des choix de conception et de technologie pour les robots nettoyeurs de panneaux photovoltaïques

Les robots nettoyeurs de panneaux photovoltaïques sont conçus et choisis en fonction de critères tels que la performance, l'efficacité, le coût et la durabilité environnementale. Ces décisions doivent faire face aux difficultés particulières liées au nettoyage des panneaux solaires, comme l'accumulation de poussière, la fluctuation des conditions météorologiques, les difficultés d'accès aux installations, et la nécessité de réduire au minimum l'impact sur l'environnement. Les principales raisons pour les décisions de conception et de technologie sont les suivantes.

## **Chapitre II : Problématique et solutions proposées dans le contexte du self-nettoyage**

---

### **II.4.2.1. Utilisation de capteurs et de caméras pour la navigation et la détection des saletés**

Les capteurs (infrarouges, ultrasoniques, LiDAR) et les caméras jouent un rôle crucial dans la navigation autonome du robot, l'évitement des obstacles et la détection des zones nécessitant un nettoyage approfondi. Grâce à ces capteurs, il est possible de dresser une carte de l'environnement, de suivre les bordures des panneaux et d'ajuster en temps réel le parcours afin d'optimiser l'efficacité du nettoyage. Ces technologies sont intégrées en raison de leur capacité à diminuer les besoins d'intervention humaine, ce qui réduit les dépenses liées à la main-d'œuvre et améliore la sécurité sur les sites difficiles d'accès.

### **II.4.2.2. Incorporation d'algorithmes d'intelligence artificielle (IA) pour l'optimisation des parcours et la gestion énergétique**

Les algorithmes d'intelligence artificielle jouent un rôle essentiel dans l'amélioration des trajets de nettoyage, offrant au robot la possibilité de sélectionner le chemin le plus performant tout en réduisant sa consommation d'énergie. Ces algorithmes ont la capacité d'acquérir des modèles de saleté et de modifier la fréquence de nettoyage en fonction de données en temps réel, telles que la météo ou les niveaux de pollution de l'air. L'intelligence artificielle permet aussi d'augmenter la longévité des éléments du robot en réduisant les mouvements superflus et en optimisant l'efficacité de la batterie. [30]

### **II.4.2.3. Sélection des moyens de déplacement adaptés aux diverses installations de panneaux solaires.**

Le choix des moyens de déplacement, comme les roues, les chenilles ou les systèmes de rail, est basé sur la topographie et le type d'installation des panneaux solaires. Par exemple, les robots munis de chenilles ont une meilleure capacité à naviguer sur des surfaces inclinées ou rugueuses, tandis que les systèmes de rail sont plus adaptés aux installations fixes de grande envergure. Ce choix assure un nettoyage complet et réduit au minimum les risques de chute ou de dégâts aux panneaux.

### **II.4.2.4. Mise en place de systèmes de nettoyage qui ne nécessitent pas d'eau ou à faible drainage.**

L'eau est une ressource précieuse et limitée dans de nombreuses régions où les panneaux solaires sont installés, telles que les zones désertiques ou semi-arides. Il est recommandé

## **Chapitre II : Problématique et solutions proposées dans le contexte du self-nettoyage**

---

d'opter pour des robots qui utilisent des technologies sans eau, comme le nettoyage par air comprimé, les brosses en microfibre ou les revêtements hydrophobes, afin de réduire la consommation d'eau tout en maintenant une efficacité de nettoyage optimale. En outre, les technologies qui ne nécessitent pas d'eau diminuent l'empreinte écologique et les dépenses associées à l'approvisionnement et à l'utilisation de l'eau.

### **II.4.2.5. Alimentation par panneaux solaires et batteries rechargeables pour une autonomie prolongée**

Les robots nettoyeurs de panneaux photovoltaïques sont souvent équipés de panneaux solaires intégrés et de batteries rechargeables pour assurer une alimentation continue. Ce choix de conception permet aux robots de fonctionner de manière indépendante sans dépendre de l'infrastructure électrique existante, ce qui est particulièrement avantageux dans les installations solaires éloignées. L'utilisation de l'énergie solaire pour alimenter le robot maximise également l'autonomie et réduit les coûts énergétiques.

### **II.4.2.6. Adoption de matériaux à long terme et résistants à la corrosion.**

Les éléments des robots de nettoyage sont fréquemment soumis à des conditions environnementales difficiles, telles que les rayons UV, les températures extrêmes et la présence de poussière abrasive. Ainsi, il est essentiel que les matériaux employés pour les pièces essentielles, telles que les châssis et les brosses, soient résistants à la corrosion et légers. À titre d'exemple, l'emploi de composites polymères renforcés ou d'alliages d'aluminium permet de prolonger la durée de vie du robot tout en diminuant son poids afin d'améliorer son efficacité énergétique.

### **II.4.2.7. Utilisation de robots modulaires afin de favoriser la souplesse et l'adaptation.**

Les robots modulaires ont été développés pour être ajustés en fonction des exigences particulières de l'installation, que ce soit en ce qui concerne la taille des panneaux, la configuration du site ou le niveau de saleté. Grâce à cette méthode modulaire, les utilisateurs ont la possibilité de personnaliser les robots en ajoutant ou en retirant des éléments en fonction de leurs exigences particulières, ce qui améliore la souplesse et diminue les dépenses de maintenance.

## **II.5. Méthodologie de développement et d'évaluation**

## **Chapitre II : Problématique et solutions proposées dans le contexte du self-nettoyage**

---

### **II.5.1. Planification des étapes de développement du robot nettoyeur de panneaux photovoltaïques**

Il est essentiel d'adopter une approche méthodique pour développer un robot nettoyeur de panneaux photovoltaïques, qui inclut la conception, le prototypage, les tests et l'optimisation continue. Les étapes de développement sont organisées de manière structurée, avec des justifications pour chaque étape, en se référant aux meilleures pratiques dans le domaine de la robotique et des systèmes autonomes. [34]

#### ➤ **Étape 1 : Analyse des exigences et étude de faisabilité**

- **Objectifs**

Repérer les exigences particulières de maintenance des installations photovoltaïques, incluant les différentes formes de saleté, les conditions environnementales et les contraintes de l'installation (telles que l'accès difficile, les pentes, la taille des panneaux). [34]

- **Activités**

Recherche sur les conditions de fonctionnement des panneaux solaires (température, exposition au vent, types de salissures).

Identification des critères essentiels de performance (fréquence de nettoyage, durée de vie du robot, efficacité énergétique).

Évaluation des estimations des dépenses et des contraintes financières

- **Justification**

Cette étape assure que les caractéristiques du robot sont en adéquation avec les exigences opérationnelles et les conditions réelles d'utilisation, ce qui est essentiel pour assurer le succès du développement.

#### ➤ **Étape 2 : Conception préliminaire et sélection des technologies**

- **Objectifs**

Concevoir une première conception du robot qui satisfait aux exigences identifiées et choisir les technologies adéquates.

- **Activités**

Mise en place de modèles de conception et de modèles en 3D.

Choix des éléments mécaniques (brosses, roues, chenilles) ainsi que des technologies (capteurs, caméras, algorithmes d'intelligence artificielle).

## Chapitre II : Problématique et solutions proposées dans le contexte du self-nettoyage

---

L'architecture système (matériel et logiciel) est définie afin d'intégrer les capteurs, les actionneurs et les systèmes de contrôle.

- **Justification**

Une conception réfléchie et le choix des technologies adéquates réduisent les dépenses et les risques associés au développement, tout en optimisant la performance et la longévité du robot.

- **Étape 3 : Prototypage et développement de composants**

- **Objectifs**

Élaborer un prototype opérationnel afin de tester et confirmer la conception du robot.

- **Activités**

Prototypage de composants mécaniques et électroniques. Development of embedded software, including navigation and cleaning algorithms.

Installation du premier prototype et intégration des différents sous-systèmes.

- **Justification**

La mise en place d'un prototype permet de tester rapidement les idées et de repérer les éventuels problèmes avant d'investir dans la production à grande échelle.

- **Étape 4 : Tests et validation en laboratoire**

- **Objectifs**

Évaluer les performances, la fiabilité et la sécurité du prototype dans des conditions contrôlées.

- **Activités**

Test d'autonomie de navigation, de repérage d'obstacles et de systèmes de nettoyage.

Évaluation des émissions d'énergie et de la résistance des éléments.

Analyse et correction des imperfections de conception ou de performance.

- **Justification**

Les essais en laboratoire sont utilisés pour évaluer la faisabilité du robot et vérifier sa conformité aux spécifications de conception avant de réaliser des essais sur le terrain.

- **Étape 5 : Essais sur le terrain**

- **Objectifs**

Évaluer les performances opérationnelles et la solidité du robot dans des conditions réelles.

- **Activités**

## Chapitre II : Problématique et solutions proposées dans le contexte du self-nettoyage

---

Mise en place du prototype sur des installations de test photovoltaïques.  
Observation des résultats du robot en ce qui concerne le nettoyage, la navigation et la gestion énergétique.

Collecte des informations afin de perfectionner les algorithmes et adapter les paramètres du robot.

- **Justification**

Les tests sur le terrain offrent des données essentielles sur les réelles performances du robot et permettent de repérer les modifications requises pour une efficacité optimale.

- **Étape 6 : Optimisation et itération**

- **Objectifs**

Améliorer la conception et les performances du robot en fonction des résultats des tests de laboratoire et sur le terrain.

- **Activités**

Changement des réglages de conception (vitesse, pression de nettoyage, etc.).  
Amélioration des méthodes d'intelligence artificielle afin d'améliorer la navigation et l'efficacité énergétique.

Amélioration des éléments identifiés comme faibles ou peu résistants.

- **Justification**

Le robot doit être constamment optimisé afin de s'adapter aux divers environnements et d'optimiser sa durée de vie et son efficacité opérationnelle.

- **Étape 7 : Production et mise en œuvre à grande échelle**

- **Objectifs**

Mettre en place la production à grande échelle et préparer la mise sur le marché du robot.

- **Activités**

Mise à jour des exigences de production et choix des fournisseurs de composants.  
Création des procédés de production, de vérification de la qualité et de tests de production.

Mise en place de stratégies de marketing et de vente.

- **Justification**

Cette étape permet de passer de la phase de développement à la phase de commercialisation de manière fluide, tout en veillant à ce que le produit final respecte les normes de qualité et de performance.



## Chapitre II : Problématique et solutions proposées dans le contexte du self-nettoyage

---

### ➤ **Étape 8 : Maintenance, support et évolution du produit**

- **Objectifs**

Garantir une maintenance continue et une amélioration du produit une fois qu'il est mis en place sur le marché.

- **Activités**

Création de prestations de soutien technique et de maintenance destinées aux utilisateurs.

Surveillance des résultats sur le terrain et recueil de retours pour les futures mises à jour.

Création de nouvelles versions ou de nouveaux modèles en se basant sur les retours des utilisateurs et les avancées technologiques.

- **Justification**

Il est essentiel d'avoir un soutien post-lancement efficace afin d'assurer la satisfaction des clients, préserver la réputation du produit et favoriser l'adoption à grande échelle.

### **II.5.2. Méthodes d'évaluation de l'efficacité et de la performance du robot nettoyeur de panneaux photovoltaïques**

L'évaluation de l'efficacité et de la performance d'un robot nettoyeur de panneaux photovoltaïques est cruciale pour s'assurer que le robot remplit ses fonctions de manière optimale, durable, et économique. Plusieurs méthodes quantitatives et qualitatives sont utilisées pour mesurer et analyser ses performances dans des conditions de laboratoire et sur le terrain. [32]

#### **II.5.2.1. Évaluation de l'efficacité de nettoyage**

##### ➤ **Objectif**

Mesurer la capacité du robot à éliminer la saleté, la poussière, et les autres débris de la surface des panneaux photovoltaïques.

##### ➤ **Méthodes**

- **Analyse visuelle et inspection photographique** : Utilisation de caméras haute définition ou de capteurs optiques pour prendre des images avant et après le nettoyage pour l'analyse visuelle et l'inspection photographique. Grâce à cette approche, il est possible d'évaluer visuellement la quantité de saleté expédiée et de repérer les zones mal entretenues.

## Chapitre II : Problématique et solutions proposées dans le contexte du self-nettoyage

---

- **Mesure de la transmission de la lumière :**

Mesurer la quantité de lumière solaire qui pénètre dans les cellules photovoltaïques avant et après le nettoyage en utilisant des capteurs de lumière. La transmission de la lumière augmente, ce qui témoigne d'une surface plus propre.

- **Mesure de l'efficacité énergétique**

La performance énergétique des panneaux avant et après le nettoyage est comparée. Lorsque le rendement augmente après le nettoyage, cela témoigne directement de l'efficacité du robot.

### II.5.2.2. Évaluation des performances de navigation et d'autonomie

- **Objectif**

Tester la capacité du robot à naviguer de manière autonome sur différentes surfaces et à éviter les obstacles tout en minimisant la consommation d'énergie.

- **Méthodes**

- **Tests contrôlés de navigation :**

Création d'un parcours d'essai qui simule divers scénarios réels, tels que des pentes, des obstacles et des conditions météorologiques différentes. Les capteurs de navigation tels que le LIDAR et les infrarouges sont employés afin de suivre et évaluer la trajectoire du robot ainsi que sa capacité à éviter les adversités.

- **Suivi de la consommation énergétique :**

La consommation énergétique du robot est constamment suivie afin d'évaluer son efficacité énergétique pendant ses opérations. Cette approche permet de repérer les éléments ou les procédés qui consomment de l'énergie et de les optimiser afin d'améliorer leurs performances.

- **Analyse des temps d'autonomie et de recharge :**

Évaluation de la période pendant laquelle le robot peut fonctionner de manière autonome avant de devoir être rechargé. On évalue également l'efficacité de la recharge solaire ou électrique.

### II.5.2.3. Test de durabilité et de résistance des composants

- **Objectif**

## Chapitre II : Problématique et solutions proposées dans le contexte du self-nettoyage

---

Évaluer la robustesse des composants du robot (brosses, roues, chenilles, capteurs) face aux conditions environnementales difficiles (poussière abrasive, températures élevées, humidité).

### ➤ Méthodes

#### • Tests pour accélérer le vieillissement :

Afin de simuler plusieurs années d'utilisation, les composants sont exposés à des cycles thermiques, à la poussière et à d'autres conditions extrêmes. Ces tests offrent la possibilité d'évaluer l'usure des matériaux et la diminution des résultats.

#### • Tests de résistance aux intempéries :

Évaluation de la résistance de la structure et des composants électroniques du robot à différentes conditions météorologiques (pluie, neige, vent) lors d'une exposition prolongée.

#### • Tests de fatigue mécanique :

Évaluation de la résistance mécanique et de la durée de vie des composants critiques (axes, bras de nettoyage) en utilisant des charges répétitives.

### II.5.2.4. Analyse de l'impact environnemental et de la consommation de ressources

#### ➤ Objectif

Évaluer l'empreinte environnementale du robot nettoyeur, y compris l'utilisation de l'eau, de l'énergie et d'autres ressources.

#### ➤ Méthodes

#### • Mesure de la consommation d'eau

Le robot doit surveiller la quantité d'eau utilisée lors de chaque cycle de nettoyage afin de garantir qu'elle respecte les normes écologiques prévues, en particulier dans les zones arides.

#### • Calcul de l'empreinte carbone :

Évaluation des émissions de CO<sub>2</sub> liées à la production, au transport, à l'utilisation et à l'élimination du robot à travers son cycle de vie.

#### • Évaluation de la consommation d'énergie renouvelable :

Afin de maximiser l'utilisation des énergies renouvelables, il est nécessaire de mesurer la quantité d'énergie solaire utilisée par le robot par rapport à l'énergie traditionnelle.

### II.5.2.5. Évaluation de la facilité d'utilisation et de l'entretien

## Chapitre II : Problématique et solutions proposées dans le contexte du self-nettoyage

---

### ➤ Objectif

Mesurer la facilité d'utilisation du robot par les opérateurs, ainsi que les besoins de maintenance.

### ➤ Méthodes

#### • Tests de convivialité :

Analyse des échanges entre les utilisateurs et le robot lors de l'installation, du démarrage et des opérations de traitement. Il est également possible d'utiliser des questionnaires de satisfaction des utilisateurs afin de collecter des informations qualitatives sur la facilité d'utilisation.

#### • Analyse des besoins de maintenance :

Pour évaluer la durabilité et les coûts liés à l'entretien du robot, il est nécessaire de suivre les interventions de maintenance nécessaires, telles que les réparations et les remplacements de composants.

