RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi
Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Électromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Électrotechnique
Spécialité : Énergies Renouvelables

INTITULÉ

CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN SYSTÈME AUTOMATISÉ DE NETTOYAGE DES LUMINAIRES SOLAIRES

RÉALISÉ PAR

ZERRAGHI DALIA
NOUFEL NASR EDDINE

Soutenu publiquement le : 25/10/2026, devant le Jury composé de :

Mme. AMARA Badria	MAA	*Présidente*	Univ-BBA
M. MEGHLAOUI Issam	MCA	*Encadreur*	Univ-BBA
M. LAYADI Toufik Madani	Prof	*Co-Encadreur*	Univ-BBA
M. KHATIR Abdelfatah	MCA	*Examinateur*	Univ-BBA
Mme. ABDELOUAHED Nassima	MCA	*Représentante de l'incubateur*	Univ-BBA

Année universitaire 2025 / 2026



DÉDICACE

À nos familles,

À nos enseignants,

À toutes les personnes qui nous ont soutenus et encouragés au cours de ce travail.

REMERCIEMENTS

Nous remercions toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail.

Nous remercions enfin nos familles pour leur soutien et leurs encouragements.

RÉSUMÉ

La poussière est l'un des principaux facteurs de perte de performance des panneaux photovoltaïques, en particulier en milieu sec et désertique. Sur les luminaires solaires autonomes, elle réduit l'énergie captée et peut compromettre l'éclairage ; installés en hauteur, ces luminaires sont coûteux à nettoyer (nacelle, équipe qualifiée), si bien que l'entretien est rare.

Ce mémoire porte sur la conception et la réalisation d'un système automatisé de nettoyage pour luminaires solaires. Un ESP32 associé à une horloge temps réel (RTC) lance chaque jour à 2h00 du matin, lorsque l'éclairement ambiant est faible et stable, une mesure par capteur infrarouge. Ce capteur détecte indirectement la poussière à partir de la variation du signal reçu de la surface du panneau ; l'ESP32 compare cette variation à des valeurs de référence pour choisir entre aucune action, un essuyage à sec ou un nettoyage avec eau, afin de limiter la consommation d'eau. Une pompe et une raclette entraînée par un seul moteur, commandé par un seul driver, assurent le nettoyage.

Après le contexte, l'étude théorique et la conception, un prototype fonctionnel a été réalisé ; ses essais confirment le bon fonctionnement de la chaîne horloge–détection–décision–action.

ABSTRACT

Dust is one of the main factors reducing the performance of photovoltaic panels, particularly in dry and desert environments. On autonomous solar luminaires it lowers the energy harvested and can compromise lighting; because these luminaires are mounted at height, cleaning them (aerial platform, qualified crew) is costly, so maintenance is rare.

This work presents the design and implementation of an automated cleaning system for solar luminaires. An ESP32 microcontroller with a real-time clock (RTC) starts an infrared measurement every day at 2:00 a.m., when ambient light is low and stable. The sensor indirectly detects dust from the change in the signal received from the panel surface; the ESP32 compares this change with reference values to choose between no action, dry wiping or water-based cleaning, which limits water consumption. A pump and a squeegee driven by a single motor and a single driver perform the cleaning.

After the context, the theoretical study and the design, a functional prototype was built; its tests confirm the correct operation of the clock–sensing–decision–actuation chain.

ملخص

يُعدّ الغبار من أهمّ العوامل التي تُضعف أداء الألواح الكهروضوئية، ولا سيّما في البيئات الجافة والصحراوية. وفي أعمدة الإنارة الشمسية المستقلّة يقلّل تراكمه من الطاقة الملتقَطة وقد يُعرّض الإنارة للتوقّف؛ ولأنّ هذه الأعمدة مثبّتة على ارتفاع، فإنّ تنظيفها (برافعة وفريق مؤهَّل) مكلف، ولذلك تظلّ الصيانة نادرة.

يتناول