### II.5.2.6. Évaluation économique et analyse de rentabilité

### ➤ Objectif

Analyser le coût total de possession du robot, y compris les coûts d'achat, d'installation, d'exploitation et de maintenance, et comparer ces coûts aux gains énergétiques obtenus grâce à un meilleur nettoyage.

### ➤ Méthodes

#### • Calcul du retour sur investissement (ROI) :

Analyse des dépenses totales et des bénéfices obtenus grâce à l'augmentation de la production d'énergie solaire grâce à l'utilisation du robot.

#### • Analyse du coût du cycle de vie :

Évaluation du coût global pour la durée de vie estimée du robot, comprenant l'acquisition, la maintenance, la consommation d'énergie et les éventuels frais de remplacement des composants.

## II.6. Conclusion provisoire

L'entretien efficace des panneaux photovoltaïques est essentiel pour maximiser leur rendement énergétique et assurer leur rentabilité sur le long terme. Cependant, l'accumulation

## **Chapitre II : Problématique et solutions proposées dans le contexte du self-nettoyage**

---

de saleté et de débris pose des défis significatifs, notamment une baisse de l'efficacité de conversion solaire, des coûts élevés de maintenance, et des problèmes de sécurité liés au nettoyage manuel. Dans ce contexte, diverses solutions de self-nettoyage ont été explorées pour répondre à ces enjeux.

Les technologies actuelles, comme les revêtements hydrophobes, les systèmes automatisés à eau ou à air, offrent des améliorations significatives mais présentent également des limitations. Elles sont souvent confrontées à des défis liés à l'efficacité dans des conditions environnementales variées, à des coûts d'exploitation élevés, ou à des besoins en infrastructure supplémentaires.

Pour répondre à ces limites, des solutions innovantes telles que les robots de nettoyage autonomes, les approches hybrides combinant plusieurs technologies. Ces technologies visent à améliorer l'efficacité du nettoyage, réduire les coûts d'exploitation, minimiser l'impact environnemental, et augmenter la durabilité et l'adaptabilité des solutions de self-nettoyage dans divers environnements.

Les recherches futures doivent se concentrer sur l'optimisation de ces solutions, notamment par le développement de nouveaux matériaux, l'amélioration des systèmes robotiques, et l'évaluation à grande échelle des technologies proposées. Une approche intégrée qui combine efficacité, durabilité, et rentabilité pourrait fournir une réponse viable et durable aux défis posés par le nettoyage des panneaux photovoltaïques.

En conclusion, les perspectives de recherche dans le domaine du self-nettoyage des panneaux photovoltaïques sont vastes et prometteuses. L'exploration continue de nouvelles technologies, l'évaluation sur le terrain, l'optimisation énergétique, et l'analyse économique approfondie sont essentielles pour développer des solutions durables et rentables. Par une approche interdisciplinaire et collaborative, il sera possible de surmonter les défis actuels et de contribuer de manière significative à l'amélioration de l'efficacité énergétique des installations solaires, renforçant ainsi leur rôle dans la transition vers des énergies renouvelables plus propres.

## **Chapitre III**

**Conception mécanique et  
planification de la trajectoire du  
robot cleaner**

### III. 1. Introduction

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur la conception de notre robot afin de surmonter les principaux défis techniques dans un environnement de panneaux photovoltaïques inclinés. Nous avons rencontré plusieurs problèmes qui appellent des solutions innovantes. Nous commencerons par le problème du glissement du robot sur les panneaux, car la stabilité du robot est fortement mise à l'épreuve lorsque les panneaux sont inclinés. Pour améliorer l'adhérence et la stabilité sur ces surfaces, nous envisagerons diverses solutions, notamment l'étude des matériaux utilisés dans ses roues ou ses ailes, et l'ajout de mécanismes spéciaux pour augmenter la friction.

En outre, nous relèverons des défis tels que l'assurance que le robot ne bascule pas lors de la descente, ce qui nécessite une conception intelligente de la commande de mouvement, et l'effet d'un poids déséquilibré sur la surface du robot, qui peut entraver son mouvement et sa stabilité. Nous aborderons également la question du choix de la trajectoire optimale pour nettoyer les panneaux solaires de manière efficace et précise.

Nous examinerons également des solutions techniques avancées telles que l'ajout de capteurs gyroscopiques et d'accéléromètres pour ajuster le centre de gravité et assurer la stabilité, ainsi que des modifications structurelles telles que la redistribution des masses et l'utilisation de contrepoids. L'objectif est d'optimiser les performances des robots et d'assurer une couverture complète et efficace de la surface du panneau solaire.

En résumé, ces défis seront analysés en profondeur dans cet article, avec des solutions innovantes pour assurer la continuité et l'efficacité des systèmes d'énergie solaire. [1]

### III. 2. Le Glissement

Afin d'éviter le glissement du robot, nous étudions dans cette section les différentes forces agissant sur celui-ci. Nous évaluerons leur impact en utilisant les lois fondamentales du mouvement

Les forces agissant sur un corps en mouvement sont

- Le poids du corps ( $\vec{W} = mg$ ) et noter que le vecteur poids pointe verticalement vers le bas.

## Chapitre III : Conception mécanique et planification de la trajectoire du robot cleaner

---

- La force exercée par le corps perpendiculairement au plan est la force de réaction ( $\vec{N}$ ).

Nous pouvons constater que les forces ( $\vec{W}$ ) et ( $\vec{N}$ ) ne sont pas équilibrées et que le corps commence à glisser.

Si l'on décompose le poids en composantes verticale et horizontale, on constate que :

- La composante parallèle au plan est :  $W_x = W \sin \theta$
- La composante perpendiculaire au plan est :  $W_y = W \cos \theta$

Nous pouvons facilement constater que les deux forces sont égales en magnitude et opposées en direction, c'est-à-dire que la résultante de ces forces est nulle.

### III. 2. 1. Sans forces de frottement

La force  $P_x$  est la force qui accélère l'objet en appliquant la deuxième loi de Newton.

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \quad (\text{III.1})$$

$$\vec{W} + \vec{R} = m\vec{a} \quad (\text{III.2})$$

$$W_x + W_y + \vec{N} = m\vec{a} \quad (\text{III.3})$$

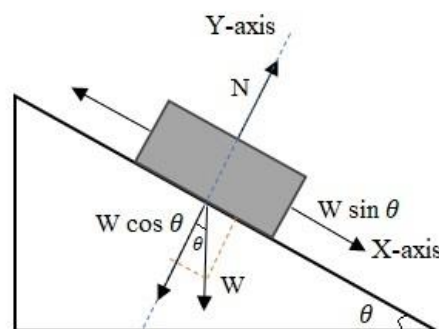
Projection sur l'axe du mouvement Ox

$$W_x = m_{ax} \quad (\text{III.4})$$

$$W_y = 0 \quad (\text{III.5})$$

$$W \sin \theta = m_{ax} \quad (\text{III.6})$$

$$ax = g \sin \theta \quad (\text{III.7})$$





**Figure III. 1.** Mouvement du robot sur une surface inclinée sans forces de frottement

L'accélération est directement proportionnelle à  $\sin \theta$ , ce qui signifie que plus l'accélération est grande, plus  $\sin \theta$  est grand, et plus l'angle d'inclinaison de la surface inclinée est grand, plus l'accélération de l'objet est grande.

$$v(t) = at + v_0 \quad (\text{III.8})$$

$$v(t) = at \quad (\text{III.9})$$

$$v(t) = (g \sin \theta)t \quad (\text{III.10})$$

$$X(t) = \frac{1}{2} at^2 + V_0 t + x_0 \quad (\text{III.11})$$

$$X(t) = \frac{1}{2} at^2 \quad (\text{III.12})$$

### III. 2. 2. Avec forces de frottement

En appliquant la deuxième loi de Newton

$$\sum \vec{F} = m\vec{a} \quad (\text{III.13})$$

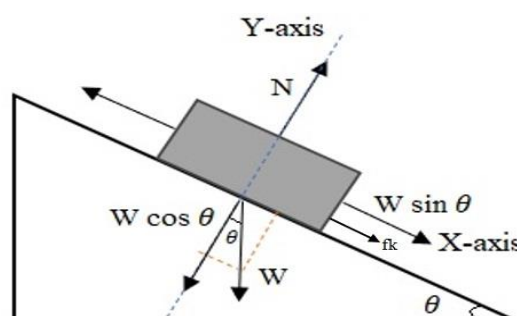
$$\vec{W} + \vec{N} + \vec{f} = m\vec{a} \quad (\text{III.14})$$

Projection sur l'axe du mouvement Ox

$$W \sin \theta + 0 + f = ma \quad (\text{III.15})$$

$$ax = (mg \sin \theta)/m - f/m \quad (\text{III.16})$$

$$ax = g \sin \theta - f/m \quad (\text{III.17})$$



## Chapitre III : Conception mécanique et planification de la trajectoire du robot cleaner

---

**Figure III. 2.** Mouvement du robot sur une surface inclinée sans forces de frottement

La force de frottement nuit à l'accélération

$$v(t) = at + v_0 \quad (\text{III.18})$$

$$v(t) = at \quad (\text{III.19})$$

$$X(t) = \frac{1}{2} at^2 \quad (\text{III.20})$$

Coefficient de frottement nécessaire pour qu'il se déplace

$$mg \sin \theta > f \quad (\text{III.21})$$

$$mg \sin \theta > f_{s(\max)} \quad (\text{III.22})$$

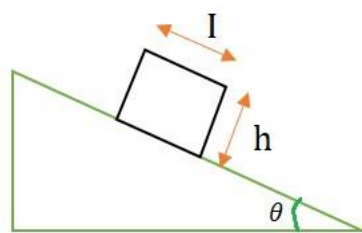
$$mg \sin \theta > \mu_s N \quad (\text{III.23})$$

$$mg \sin \theta > \mu_s + mg \cos \theta \quad (\text{III.24})$$

$$\tan \theta > \mu_s \quad (\text{III.25})$$

### III. 3. Le Basculement

Un robot de longueur « I » et de hauteur « h » est placé au repos sur un plan incliné grossier



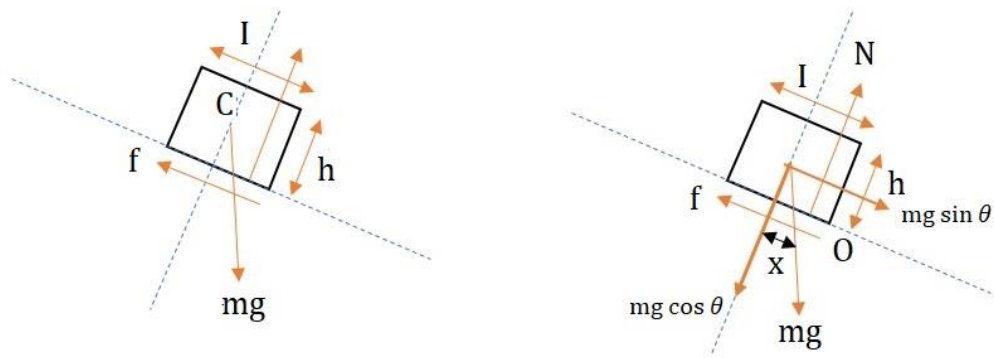
**Figure III. 3.** Les dimensions du robot en cas de basculement

➤ **Forces sur le robot :**

- $mg$  (Forces des poids).
- $N$  (Réaction normale).
- $F$  (Forces de frottement).

## Chapitre III : Conception mécanique et planification de la trajectoire du robot cleaner

Les forces de réaction normales ne passent pas par le centre du robot C. Elles se déplacent à travers X de telle sorte qu'elles produisent un couple opposé autour de C qui équilibre le couple produit par le frottement.



**Figure III. 4.** Représentation des forces sur un robot en cas de basculement

➤ **La tendance du blocage :**

- Glisser vers le bas
- Tourner autour de O

➤ **Pour l'équilibre en translation**

$$f = mg \sin \theta \quad (\text{III.26})$$

$$N = mg \cos \theta \quad (\text{III.27})$$

➤ **Pour l'équilibre en rotation**

Couple dû à f autour de C = couple dû à N autour de C

$$\frac{fh}{2} = N_x \quad (\text{III.28})$$

$$f \frac{h}{2} = mg \cos \theta x \quad (\text{III.29})$$

$$f = 2mg \cos \theta \frac{x}{h} \quad (\text{III.30})$$

➤ pour le basculement

$$x = \frac{1}{2} \quad (\text{III.31})$$

$$f = 2mg \cos \theta \frac{1}{h} \quad (\text{III.32})$$

➤ le robot ne glisse pas

$$f < \mu N \quad (\text{III.33})$$

$$mg \sin \theta \leq \mu mg \cos \theta \quad (\text{III.34})$$

$$\tan \theta \leq \mu \quad (\text{III.35})$$

➤ le robot bascule avant de glisser

$$f \leq \mu mg \cos \theta \quad (\text{III.36})$$

$$2mg \cos \theta \frac{x}{h} \leq \mu mg \cos \theta \quad (\text{III.37})$$

$$\frac{1}{h} \leq \mu \quad (\text{III.38})$$

**Donc**

- Si  $\mu < \frac{1}{h}$  alors le robot a tendance à glisser vers le bas avant de basculer.
- Si  $\mu \geq \frac{1}{h}$  alors le robot a tendance à basculer avant de glisser.
- Si  $\mu < \tan \theta$  alors bloquer glisser vers le bas.
- Si  $\mu > \tan \theta$  et  $\mu \geq \frac{1}{h}$  alors le robot bascule.

### III. 4. Optimisation du Mouvement des Robots à Quatre Roues

### III. 4. 1. Problème d'Inégalité de Vitesse des Roues

Le problème est l'inégalité de la vitesse de rotation des roues, certaines d'entre elles se déplaçant plus vite que d'autres, ce qui entraîne des mouvements irréguliers et l'incapacité du robot à réaliser des mouvements fluides et coordonnés. Cette disparité de vitesse est souvent due à un déséquilibre dans la répartition de la charge sur les roues. Lorsque la charge sur une roue est plus importante que sur l'autre, celle-ci se déplace à une vitesse relativement plus lente, ce qui entraîne une perte d'équilibre et fausse le mouvement prévu du robot.

Pour résoudre ce problème, il est nécessaire d'étudier soigneusement la répartition de la charge et de concevoir un système qui distribue le poids uniformément sur les roues. Cela implique l'utilisation de techniques avancées pour ajuster la distribution du poids et optimiser la réponse des roues aux variations de charge.

En résumé, la question du mouvement erratique des robots à quatre roues implique des défis techniques qui doivent être relevés avec précision pour garantir un mouvement fluide et cohérent. Cette question est un élément essentiel de la conception robotique et nécessite des stratégies innovantes pour obtenir des performances optimales.

Pour illustrer cela, nous avons effectué une simulation dans MATLAB.

Ce type de simulation permet aux utilisateurs d'étudier le comportement des moteurs électriques à courant continu dans (**Figure III.5**) et de comprendre l'impact de différentes variables sur leurs performances. Dans cet article, nous expliquerons en détail le circuit de simulation d'un moteur électrique à courant continu et comment analyser les résultats de la simulation pour chaque cas individuel.

# Chapitre III : Conception mécanique et planification de la trajectoire du robot cleaner

## III. 4. 2. Simulation dans MATLAB

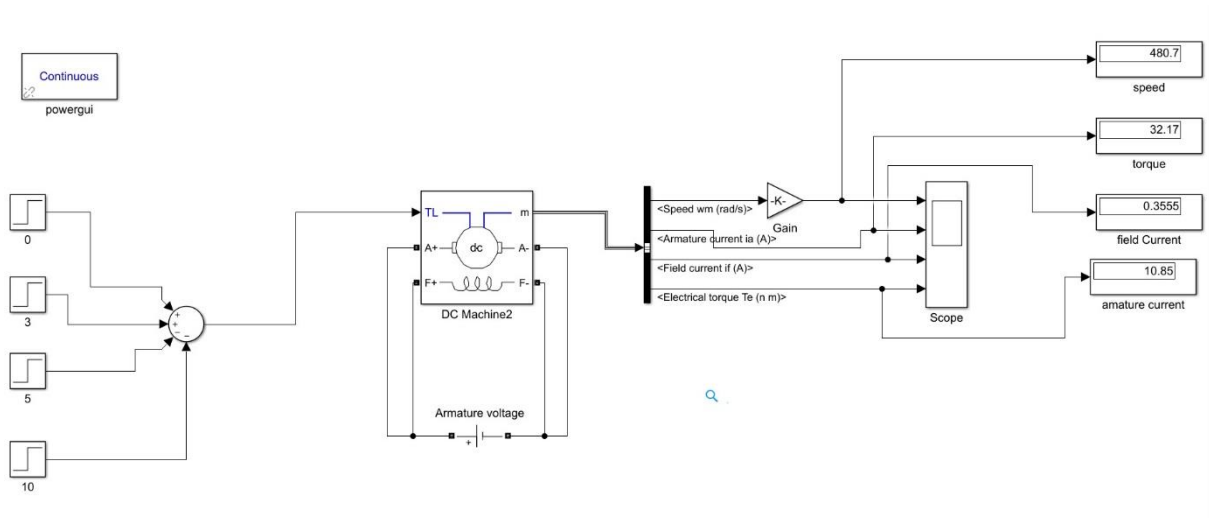


Figure III. 5. Montage moteur DC

### III. 4. 2. 1. Les composants du circuit

Les composants	quantité	Paramètres
DC Machine (Machine à courant continu)	1	Nécessite une entrée de tension continue pour fonctionner. Les paramètres tels que la résistance interne et l'inductance peuvent être ajustés pour améliorer la précision du modèle.
DC Voltage source (Source de tension continue)	1	La tension appliquée détermine principalement la vitesse et le couple du moteur.
Power gui (Gestion de l'alimentation)	1	Le mode de fonctionnement (comme l'analyse temporelle ou l'analyse harmonique) peut être ajusté via ce bloc.
Scope (Portée)	4	Aide à analyser les performances instantanées du moteur et à identifier les points faibles ou les pertes.

## Chapitre III : Conception mécanique et planification de la trajectoire du robot cleaner

display (Affichage)	4	---
SUM (Somme)	1	<b>Contribue au calcul des différences entre les différents signaux, tels que la perte de couple due au frottement et aux pertes.</b>
Step (Étape)	5	<b>Aide à étudier l'impact des changements instantanés sur la stabilité et la réponse du système.</b>
Bus Selector (Sélecteur de bus)	1	<b>Aide à simplifier le circuit et à organiser les signaux de manière plus efficace.</b>
Gain	1	<b>Utilisé pour ajuster la valeur des signaux</b>

### III. 4. 2. 2. Equations

$$T_s = T_{out} + T_L \quad (\text{III.39})$$

$$\text{Power } (P_{out}) = T_L * \omega \quad (\text{III.40})$$

$$T_L = \frac{P_{out}}{\omega} \quad (\text{III.41})$$

$$P_{out} = 5HP = 5 * 746 = 373 \text{ Watts} \quad (\text{III.42})$$

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (\text{III.43})$$

$$\omega = \frac{2\pi * 1750}{60} = 183.16 \text{ rad/s} \quad (\text{III.44})$$

$$T_L = \frac{3730}{183.16} \quad (\text{III.45})$$

$$T_L = 20.36 \text{ Nm} \quad (\text{III.46})$$

$$\frac{T_L}{2} = 10.18 \text{ Nm} \quad (\text{III.47})$$

$$\frac{T_L}{4} = 5.09 \text{ Nm} \quad (\text{III.48})$$

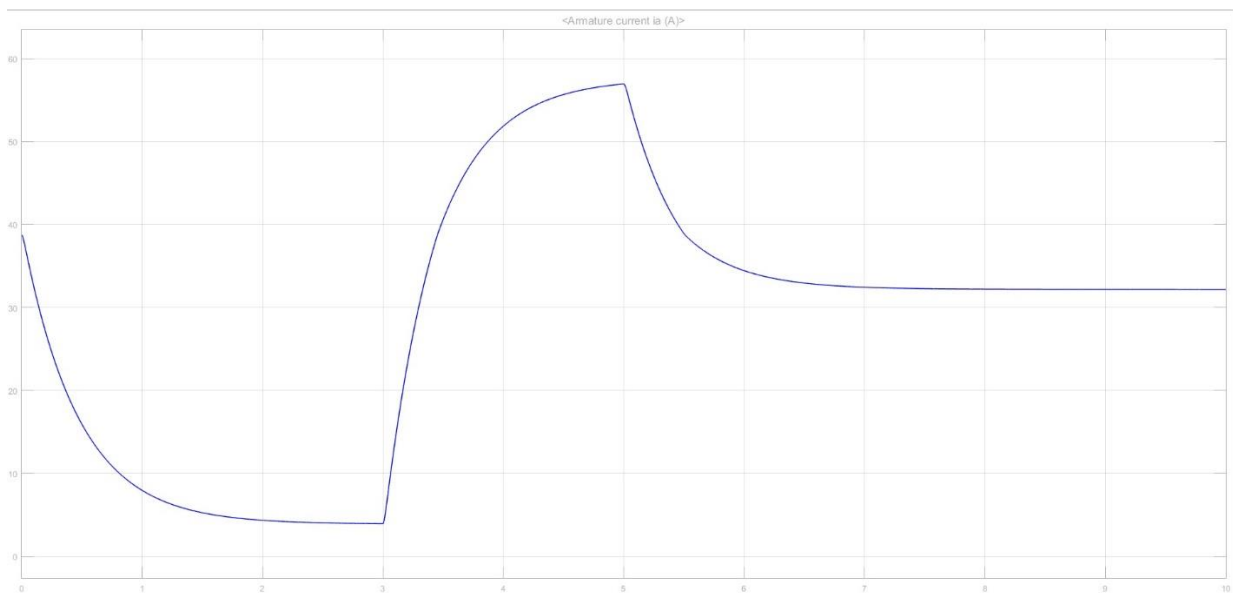
$T_s$  Couple mécanique brut ou couple moteur.

$T_{out}$  Perte de couple due au frottement, à l'enroulement et aux pertes de fer.

$T_L$  Couple de charge.

### III. 4. 3. Analyser les résultats de la simulation

#### III. 4. 3. 1. Évolution du courant de l'induit d'un Moteur DC sous Différentes Charges



**Figure III. 6.** Courant d'induit ia (A).

Le graphique montre le courant de l'induit ( $i_a$ ) en ampères (A) pour un moteur à courant continu sous l'effet de charges variables au fil du temps. Au début, le moteur tire un courant élevé en raison de l'absence de force électromotrice (EMF) et du couple nécessaire pour surmonter l'inertie. Ensuite, le courant diminue progressivement entre 0 et 3 secondes, indiquant que le moteur fonctionne avec une charge légère ou sans charge. Le courant augmente ensuite brusquement entre 3 et 5 secondes en raison de l'augmentation de la charge, car le moteur a besoin de plus de courant pour maintenir le couple et la vitesse. Après avoir atteint un pic vers 5 secondes, le courant commence à diminuer, indiquant une réduction de la charge ou la stabilisation des performances. Le courant se stabilise ensuite après 6 secondes, ce qui montre que le moteur fonctionne sous une charge constante, probablement un quart de

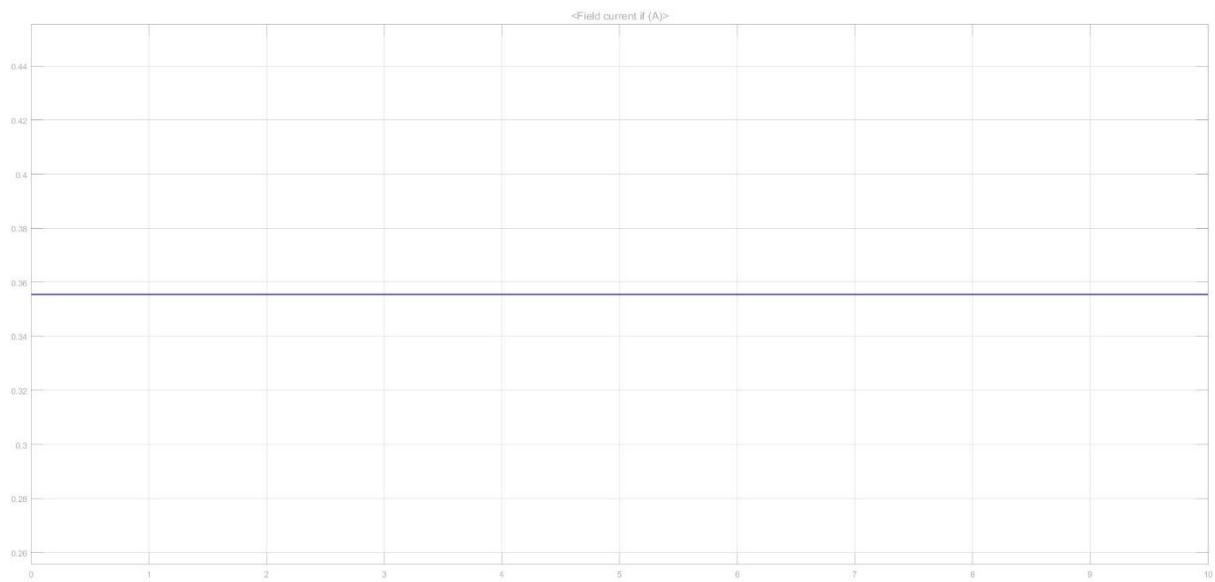


## Chapitre III : Conception mécanique et planification de la trajectoire du robot cleaner

---

la charge maximale. Le graphique illustre comment le courant du moteur s'adapte aux variations de charge sur différentes périodes de temps.

### III. 4. 3. 2. Évolution du courant d'excitation d'un Moteur DC sous Différentes Charges



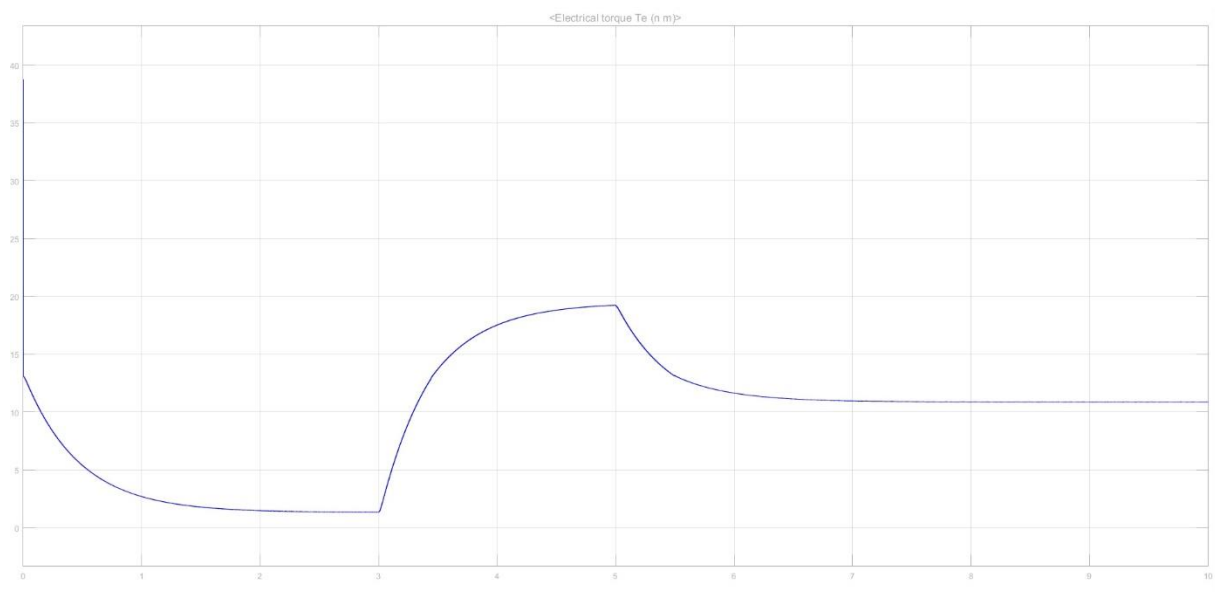
**Figure III.7.** Courant d'excitation (if) A.

Ce graphique montre le comportement du courant d'excitation (if) en ampères (A) au fil du temps pour un moteur à courant continu. Le graphique indique un courant d'excitation constant et stable pendant toute la période. La ligne horizontale suggère qu'il n'y a aucune variation du courant d'excitation, ce qui signifie qu'il reste inchangé, indépendamment des changements dans la charge du moteur ou des conditions de fonctionnement.

Cette constance du courant d'excitation est typique des moteurs à courant continu à excitation séparée ou en dérivation, où l'enroulement de champ est alimenté indépendamment du circuit de l'induit. Le courant d'excitation stable assure un champ magnétique constant, ce qui contribue à un fonctionnement régulier du moteur.

Dans ce cas, le graphique reflète que l'excitation (le courant de champ) ne fluctue pas et reste autour de 0,36 A, garantissant que le champ magnétique produit par l'enroulement de champ reste constant pendant le fonctionnement du moteur.

### III. 4. 3. 3. Évolution du Couple Électrique d'un Moteur DC sous Différentes Charges



**Figure III.8.** Couple électrique  $T_e$  (n.m).

Le graphique présente l'évolution du couple électrique ( $T_e$ ) en Newton-mètres (n·m) pour un moteur à courant continu en fonction du temps. Initialement, le couple est élevé pour surmonter l'inertie du moteur et le démarrer, puis il chute rapidement à mesure que le moteur accélère, indiquant une faible charge ou l'absence de charge. Ensuite, vers 3 secondes, une augmentation soudaine du couple reflète l'application d'une charge plus élevée, nécessitant plus de courant dans l'induit. Après cette augmentation, le couple commence à diminuer progressivement, suggérant une réduction de la charge ou un nouvel équilibre de fonctionnement, avant de se stabiliser à une valeur plus faible mais constante. Ce comportement illustre la relation entre le couple et les variations de la charge appliquée au moteur.

### III. 4. 3. 4. Discussion

Dans la simulation et la conception d'un moteur à courant continu sous différents couples de charge dans MATLAB, nous observons des changements distincts dans le courant d'induit et la vitesse du moteur en fonction de la charge appliquée. En l'absence de charge, le courant d'induit est minimal car le moteur n'a besoin de surmonter que la friction interne et l'inertie, ce qui entraîne une faible consommation de courant. Lorsque la charge augmente à un quart et à la moitié de la charge maximale, le courant d'induit augmente, car un couple plus important est nécessaire pour surmonter la résistance mécanique. À pleine charge, le courant d'induit atteint son maximum, reflétant le besoin de couple maximal. En ce qui concerne la vitesse du

## Chapitre III : Conception mécanique et planification de la trajectoire du robot cleaner

---

moteur, celui-ci fonctionne à sa vitesse maximale en l'absence de charge en raison de la faible résistance. À mesure que la charge augmente, la vitesse du moteur diminue car la résistance mécanique provoque une plus grande chute de tension dans la résistance de l'induit, réduisant ainsi la force contre-électromotrice. Cela se traduit par une baisse progressive de la vitesse à mesure que la charge augmente, passant de l'absence de charge à la pleine charge. La simulation illustre clairement la relation entre le couple de charge, le courant d'induit et la vitesse du moteur, soulignant l'importance de sélectionner des spécifications de moteur appropriées en fonction des conditions de charge variables dans les applications pratiques.

### III. 4. 4. La solution

Pour résoudre le problème des changements soudains de charge et assurer la sécurité des mouvements du robot la technologie du gyroscope MPU6050 peut être utilisée.

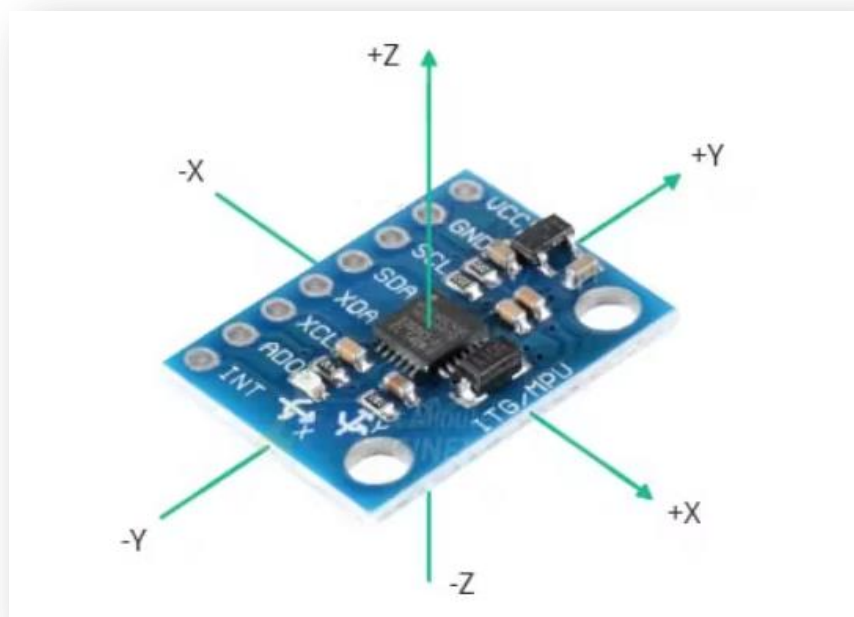


Figure III. 9. MPU6050 Gyroscope

#### III. 4. 4. 1. Gyroscope MPU6050

Gyroscope MPU6050 est un capteur moderne et intégré utilisé pour mesurer l'accélération et la rotation sur trois axes. Sa grande précision et sa capacité à fournir des mesures précises en temps réel en font un outil indispensable pour la robotique et le contrôle

## **Chapitre III : Conception mécanique et planification de la trajectoire du robot cleaner**

---

des mouvements. Le gyroscope MPU6050 possède un accéléromètre 3D et un gyroscope 3D, ce qui lui permet de mesurer l'accélération angulaire et l'accélération linéaire avec une grande précision.

### **III. 4. 4. 2. Importance du MPU6050**

L'utilisation du gyroscope MPU6050 minimise les effets négatifs tels que l'usure mécanique causée par des changements soudains de tension ou de charge, augmentant ainsi la durée de vie du moteur et des autres pièces mécaniques du robot. La haute résolution du gyroscope garantit des données de qualité qui peuvent être utilisées pour analyser et optimiser les performances du robot et développer des conceptions futures plus efficaces.

### **III. 4. 4. 3. Discussions**

En fin de compte, l'intégration du gyroscope MPU6050 dans un système robotique améliore non seulement ses performances et sa stabilité, mais aussi sa sécurité et sa fiabilité. Cette intégration rend le robot plus adaptable aux différentes conditions opérationnelles et aux défis environnementaux, augmentant ainsi son efficacité et sa fiabilité dans la réalisation de ses objectifs.

## **III. 5. Choix de la Trajectoire Idéale pour les Robots de Nettoyage des Panneaux Solaires**

Le choix de la trajectoire optimale de ces robots est essentiel pour assurer une couverture complète tout en minimisant la consommation d'énergie et les interférences. Nous examinerons en détail les robots de nettoyage des panneaux solaires et analyserons quatre trajectoires principales : **La trajectoire en spirale, la trajectoire verticale, la trajectoire horizontale** et la diffusion cellulaire spéciale. Nous discuterons du fonctionnement de chaque trajectoire, de ses avantages et de ses défis, en mettant l'accent sur l'obtention des meilleures performances et d'une efficacité maximale pour le nettoyage des panneaux solaires. [36]

### **III. 5. 1. Analyse des différents chemins empruntés par un robot pour nettoyer les panneaux solaires**

#### **III. 5. 1. 1. Balayage d'une ligne en spirale**

## Chapitre III : Conception mécanique et planification de la trajectoire du robot cleaner

---

Le balayage en spirale est une méthode qui consiste à déplacer le robot en spirale, en partant d'un point central ou défini et en se déplaçant progressivement vers l'extérieur en décrivant des cercles successifs. Cette approche garantit que le robot couvre la totalité de la surface au fil du temps et permet de nettoyer efficacement les grandes et moyennes surfaces sans avoir à changer fréquemment de direction. Cette trajectoire repose sur le déplacement fluide du robot entre les lignes de spirales successives, ce qui minimise les pauses et augmente l'efficacité du nettoyage. [35-36]

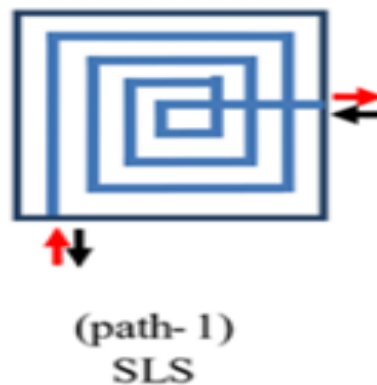


Figure III. 10. Balayage d'une ligne en spirale [50]

➤ **Avantage :**

- Assure une couverture complète de la surface sans nécessiter de fréquents changements de direction.
- Très efficace sur le plan énergétique grâce à la transition en douceur entre les lignes en spirale.
- Facile à programmer pour les robots de nettoyage par rapport à des pistes plus complexes.

➤ **Inconvénients :**

- Il est inefficace sur les très grandes surfaces car il met plus de temps à atteindre les bords.
- Il est difficile de nettoyer complètement les coins et les bords avec cette piste.

### III. 5. 1. 2. Balayage de la ligne verticale

La trajectoire verticale est une approche dans laquelle le robot se déplace en lignes verticales successives de haut en bas ou vice versa, couvrant progressivement la surface. Le

## Chapitre III : Conception mécanique et planification de la trajectoire du robot cleaner

---

robot part d'une extrémité de la surface et se déplace en ligne droite jusqu'à l'autre extrémité, puis revient au point de départ pour commencer une nouvelle ligne parallèle à la précédente. Ce schéma permet au robot de couvrir la surface de manière uniforme et systématique. [35-36]

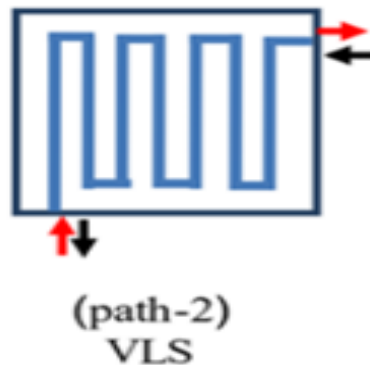


Figure III. 11. Balayage de la ligne verticale [50]

### ➤ Avantages :

- Cette trajectoire permet de couvrir la surface très rapidement, surtout si le robot est capable de se déplacer rapidement entre les lignes verticales.
- Elle est simple à mettre en œuvre et s'aligne bien sur la conception des panneaux solaires orthogonaux, ce qui la rend facile à programmer et à utiliser.
- Cette trajectoire permet au robot de se déplacer de manière ordonnée et systématique, ce qui minimise la probabilité de laisser une partie de la surface non nettoyée.

### ➤ Inconvénients :

- Mouvements répétitifs lors du nettoyage de grandes surfaces, ce qui entraîne une plus grande consommation d'énergie.
- Entraîne un chevauchement des zones nettoyées, ce qui entraîne une consommation excessive d'énergie et de temps.
- Moins efficace pour nettoyer les coins et les bords que les autres pistes.

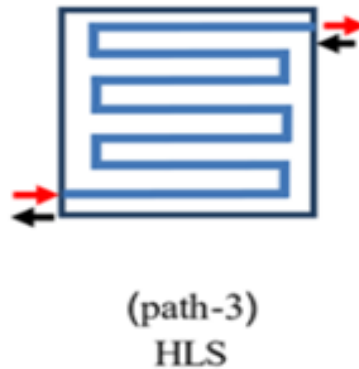
### III. 5. 1. 3. Balayage de la ligne horizontale

Le balayage horizontal est une approche dans laquelle le robot se déplace en lignes horizontales successives de gauche à droite ou vice versa. Le robot commence à une extrémité de la surface et se déplace en ligne droite jusqu'à l'extrémité opposée, puis revient au point de

## Chapitre III : Conception mécanique et planification de la trajectoire du robot cleaner

---

départ pour commencer une nouvelle ligne parallèle à la précédente. Ce schéma permet au robot de couvrir la surface de manière uniforme et efficace. [36-37]



**Figure III. 12.** Balayage de la ligne horizontale [50]

➤ **Avantages :**

- Nettoie efficacement les grandes surfaces et permet un nettoyage continu sans nécessiter d'arrêts fréquents.
- Convient à tous les types de surfaces, qu'elles soient horizontales ou diagonales.
- La piste horizontale est simple à programmer.

➤ **Inconvénients :**

- Demande plus d'énergie pour changer de direction lorsque l'on atteint la fin de la surface.
- Il est inefficace dans les zones étroites qui nécessitent un mouvement précis.
- Le nettoyage des surfaces très longues prend plus de temps en raison du nombre de lignes horizontales nécessaires.

### III. 5. 1. 4. Diffusion cellulaire spéciale

La diffusion cellulaire spéciale est une approche dans laquelle le robot se déplace selon un schéma personnalisé pour couvrir des cellules ou des zones spécifiques de la surface de manière distribuée. Cette approche consiste à diviser la surface en petites cellules et à

## Chapitre III : Conception mécanique et planification de la trajectoire du robot cleaner

---

personnaliser le robot pour qu'il nettoie chaque cellule individuellement sur la base d'algorithmes spécifiques afin d'assurer une couverture optimale. [37]

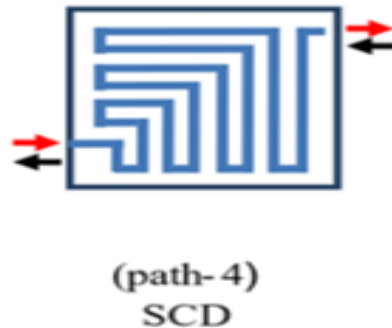


Figure III. 13. Diffusion cellulaire spéciale [50]

➤ **Avantages :**

- Couverture optimale des surfaces irrégulières et minimisation des mouvements répétitifs grâce au modèle de nettoyage distribué.
- Minimise la consommation d'énergie et de temps grâce au modèle de mouvement calculé.
- Nettoie les zones complexes et les coins difficiles avec une grande efficacité.

➤ **Inconvénients :**

- Nécessite une programmation plus complexe que les autres pistes.
- Nécessite l'utilisation d'algorithmes complexes pour assurer une couverture complète sans oublier aucune zone.
- Le coût global du développement du système peut augmenter en raison de la complexité logicielle et technologique requise.

### III .5. 2. Analyse des résultats et stratégies de planification des itinéraires

D'après les études et les évaluations, les voies de nettoyage des panneaux solaires varient en efficacité et en complexité. Une trajectoire en spirale présente l'avantage de couvrir toute la surface avec une transition douce entre les boucles, mais peut ne pas être efficace sur de très grandes surfaces et dans les coins.

Les trajectoires verticales et horizontales, en revanche, sont faciles à mettre en œuvre et conviennent aux surfaces régulières, bien que leur efficacité puisse être affectée par des mouvements répétitifs ou des changements de direction fréquents.



## **Chapitre III : Conception mécanique et planification de la trajectoire du robot cleaner**

---

La propagation cellulaire privée est conçue pour obtenir une couverture optimale des surfaces irrégulières, mais elle nécessite une programmation plus complexe et peut être plus coûteuse à mettre en œuvre. [35-36-37]

### **III. 5. 2. 1. Comparaison entre la voie verticale et la voie horizontale**

#### **➤ Couverture complète**

La trajectoire verticale convient aux grandes surfaces en raison de la capacité du robot à se déplacer rapidement entre les lignes verticales, mais elle peut être moins efficace sur les grandes surfaces en raison des mouvements répétitifs. En revanche, la trajectoire horizontale permet une couverture rapide et efficace des grandes surfaces planes, ce qui permet un nettoyage efficace et rapide des grandes surfaces.

#### **➤ Consommation d'énergie**

La trajectoire verticale augmente la consommation d'énergie en raison des déplacements fréquents entre les lignes verticales, tandis que la trajectoire horizontale est plus économe en énergie en raison des déplacements moins fréquents entre les lignes horizontales [38].

### **III. 5. 2. 2. Comparaison entre la trajectoire en spirale et l'épandage cellulaire**

#### **➤ Couverture complète**

La trajectoire en spirale offre une excellente couverture des petites et moyennes surfaces, avec un mouvement fluide entre les anneaux, ce qui maximise l'efficacité du nettoyage. En revanche, la diffusion cellulaire offre une couverture optimale des surfaces irrégulières grâce à un schéma de déplacement soigneusement calculé.

#### **➤ Complexité d'exécution**

La trajectoire en spirale est plus facile à mettre en œuvre et nécessite moins de programmation que l'étalement cellulaire, qui requiert des algorithmes avancés pour éviter les interférences et assurer une couverture complète. [38-39]

### **III. 5. 2. 3. Le meilleur résultat pour la piste de nettoyage des panneaux solaires**

Sur la base de la comparaison des quatre pistes différentes, il est clair que la piste verticale est la meilleure option pour le nettoyage des panneaux solaires. La piste verticale couvre bien les

## **Chapitre III : Conception mécanique et planification de la trajectoire du robot cleaner**

---

grandes surfaces et se caractérise par la capacité du robot à se déplacer rapidement entre les lignes verticales, ce qui la rend adaptée aux surfaces nécessitant une couverture rapide et efficace. Elle contribue également à réduire la consommation d'énergie par rapport aux autres pistes, ce qui en fait le choix idéal pour les applications de nettoyage de panneaux solaires à grande échelle. Sur la base de la comparaison des quatre pistes différentes, il est clair que la piste verticale est la meilleure option pour le nettoyage des panneaux solaires. La piste verticale couvre bien les grandes surfaces et se caractérise par la capacité du robot à se déplacer rapidement entre les lignes verticales, ce qui la rend adaptée aux surfaces nécessitant une couverture rapide et efficace. Elle contribue également à réduire la consommation d'énergie par rapport aux autres pistes, ce qui en fait le choix idéal pour les applications de nettoyage de panneaux solaires à grande échelle.

### **III. 6. Conclusion**

Nous avons examiné en détail ces défis, notamment la nécessité pour le robot de maintenir sa stabilité lors de l'escalade de panneaux solaires inclinés, de prévenir le basculement lors de la descente, et de gérer le poids mal équilibré qui peut compromettre le mouvement et la stabilité du robot. De plus, nous avons exploré comment choisir le chemin optimal pour un nettoyage efficace et sûr des panneaux solaires constitue un autre défi crucial à relever.

En intégrant des solutions avancées comme le gyroscope MPU6050, nous avons mis en lumière comment ces dispositifs de précision peuvent mesurer en temps réel l'accélération et la rotation, permettant au système de s'adapter rapidement aux changements de charge et d'ajuster efficacement la vitesse et le couple du moteur. Cette approche aide non seulement à minimiser les risques d'usure mécanique et d'incident, mais elle contribue également à augmenter la durée de vie du moteur et à améliorer la fiabilité globale du système dans diverses conditions de fonctionnement.

En étudiant également les différents modes de fonctionnement du moteur - fonctionnement à vide, à charge constante, à charge variable et variation de la tension appliquée- nous avons compris l'importance critique de chaque cas sur la performance et la stabilité du robot. Chaque scénario nécessite une réponse adaptative et une gestion précise pour assurer un fonctionnement optimal du moteur et du système de nettoyage des panneaux solaires.

### **Chapitre III : Conception mécanique et planification de la trajectoire du robot cleaner**

---

Enfin, sur la base de la comparaison des différentes trajectoires de nettoyage, il est évident que la piste verticale se distingue comme la meilleure option pour les applications de nettoyage de panneaux solaires. Cette trajectoire permet une couverture efficace des grandes surfaces avec une réduction significative de la consommation d'énergie, renforçant ainsi l'efficacité opérationnelle à grande échelle des robots.

En combinant ces avancées technologiques et en optimisant les stratégies de nettoyage, nous sommes en mesure d'améliorer non seulement les performances et la fiabilité des robots de nettoyage des panneaux solaires, mais aussi leur capacité à opérer de manière sûre et efficace dans divers environnements. Cette intégration soutient pleinement la transition vers des énergies renouvelables tout en assurant la durabilité des installations solaires à long terme.

## **Chapitre IV**

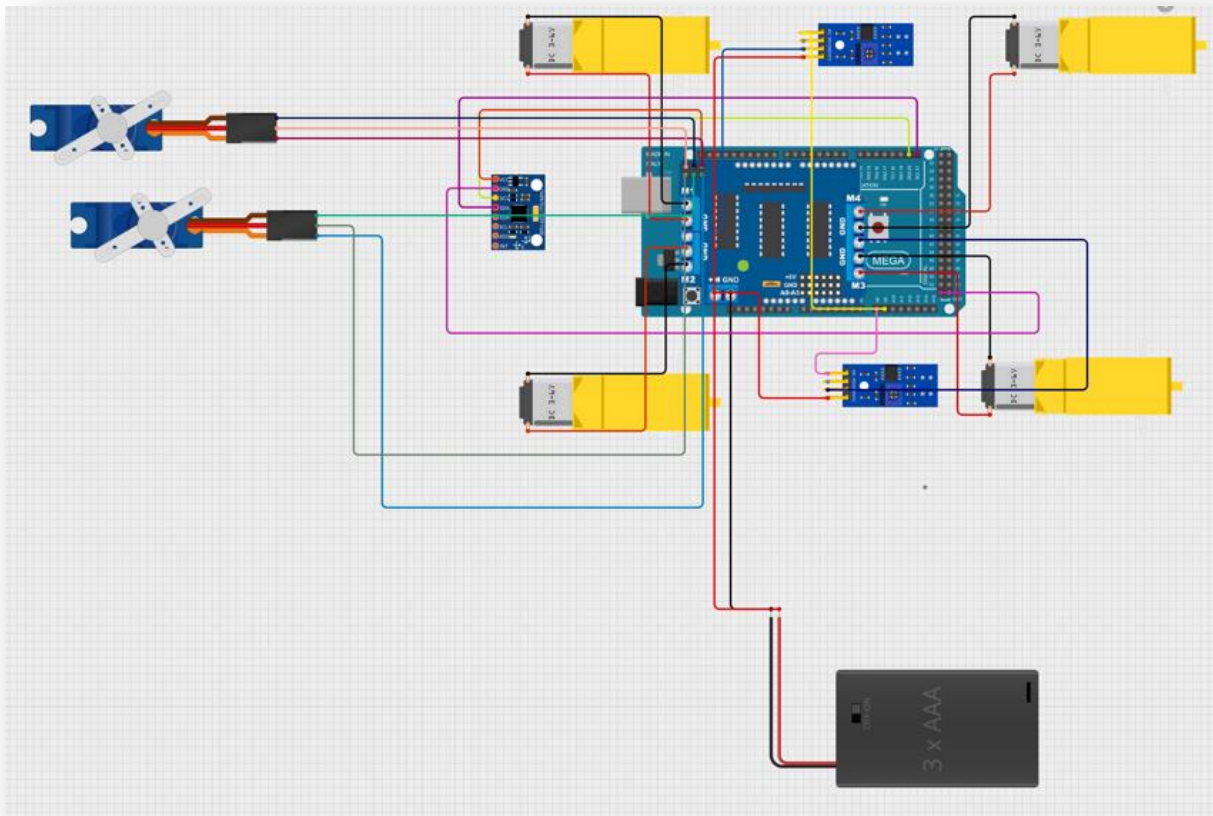
# **Architecture Electronique et Programmation du robot**

### IV. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les détails techniques de conception d'un robot de nettoyage conçu pour nettoyer les panneaux solaires, en détaillant ses principaux composants et leurs fonctions.

Nous aborderons la structure mécanique, le système de mouvement, l'équipement de nettoyage, les capteurs utilisés pour éviter les obstacles, ainsi que le logiciel qui gère efficacement le processus de nettoyage.

Notre objectif est de fournir une compréhension complète du fonctionnement de ce robot et de son rôle dans le maintien de l'efficacité des panneaux solaires.



**Figure VI. 1.** Montage du robot

### IV. 1. Arduino Méga 2560 Rev3

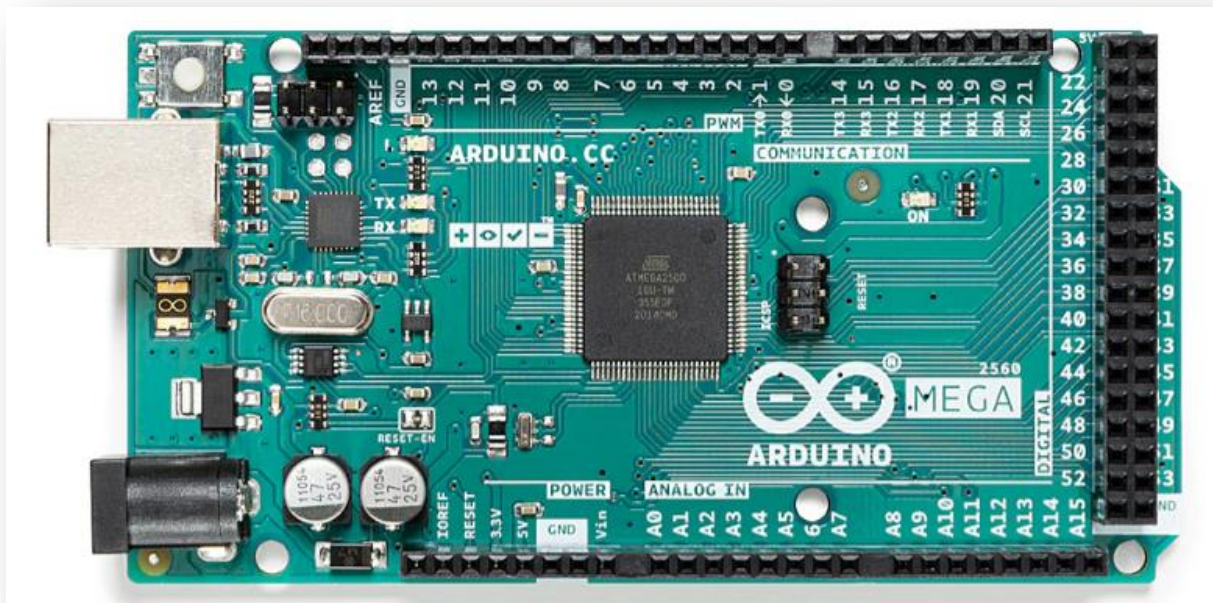


Figure VI. 2. Module Arduino Méga. [40]

#### IV. 1. 1. Définition

L'Arduino Méga 2560 est une carte microcontrôleur basée sur l'ATmega2560. Elle possède 54 broches numériques (entrées/sorties) dont 15 peuvent être utilisées comme sorties PWM, 16 entrées analogiques, 4 UART (ports série matériels), un oscillateur à cristal de 16 MHz, une connexion USB, une prise d'alimentation, un en-tête ICSP et un bouton de réinitialisation. Elle contient tout ce qui est nécessaire au microcontrôleur ; il suffit de la connecter à un ordinateur à l'aide d'un câble USB ou de l'alimenter à l'aide d'un adaptateur CA/CC ou d'une batterie pour commencer à travailler. La carte Méga 2560 est compatible avec la plupart des Shields conçus pour l'Uno et les anciennes cartes Duemilanove ou Diecimila. [40]

Le Méga 2560 est une mise à jour de l'Arduino Méga, qu'il remplace.

#### IV. 1. 2. Caractéristiques de l'Arduino méga 2560

- 54 broches numériques (15 PWM).
- 16 entrées analogiques.
- 4 ports série (UART).
- Port USB pour la programmation et l'alimentation.
- Processeur ATmega2560 16 MHz.

- Compatible avec la plupart des boucliers Arduino Uno et des cartes existantes.
- En-tête ICSP et bouton de réinitialisation.
- Plusieurs options d'alimentation (USB, adaptateur, batterie).
- Plage de tension de fonctionnement de 7 à 12 V.
- Mémoire Flash 256 KB, SRAM 8 KB, EEPROM 4 KB.
- Compatible avec diverses bibliothèques et composants.
- Circuit d'auto-stabilisation.

### IV. 2. Motor driver L293D

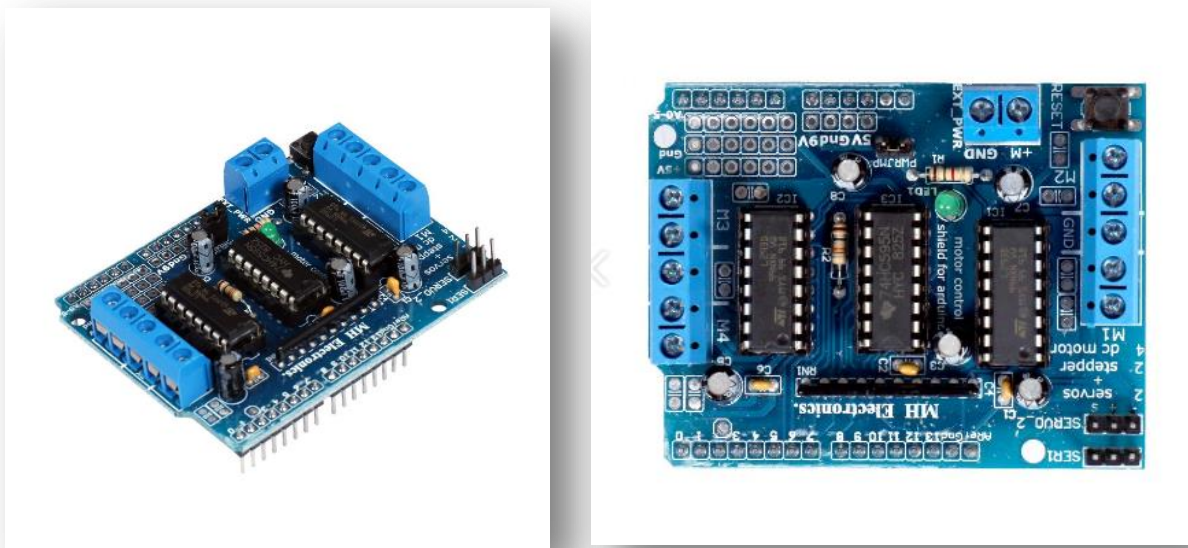


Figure IV. 3. Module motor driver

Le shield d'actionneur L293D pour Arduino est l'un des shields d'actionneur les plus polyvalents du marché, avec 2 connecteurs servo et 4 connecteurs pour moteurs DC ou pas à pas. Il est donc idéal pour tout projet robotique. Ce shield compatible Arduino peut piloter 4 moteurs DC ou 2 moteurs pas à pas 4 fils, et 2 servomoteurs 5V. Les moteurs DC et pas à pas sont pilotés par la puce L293D, tandis que le servo est piloté par les broches 9 et 10 de l'Arduino. Comme le montre (la figure IV. 2).

La puce L293D est un circuit intégré à pont en H à haute tension et à courant élevé, doté de 4 canaux. Cela signifie qu'avec cette puce, les moteurs à courant continu et les alimentations peuvent être pilotés jusqu'à 36V, ce qui permet d'alimenter de gros moteurs, car la puce peut fournir un courant maximum de 600mA par canal. Le circuit en pont en H permet d'appliquer une tension à la charge dans n'importe quelle direction, comme le moteur.

Le bouclier contient deux pilotes de moteur L293D et un enregistreur de déplacement 74HC595. L'enregistreur de déplacement étend les 3 broches de l'Arduino à 8 broches pour contrôler l'orientation des pilotes de moteur. La sortie de validation du L293D est connectée directement aux sorties PWM de l'Arduino. [41]

### IV. 2. 2. Caractéristiques de l'armure d'opérateur L293D pour Arduino

- **Support multiple** : Pilotez 4 moteurs DC, deux moteurs pas à pas 4 fils et deux servomoteurs 5V.
- Compatibilité totale avec Arduino.
- **Puce L293D** : Haute tension et courant élevé (600mA par canal) pour piloter des moteurs jusqu'à 36V.
- **Circuit H-Bridge** : Contrôle total du sens de rotation des moteurs.
- Enregistreur de déplacement 74HC595 : Extension de 3 broches Arduino à 8 broches de contrôle.
- **Contrôleur PWM** : Prend en charge la technologie de modulation de largeur d'impulsion pour contrôler la vitesse des moteurs.
- Facile à installer et à utiliser.

### IV. 2. 3. Branchement motor shield L293D Arduino Mèga

Le motor shield L293D se connecte très facilement à l'Arduino en se montant directement sur la carte UNO. Cependant, il est important de noter que sans une alimentation externe connectée au motor shield, la logique et les moteurs fonctionneront sur 5 volts, ce qui peut ne pas être suffisant. Par conséquent, la carte Arduino est alimentée par l'ordinateur ou par une alimentation électrique vitesse des moteurs à courant continu peut varier considérablement selon que la dédiée. [42]





**Figure IV. 4.** Connecter les moteurs à courant continu à l293d Arduino

Notez que, bien que les moteurs soient configurés pour fonctionner à la même vitesse dans le schéma, ils peuvent en réalité fonctionner à des vitesses différentes. Cela dépend de la vitesse propre à chaque moteur ainsi que de la qualité de la boîte de vitesses et des roues. Après avoir connecté les moteurs à courant continu comme indiqué dans le schéma ci-dessus, ces variations peuvent se manifester.

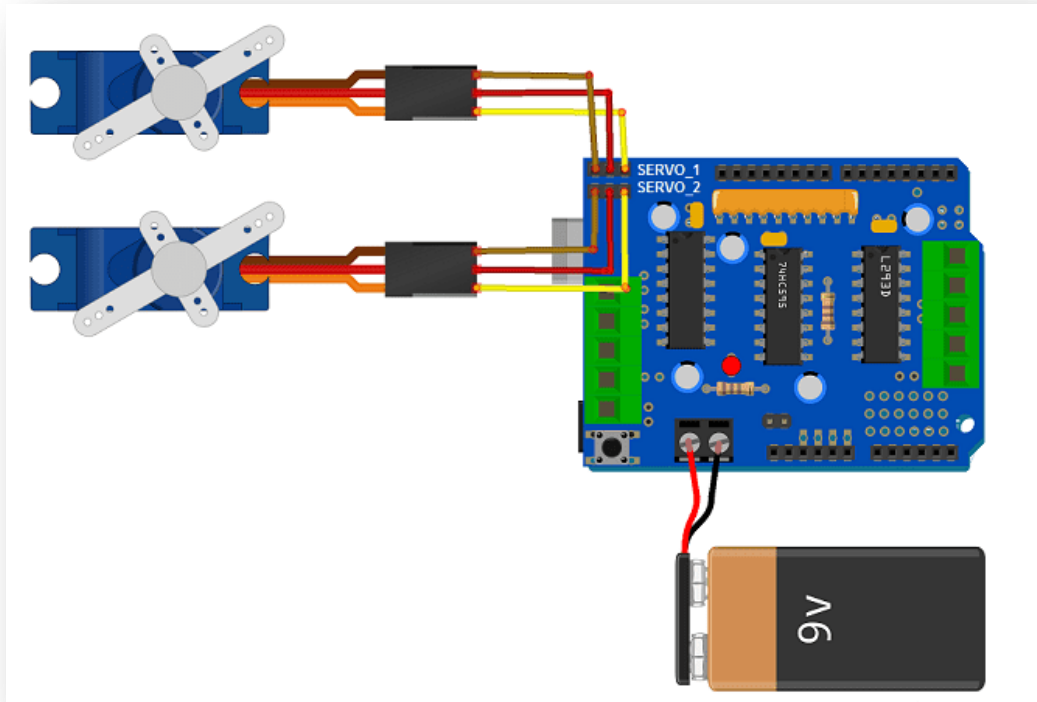
### IV. 2. 4. commander des servomoteurs par le driver L293D

Pour contrôler les servos Arduino, on utilise la bibliothèque standard Servo.h. Les servos sont connectés aux sorties numériques 9 et 10 via des broches sur le bord de la carte. Le module L239D permet de connecter uniquement deux servos et deux moteurs pas à pas. Le premier moteur pas à pas est relié aux bornes M1 et M2, tandis que le second est connecté aux bornes M3 et M4.

### IV. 2. 5. Connection et cablage des moteurs DC

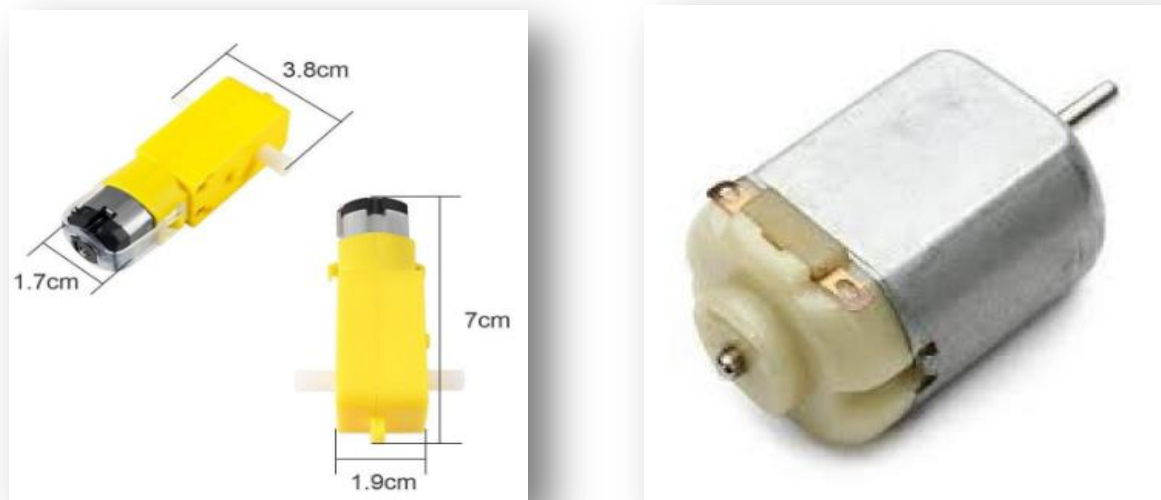
- Connectez le module L293D à la carte Arduino UNO.
- Connectez le premier servomoteur au port servo1 du module L293D

- Connectez le deuxième servomoteur au port servo2 du module L293D.



**Figure IV. 5. Montage deux servomoteurs par le driver L293D**

### IV. 3. Moteur DC 5V



**Figure IV. 6** Module Moteur DC 5V [43]

### IV.3.1. Description des moteurs à courant continue

Un moteur DC 5V pour Arduino est un dispositif électromécanique qui convertit l'énergie électrique en mouvement mécanique. Il est alimenté par une tension de 5 volts, ce qui le rend compatible avec les cartes Arduino qui fonctionnent généralement à cette tension. [43]

### IV. 3. 2. Caractéristiques

- **Tension nominale** : 5 volts, adaptée à l'alimentation des cartes Arduino.
- **Type de moteur** : Moteur à courant continu (DC), ce qui signifie que le courant circule dans une seule direction, produisant un mouvement de rotation.
- **Vitesse de rotation** : Variable en fonction du modèle spécifique du moteur, généralement exprimée en tours par minute (RPM).
- **Couple** : La force de rotation du moteur, mesurée en Newton-mètre (Nm) ou en centimètres gramme (gcm).
- **Taille physique** : Les moteurs DC pour Arduino sont disponibles dans différentes tailles et formes pour s'adapter à divers projets.

### IV. 4. Description du Servo\_moteur



Figure IV. 7. Un servomoteur [44]

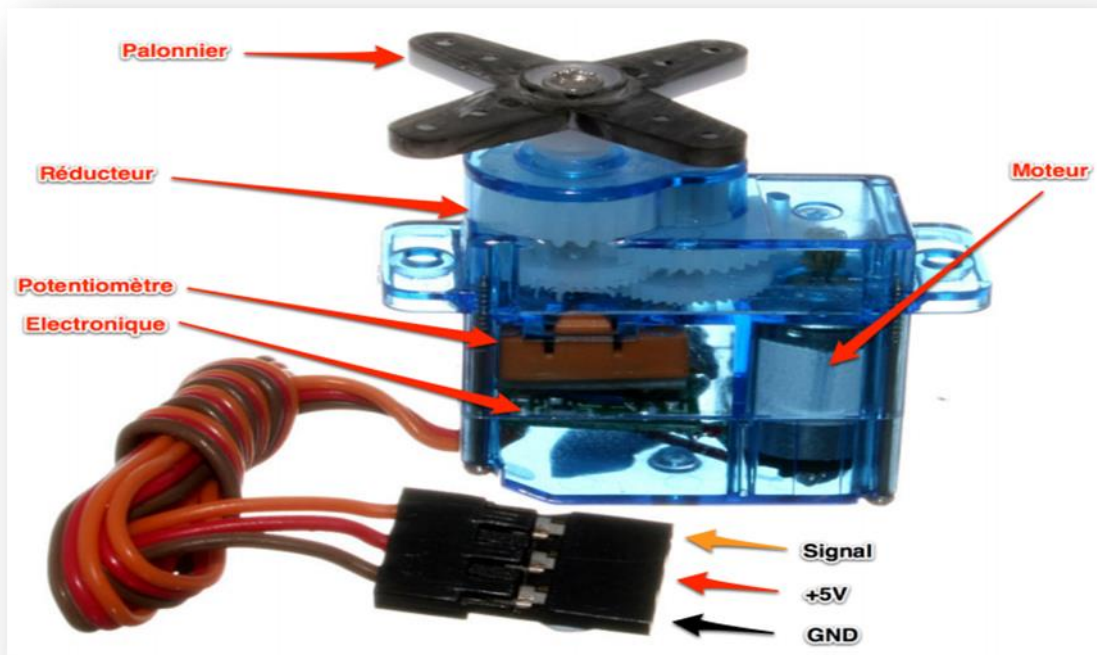
Les servomoteurs les plus couramment utilisés dans l'industrie de la modélisation et de la microélectronique sont les modèles dits « 9g ». Souvent appelés simplement « servos », ces

## Chapitre IV : Architecture Electronique et Programmation du robot

Servomoteurs sont souvent cités pour leur capacité à tourner dans une position définie avec précision et à la maintenir en place jusqu'à ce qu'une nouvelle instruction soit donnée.

Ils se présentent sous la forme d'un petit rectangle doté de brides pour une fixation sûre et d'un moyeu décentré pour relier des bras interchangeables, fournissant ainsi un lien mécanique avec la pièce à déplacer. Bien que certains servomoteurs puissent tourner en continu, la majorité des modèles ne peuvent déplacer leur bras que de 180 degrés.

Couramment utilisés dans le domaine de la modélisation (par exemple, pour diriger des voitures télécommandées ou contrôler les gouvernes d'un avion), les servomoteurs trouvent également des applications dans la robotique et l'industrie, notamment pour réguler le débit des fluides à travers des vannes.



**Figure IV. 7.** Les détaille du servo\_motor [44]

Un petit moteur à courant continu est connecté à un potentiomètre (résistance variable) via un circuit électronique, permettant ainsi de contrôler finement le moteur en fonction de la position du potentiomètre. Sur l'axe de sortie du moteur, une série d'engrenages augmente le couple (force utile) en réduisant la vitesse de rotation.

Lorsque le moteur tourne, les engrenages s'activent, le bras se déplace et entraîne le potentiomètre. Si le mouvement s'arrête, le circuit électronique ajuste continuellement la

vitesse du moteur pour que le potentiomètre, et donc le bras du moteur, reste toujours à la même position. Cela permet, par exemple, à un bras de robot de ne pas retomber sous son propre poids lorsque le mouvement s'arrête. [45]

### **IV. 4. 1. Connection du servomoteur à l'Arduino**

Pour commander un servomoteur, il faut lui envoyer une série d'impulsions avec une période constante de 20 ms (millisecondes). Ce qui varie, et qui détermine finalement la position du bras, est la durée de l'impulsion [44] :

- Pour une impulsion de 1 ms, le servomoteur se positionne à 0° ;
- Pour une impulsion de 1,5 ms, le servomoteur se positionne à 90° ;
- Pour une impulsion de 2 ms, le servomoteur se positionne à 180°.

### **IV. 5. Module encodeur optique capteur de vitesse FC-03**

Le capteur de vitesse FC-03 avec circuit intégré LM293 est utilisé pour mesurer la vitesse de rotation d'un dispositif mécanique. Il est basé sur un capteur optique à collecteur qui détecte les signaux régulièrement interrompus par la rotation d'une roue de poinçonnage. En mesurant le nombre d'interruptions par seconde et en tenant compte du nombre de trous dans la roue codeuse, la vitesse de rotation peut être déterminée.

Cet appareil est largement utilisé dans les projets impliquant des moteurs à courant continu, des robots, des imprimantes 3D et des drones. En le connectant à un microcontrôleur tel qu'Arduino, la vitesse de rotation peut être surveillée et contrôlée, ce qui est essentiel pour de nombreux projets nécessitant un contrôle précis de la vitesse.

En utilisant l'encodeur optique FC-03 avec un microcontrôleur tel qu'Arduino, la vitesse de rotation d'un moteur ou d'une roue peut être surveillée, ce qui est utile dans de nombreux projets qui nécessitent un contrôle de la vitesse. [45]

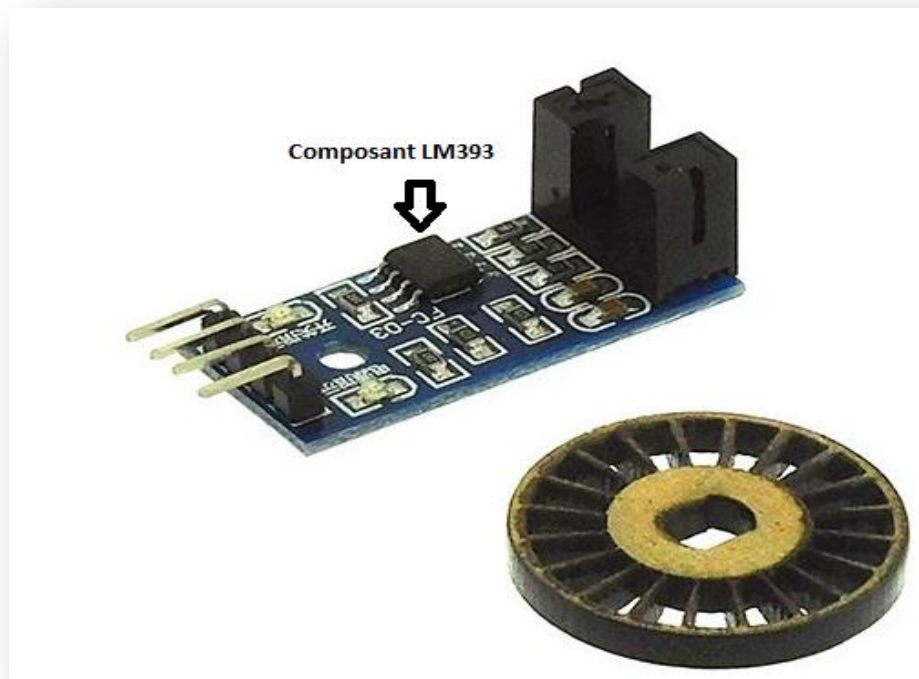


Figure IV. 9. Module encodeur FC-03 [45]

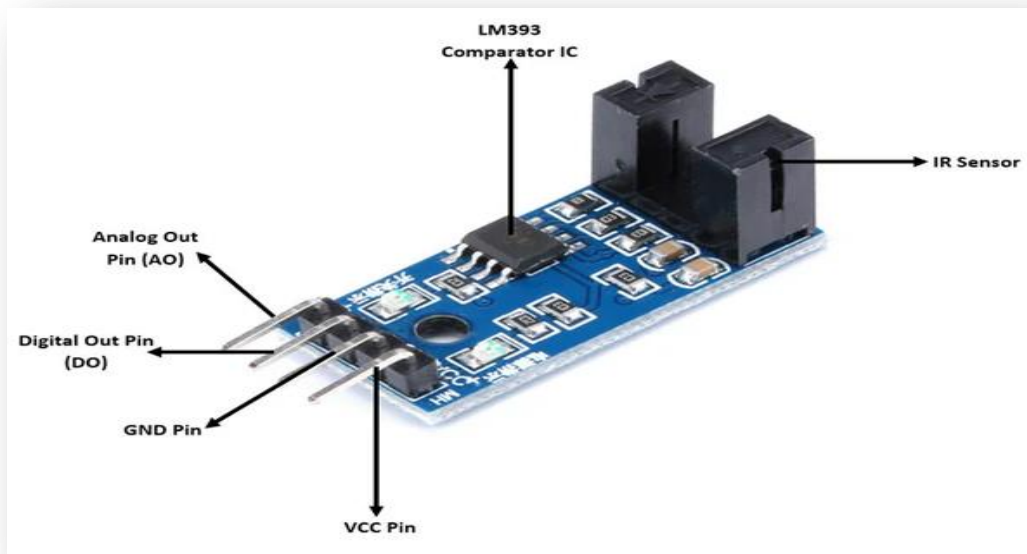
### IV. 5. 1. Caractéristiques principales

- **Codeur optique** : Comprend un disque encodeur et un capteur optique pour détecter les changements de position.
- **Haute précision** : Peut fournir une détection d'impulsion de haute précision, permettant une mesure précise de la vitesse.
- **Interface de sortie numérique** : Fournit des signaux numériques compatibles avec les microcontrôleurs tels qu'Arduino pour une intégration facile dans les projets.
- **Faible coût** : Disponible à un prix abordable, ce qui le rend accessible à un large éventail d'applications.
- **Facile à utiliser** : Peut être intégré dans des projets électroniques avec peu ou pas de composants supplémentaires.

### IV. 5. 2. Brancher capteur de vitesse FC-03

## Chapitre IV : Architecture Electronique et Programmation du robot

Le FC-03 possède un encodeur optique qui convertit les mouvements rotatifs en signaux électriques. Pour le connecter à un microcontrôleur, vous devez relier les broches de signal A et B aux broches numériques de l'Arduino, ainsi que la broche GND. Une alimentation électrique appropriée doit également être fournie. Ensuite, le code Arduino peut être écrit pour lire les signaux du module et interpréter les données pour mesurer la vitesse de rotation ou effectuer d'autres actions requises par le projet. [45]



**Figure IV.10** Brancher capteur de vitesse FC-03

- **VCC** Connexion à l'alimentation positive 3,3V - 5V
- **GND** Masse
- **DO** Sortie de signal de commutation TTL
- **AO** Sans objet

Il existe deux options de branchement : on peut détecter le signal soit avec la broche DO, soit avec la broche AO. Le schéma de branchement pour ces deux configurations est illustré ci-dessous. :

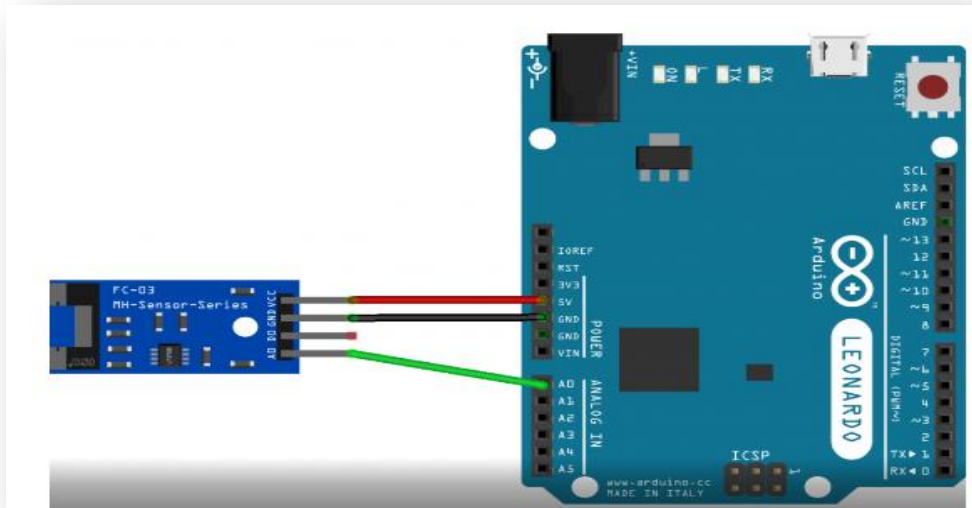


Figure IV. 11. FC-03 branchement Avec A0 [45]

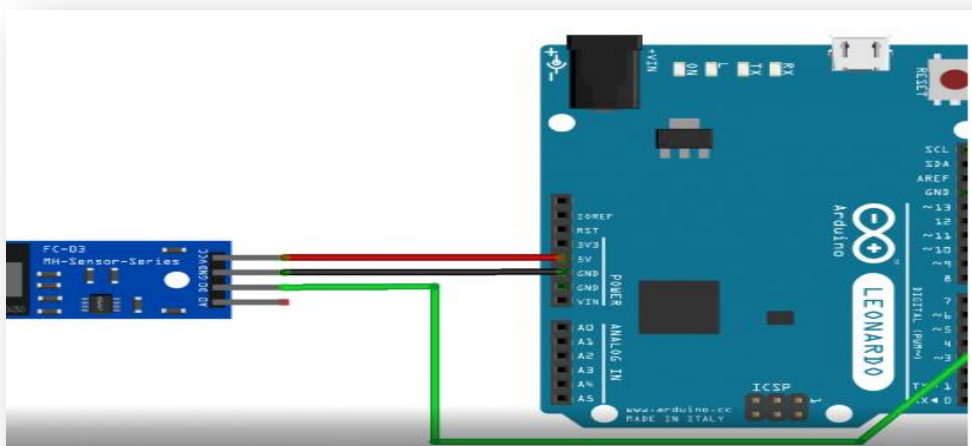


Figure IV. 12. FC-03 branchement Avec D0 [45]

### IV. 6. Relais

Le module de relais que nous utilisons est un relais à canal unique, mais il existe d'autres options, comme le relais à double canal, qui consiste en deux relais à canal unique sur un seul circuit imprimé. Ces relais ont généralement deux faces : L'un avec un bornier à 3 broches pour connecter la charge de haute puissance, et l'autre avec un connecteur mâle à 3 broches pour la connexion à l'Uno, comme le montre l'image.



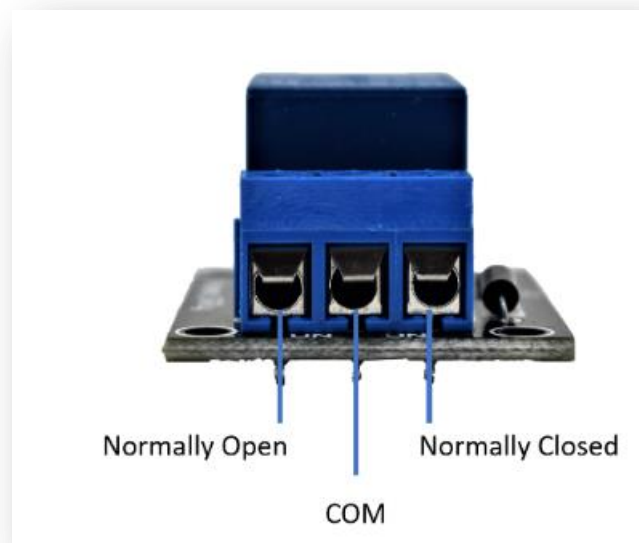
## Chapitre IV : Architecture Electronique et Programmation du robot

Les relais sont des interrupteurs électriques généralement utilisés pour contrôler des circuits, en particulier ceux de forte puissance, à l'aide de signaux de faible puissance tels que des interrupteurs ou des signaux de commande d'ordinateur. Ils trouvent des applications dans divers domaines, notamment dans les systèmes de contrôle industriel, où ils régulent les moteurs, les lumières et d'autres charges électriques. Selon l'application, les relais peuvent assurer une commutation rapide des circuits ou une modulation précise du courant pour un contrôle et une régulation précis. [46]



**Figure IV. 13.** Relay Connections [46]

Tout d'abord, expliquons ce qu'est un bornier à 3 broches. Les broches, de gauche à droite, sont normalement fermées (NF), communes (COM) et normalement ouvertes (NO). Ces étiquettes peuvent varier d'un relais à l'autre, mais vous pouvez facilement déterminer quelles broches sont NO ou NC en vérifiant la continuité à l'aide d'un voltmètre. Placez une sonde sur la broche centrale et l'autre sur la broche gauche. S'il y a continuité, la broche gauche est NC, sinon, elle est NO. La répartition des broches sur le bornier que nous utilisons est indiquée ci-dessous.



**Figure IV. 14.** Terminal Block Pin Assignments [46]

Ensuite, nous avons un connecteur mâle à 3 broches avec un angle droit utilisé pour se connecter à l'Uno. Les broches sont étiquetées « + », « - » et « S », comme indiqué ci-dessous. Connectez la broche « - » à GND, la broche « + » à +5VDC, et la broche « S » à n'importe quelle broche E/S numérique de l'Uno.



**Figure IV. 14.** Affectation des broches de l'entête mâle [46]

### IV. 7. Pompe à eau

Une pompe à eau 6V est une pompe électrique qui utilise un moteur électrique 6V pour pomper des liquides à travers un tuyau. Elle est souvent utilisée dans les applications de réfrigération, le transfert de fluides et les systèmes de distribution d'eau. [47]



**Figure IV. 15.** Mini Pompe d'eau [47]

Nous contrôlons une pompe à eau à l'aide d'une carte Arduino

Lorsque vous appuyez sur le bouton-poussoir, la pompe à eau se met en marche pour remplir une bouteille. Dès que vous relâchez le bouton, la pompe à eau s'arrête.

### IV. 7. 1. Montage de la carte Arduino avec la pompe à eau

Le relais est le composant intermédiaire entre la carte Arduino et la pompe à eau. Elle permet à la carte Arduino de commander la pompe à eau.

Le rôle du relais est de faire démarrer ou arrêter la pompe responsable du remplissage des bouteilles.

- On connecte la borne (-) du relais à la broche GND de l'Arduino
- On connecte la borne (+) du relais à la broche 3.3V de l'Arduino
- On connecte la borne (S) du relais à la broche N°2 de l'Arduino

Le rôle du bouton poussoir est l'activation ou la désactivation du module relais.

- On connecte la première borne du bouton à la broche GND de l'Arduino.
- On connecte la deuxième borne du bouton à la broche N°1 de l'Arduino.

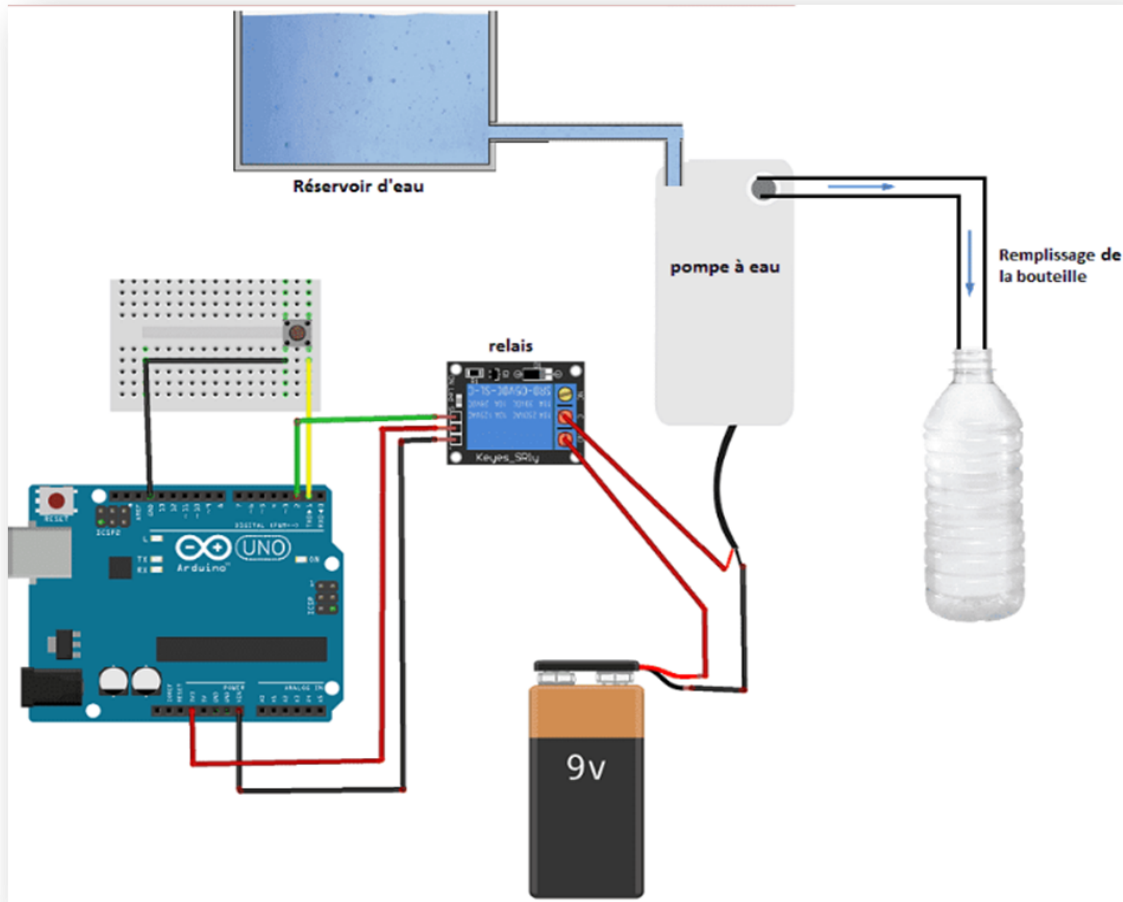


Figure IV. 17. Montage pompe d'eau [47]

### IV. 8. MPU6050 Module

Le module de capteur MPU6050 est un dispositif de suivi de mouvement à 6 axes, comprenant un gyroscope à 3 axes et un accéléromètre à 3 axes, ainsi qu'un processeur de mouvement numérique. Il est également équipé d'un capteur de température intégré. Ce module communique avec les microcontrôleurs via une interface de bus I2C.

Il possède un bus I2C auxiliaire permettant de connecter d'autres capteurs, comme un magnétomètre à 3 axes ou un capteur de pression. Lorsque vous connectez un magnétomètre 3 axes au bus I2C auxiliaire, le MPU6050 peut fournir des données de mouvement complètes à 9 axes.

Examinons maintenant les capteurs internes du MPU6050. [48]



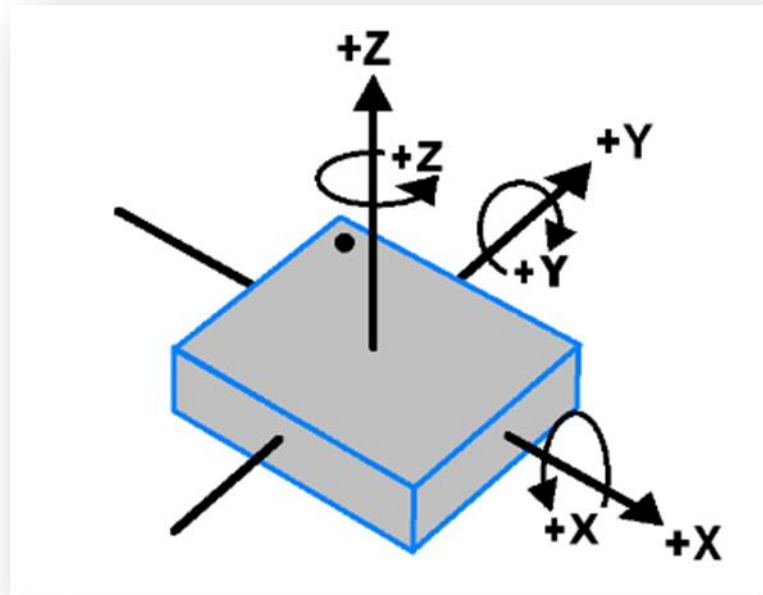
Figure IV. 18. MPU6050 module [48]

### IV. 8. 1. Gyroscope à trois axes

Le MPU6050 est un gyroscope à trois axes basé sur la technologie MEMS (Micro Electro Mechanical System).

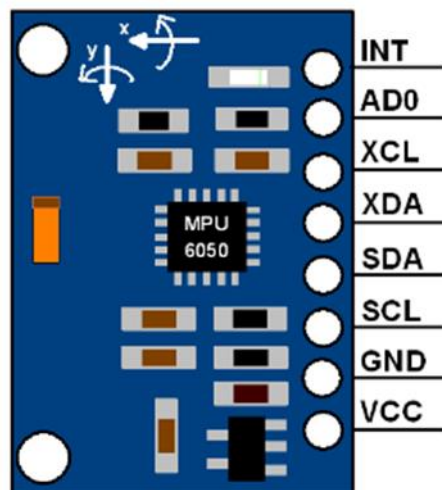
Il est utilisé pour détecter la vitesse de rotation le long des axes X, Y et Z, comme la montre la figure ci-dessous [12].

- Lors de la rotation des gyroscopes autour de n'importe quel axe de détection, l'effet Coriolis provoque une vibration détectée par un MEMS à l'intérieur du MPU6050.
- Le signal résultant est amplifié, démodulé et filtré pour produire une tension proportionnelle à la vitesse angulaire.
- Cette tension est numérisée à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique (CAN) de 16 bits pour échantillonner chaque axe.
- La plage de mesure complète de la sortie est de +/- 250, +/- 500, +/- 1000, +/- 2000 degrés par seconde.
- Il mesure la vitesse angulaire le long de chaque axe en unités de degrés par seconde.



**Figure IV. 19.** Pitch and roll axes du gyroscope [48]

### IV. 8. 2. MPU6050 Pin Description



**Figure IV. 19.** MPU6050 Pin out [48]

## Chapitre IV : Architecture Electronique et Programmation du robot

### Le MPU-6050 a 8 broches,

- **INT** : Broche de sortie numérique de l'interruption.
- **AD0** : Broche d'adresse esclave LSB I2C. Il s'agit du bit 0 de l'adresse esclave 7 bits de l'appareil. Si elle est connectée à VCC, elle est lue comme une logique unique et l'adresse de l'esclave change.
- **XCL** : Broche d'horloge série auxiliaire. Cette broche est utilisée pour connecter les broches SCL d'autres capteurs compatibles I2C à l'interface I2C du MPU-6050.
- **XDA** : Broche auxiliaire de données série. Cette broche est utilisée pour connecter les broches SDA d'autres capteurs compatibles avec l'interface I2C au MPU-6050.
- **SCL** : Broche d'horloge série. Connecter cette broche aux broches SCL des microcontrôleurs.
- **SDA** : Broche de données série. Connecter cette broche aux broches SDA des microcontrôleurs.
- **GND** : BROCHE DE MISE À LA TERRE : Broche de mise à la terre. Relier cette broche à la connexion de masse.
- **VCC** : Broche d'alimentation. Connecter cette broche à la source +5V DC.

### Interface MPU6050 avec Arduino,

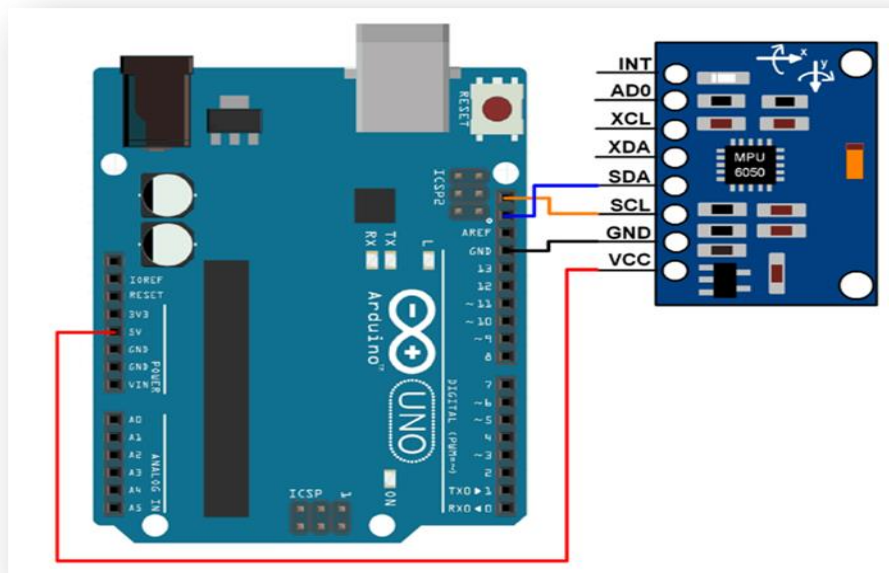


Figure IV. 21. Montage MPU6050 avec Arduino [48]

### IV. 9. Roues mécaniques multidirectionnelles



**Figure IV. 22.** Roues mécaniques multidirectionnelles [49]

Un actionneur mécanique est un type d'actionneur universel, ce qui signifie qu'il applique la force de la roue à un angle de 45 degrés au robot au lieu de l'appliquer à l'un de ses axes. En appliquant la force à un angle du robot, vous pouvez modifier l'ampleur des vecteurs de force afin de contrôler la translation du robot.

Le robot peut se déplacer dans n'importe quelle direction tout en gardant l'avant du robot dans une direction compas fixe. La figure ci-dessous montre les mouvements qui peuvent être obtenus pour différentes combinaisons de rotations des roues. Ce système d'entraînement est très maniable et est souvent utilisé dans des applications robotiques qui nécessitent des mouvements précis et multidirectionnels. [10]



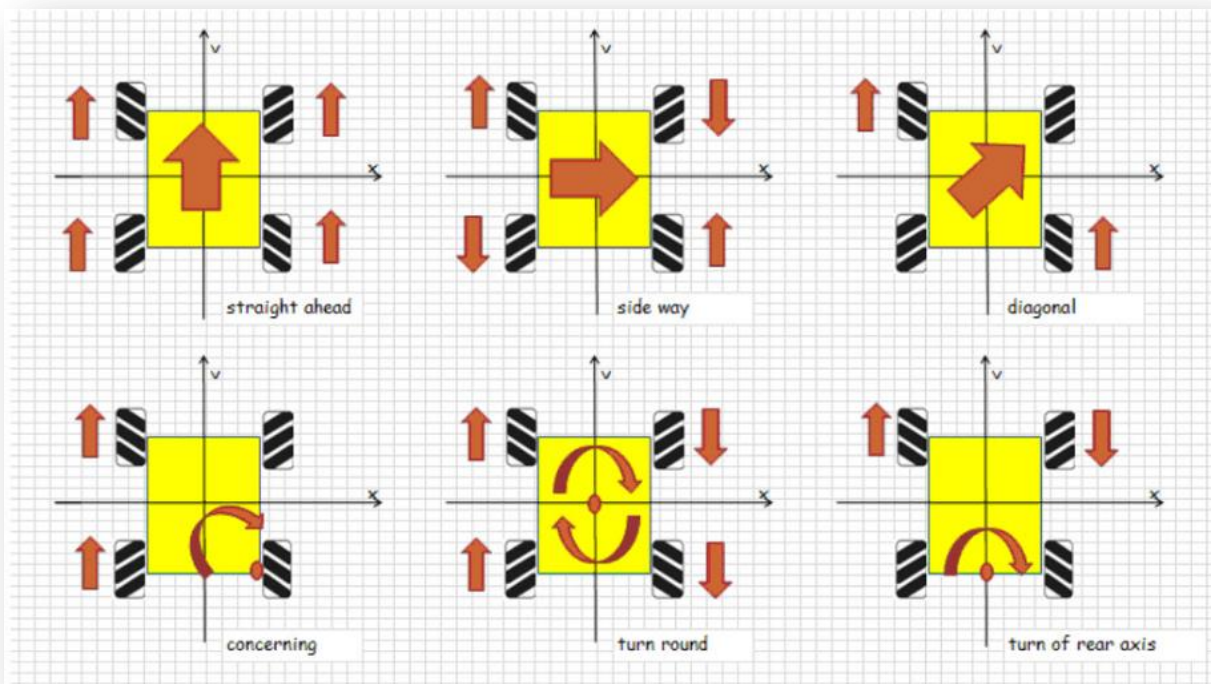


Figure IV. 23. Les mouvements du robot [49]

### IV. 9. 1. Algorithme de control

Pour optimiser le système d'entraînement Mecanum, vous avez besoin des paramètres de contrôle suivants [49] :

1. L'angle souhaité : L'angle auquel le robot doit se déplacer.
2. L'amplitude souhaitée : La vitesse à laquelle le robot doit se déplacer.
3. Rotation requise : La vitesse à laquelle le robot doit changer de direction.

### IV .10. Conclusions

En conclusion, nous avons présenté un prototype de robot nettoyeur de panneaux solaires, illustrant ses composants et ses fonctions. En comprenant la structure mécanique, le système de mouvement et l'équipement de nettoyage, ainsi que les capteurs avancés et le logiciel intelligent qui gère le processus de nettoyage, nous avons souligné l'importance de ce robot dans le maintien de l'efficacité des panneaux solaires.

## **Chapitre IV : Architecture Electronique et Programmation du robot**

---

La valeur de ce robot réside dans sa capacité à fournir une solution durable et efficace au problème de l'accumulation de saletés sur les panneaux solaires, en améliorant leur efficacité et en prolongeant leur durée de vie. Au fur et à mesure que la technologie progresse, ces robots devraient faire partie intégrante des systèmes modernes d'énergie solaire, contribuant ainsi à un avenir énergétique plus propre et plus durable.

**Conclusion général**

## Conclusion générale

---

Le nettoyage efficace des panneaux solaires est essentiel pour maintenir leurs performances optimales et prolonger leur durée de vie, d'autant plus que l'importance de l'énergie solaire ne cesse de croître. Face à des défis tels que la difficulté d'accès, les problèmes de sécurité, les coûts élevés et l'impact sur l'environnement, des approches stratégiques et des technologies innovantes sont nécessaires.

À la lumière de toutes les stratégies de nettoyage des panneaux solaires, nous avons fabriqué un prototype de robot nettoyeur et mené une étude approfondie sur les robots. Notre exploration a porté sur l'intégration de solutions avancées telles que les gyroscopes pour améliorer la stabilité des robots nettoyeurs, permettant une adaptation rapide aux changements de charge et minimisant l'usure mécanique pour accroître la fiabilité du système.

L'étude des différents modes de fonctionnement du moteur - à vide, à charge constante, à charge variable, à charge variable et à tension appliquée variable - a révélé leur impact critique sur les performances du robot, nécessitant une gestion minutieuse pour un fonctionnement optimal. Notre analyse des trajectoires de nettoyage a clairement montré que pour les grandes surfaces de panneaux solaires, la méthode verticale est la plus efficace, réduisant de manière significative la consommation d'énergie tout en assurant une couverture complète et rapide des surfaces. En investissant dans la recherche et le développement de technologies durables, nous maximisons non seulement la production d'énergie solaire, mais nous réduisons également son impact sur l'environnement en intégrant la maintenance préventive et les pratiques écologiques pour prolonger la durée de vie des installations solaires tout en optimisant leur performance. Cette intégration joue un rôle crucial dans la transition mondiale vers des sources d'énergie propres et durables, assurant un avenir plus propre et plus efficace pour les générations à venir, tout en préservant notre environnement pour les années à venir .

# Références

## Référence

---

- [1] Latreche Mohamed, Boudjadja Faiz. «Etude et réalisation d'un système de nettoyage des Panneaux solaires PV». Mémoire de master. Université Mohamed Seddik Benyahia Jijel. 2023.
- [2] Hadri Nor El-Houda-Amel. «Création D'une Entreprise De Commercialisation Et Installation Des Panneaux Solaires Par Eurl Cips Tlemcen». Mémoire de master. Université Abou Bekr Belkaid. Tlemcen. 2014.
- [3] Fouad Chabane. «Modélisation des paramètres de la conversion thermique de l'énergie solaire». Diplôme de doctorat en science. Université Mohamed Khider Biskra. 2015.
- [4] T. Ackermann, G. Andersson, L. Söder. «Renewable Energy Sources: Current Status, Future Prospects, and Their Enabling Technology». Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2001.
- [5] Thomas Mambrini. «Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies». Thèse de doctorat. Ecole doctorale Sciences et Technologies de l'Information, des Télécommunications et des Systèmes. Paris 11. 2014.
- [6] Siwar Fadhel. «Efficacité énergétique et Surveillance d'un microgrid à courant continu alimenté par des panneaux photovoltaïques». Thèse de doctorat. Université Paris-Saclay. 2020.
- [7] Boukheira Nassira, Mebarki Naima. «Etude et simulation l'influence de la poussière sur le rendement des panneaux photovoltaïque». Diplome de master. Université d'Adrar. 2016.
- [8] Elnaz Hassanpour Akeh. «Environmental Impacts of Renewable Energy (solar and wind) on Water, Food and Energy Nexus». Thèse de doctorat. Oregon State University. 2018.
- [9] Amadou SOW. «Optimisation de la maintenance dans les zones à faible densité de systèmes photovoltaïques familiaux». Projet Sénégal-Allemand Energie Solaire Photovoltaïque. 1998.
- [10] Zeid Bendaoudi, et all. «Contribution à l'étude du nettoyage des panneaux photovoltaïques par procédé électrostatique». Journal de recherche physique et chimique. Université Ahmed Zabana, Rélizane. Algérie. 2023.
- [11] Bouab Hamza, Garn Messaoud. «Elaboration d'un plan de maintenance préventive PMP pour une installation solaire à grande dimensions». Mémoire de master. Université Ibn Khaldoun de Tiaret. Tiaret. 2022.
- [12] M. Petibon Stéphane. «Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques». Thèse de doctorat. Université de Toulouse. 2009.

## Référence

---

- [13] J.D. Pye, G.L. Morrison, M. Behnia. «Transient Modelling of Cavity Receiver Heat Transfer for the Compact Linear Fresnel Reflector». Article. Université de Nouvelle-Galles du Sud. 2003.
- [14] K. Ilse, L. Micheli, B. W. Figgis, K. Lange, D. Daßler, H. Hanifi, F. Wolfertstetter, V. Naumann, C. Hagendorf, R. Gottschalg, J. Bagdahn. «Technoeconomic assessment of soiling losses and mitigation strategies for solar power generation». *Joule* 3, 2303–2321 (2019).
- [15] Mejia, F.A., Kleissl, J. «The effect of dust on solar photovoltaic systems». Solar Energy, Université de Californie, San Diego (UCSD) 2013.
- [16] Ilse, K., al. «Analyse technico-économique des pertes dues à l'encrassement et des mesures d'atténuation pour la production d'énergie solaire» Fraunhofer Center for Silicon Photovoltaics et à l'Université des Sciences Appliquées d'Anhalt, avec une collaboration spécifique avec l'Université de Jaén (CEAEMA) pour la recherche sur les systèmes solaires et les mesures d'atténuation des pertes 2019.
- [17] Boyle, L., & McCausland, L. «l'optimisation des méthodes de nettoyage des panneaux photovoltaïques dans différents environnements» l'Université d'Ulster 2017
- [18] Nahar, N.M., Gupta, J.P., Rajput, S.P.S. «Effet de la poussière sur la transmittance des matériaux de vitrage pour les capteurs solaires dans les conditions de zone aride en Inde» Université agricole du Rajasthan, en Inde. 2003.
- [19] Fujishima, A., Zhang, X., & Tryk, D.A. «Photocatalyse au TiO<sub>2</sub> et phénomènes de surface associés» l'Académie des sciences et de la technologie de Kanagawa, l'Université de Yamanashi, Japon 2008.
- [20] Zhang, X., Shi, F., Niu, J., Jiang, Y., & Wang, Z. (2008). «Surfaces superhydrophobes : Du contrôle structurel à l'application fonctionnelle» universités spécialisées en matériaux avancés et technologies chimiques en Chine. 2008
- [21] Deere, N. «Systèmes de nettoyage automatisés dans l'agriculture : Avancées et directions futures» 2015.
- [22] Kandadai, T., Zhao, F., & Meng, D. (2010). «Nettoyage ultrasonique pour composants optiques de haute précision»

## Référence

---

- [23] Li, X., Cao, Y., & Wang, D. «Progrès récents dans les nanorevêtements pour des applications auto-nettoyantes dans les systèmes photovoltaïques» Université des sciences et technologies de Chine (USTC) 2020.
- [24] Zhou, Y., Xie, Y., & Wang, H. «Amélioration des propriétés auto-nettoyantes des revêtements à base de TiO<sub>2</sub> avec des composites de graphène pour les applications des panneaux solaires» Université normale de Nanjing, Chine 2019.
- [25] Mazumder, M.K., Sharma, R., Biris, A.S., Zhang, J., Calle, C.I., & Zahn, M «Boucliers transparents auto-nettoyants pour protéger les panneaux solaires et autres dispositifs» Université de l'Arkansas, États-Unis 2012.
- [26] Davies, P., Brunner, J., & Tucker, S «Surfaces auto-nettoyantes utilisant la vibration mécanique et la technologie ultrasonique» Université de Cambridge, Royaume-Uni 2018.
- [27] Guo, F., Wang, J., & Li, Y «La robotique dans la maintenance des panneaux solaires : Un aperçu des développements récents et des orientations futures» Université Tsinghua, Chine 2021.
- [28] Wang, H., Wang, X., & Zhang, L «Matériaux à mémoire de forme et leur application dans les surfaces auto-nettoyantes pour les systèmes solaires» Université Jiao Tong de Shanghai, Chine 2017.
- [29] Shobokshy, M.S., Hussein, F.M., & Bassuni, T.A. «Systèmes de nettoyage robotisés pour panneaux solaires : Conception et essais sur le terrain» Université du Roi Fahd du Pétrole et des Minéraux, Renewable Energy, 2016.
- [30] Singh, A., Verma, R., & Tiwari, A «Systèmes robotiques intelligents pour le nettoyage des panneaux photovoltaïques» Institut national de technologie, Inde 2018.
- [31] Nizetic, S., Gadelhak, M., & Solano, M.M «Impact de la technologie de nettoyage robotisé sur l'efficacité des modules photovoltaïques dans les régions désertiques» Université de Split 2019.
- [32] Pourghasemi, M., Khosravi, K., & Amani, M «Évaluation des systèmes de nettoyage autonomes pour panneaux photovoltaïques dans les régions à forte poussière» Université de Téhéran 2020.



## Référence

---

- [33] Guo, F., Wang, J., & Li, Y «Les robots dans la maintenance des panneaux solaires : Une revue des développements récents et des directions futures» Université de Pékin 2021.
- [34] Kumari, S., Yadav, P., & Sharma, P. «Étude de faisabilité et considérations de conception pour les robots de nettoyage autonomes pour panneaux solaires» Université de Delhi 2020.
- [35] E. Galceran, M. Carreras. «A survey on coverage path planning for robotics». *Rob. Auton. Syst.* 61 (12) (2013) 1258–1276.
- [36] B.K. Patle, A. Pandey, D.R.K. Parhi, A. Jagadeesh. «A review: on path planning strategies for navigation of mobile robot» *Defence Technology* 15 (4) (2019) 582–606.
- [37] P.M. Hsu, C.L. Lin, M.Y. Yang. «On the complete coverage path planning for mobile robots». *J. Intell. Rob. Syst.* 74 (3–4) (2014) 945–963.
- [38] T. Akinfiyev, M. Armada, S. Nabulsi. «Climbing cleaning robot for vertical surfaces, Indust». *Rob. Int. J.* 36 (4) (2009) 352–357.
- [39] O. Tokhi, H. Zhang, J. Zhang, G. Zong, W. Wang, R. Liu, G. Zong. «Sky cleaner 3: a real pneumatic climbing robot for glass-wall cleaning». *IEEE Rob. & Autom. Mag.* 2006.
- [40] "Arduino Mega Pinout and Schematics." *Circuitstoday*, écrit par John, 2021. Consulté le 6 juin 2024. [Arduino Mega Pinout and Schematics](<https://www.circuitstoday.com/arduino-mega-pinout-schematics>).
- [41] Rajguru Electronics "L293 Motor Driver Shield for Arduino." Consulté le 6 juin 2024.
- [42] Motor Shield L239D pour Arduino. (2023). Récupéré de <https://arduino-france.site/motor-shield/#3>
- [43] Arduino - Moteur DC. (s.d.). Récupéré sur [https://www.tutorialspoint.com/arduino/arduino\\_dc\\_motor.htm](https://www.tutorialspoint.com/arduino/arduino_dc_motor.htm)
- [44] Utiliser un servomoteur. (s.d.). Récupéré de <https://arduino.developpez.com/tutoriels/arduino-a-l-ecole/?page=projet-12-utiliser-un-servomoteur>
- [45] Forlot, J. (2021). *Activité Arduino Python : mesurer une vitesse à l'aide d'un module capteur de vitesse de rotation LM293 type FC-03 ou VMA347, trace de graphe en temps réel.*

## Référence

---

Récupéré de <http://jonas.forlot.free.fr/index.php/2021/05/14/activite-arduino-python-mesurer-une-vitesse-a-laide-dun-module-capteur-de-vitesse-de-rotation-lm293-type-fc-03-ou-vma347-trace-de-graphe-en-temps-reel/>

[46] Ejshea. (n.d.). *1 Channel Relay Module and Air Valve*. Récupéré de <https://projecthub.arduino.cc/ejshea/1-channel-relay-module-and-air-valve-fbcf17>

[47] Anon. (n.d.). *Commander une pompe à eau par la carte Arduino*. Récupéré de <https://www.robotique.tech/tutoriel/commander-une-pompe-a-eau-par-la-carte-arduino/>


[48] Anon. (n.d.). *MPU6050 Gyroscope, Accelerometer & Temperature Sensor Module*. Récupéré de <https://www.electronicwings.com/sensors-modules/mpu6050-gyroscope-accelerometer-temperature-sensor-module>

[49] Commander deux servomoteurs par l'Arduino et le module Shield L293D écrit par l'équipe Robotique Tech en 2023, [source](<https://www.robotique.tech/tutoriel/commander-deux-servomoteurs-par-larduino-et-le-module-shield-l293d/>).

[50] Ravindra Singh Bisht, Pushparaj Mani Pathak, Soraj Kumar Panigrah. «Design and development of a glass façade cleaning robot». Robotics and Control Laboratory. Mechanical & Industrial Engineering Department. Indian Institute of Technology. Roorkee 247667. India. 2022

[51] HUDEDMANI, Mallikarjun G., et tout. A comparative study of dust cleaning methods for the solar PV panels. Advanced Journal of Graduate Research, 2017

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de L'enseignement Supérieur et de La recherche Scientifique



جامعة غرداية  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
قسم الآلية والتحكم ومخازين

Université de Ghardaïa  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département automatique et électromécanique

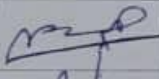


## إذن بالطباعة (مذكرة ماستر)

بعد الاطلاع على التصحيحات المطلوبة على محتوى المذكرة المنجزة من طرف الطلبة التالية أسماؤهم:

1. الطالب (ة): بينور نبيلة
2. الطالب (ة): آل سيد الشيخ مروة
3. الطالب (ة): \_\_\_\_\_

تخصص: الآلية

تمنح نحن الأستاذ (ة): \_\_\_\_\_

الاسم واللقب	الرتبة - الجامعة الأصلية	الصفة	الامضاء
نكار بلقاسم	أستاذ محاضر - جامعة غرداية	مصصح (1)	
حسن ناصر	أستاذ محاضر - جامعة غرداية	مصحح	
مصباح شرف عبد الكريم	أستاذ محاضر - جامعة غرداية	مؤطر	

الإذن بطباعة النسخة النهائية لمذكرة ماستر الموسومة بعنوان

Conception d'un robot pour le nettoyage des  
panneaux photovoltaïques

إمضاء رئيس القسم  
العلمي عبد اللطيف  
رئيس قسم الآلية  
والكهروميكانيك

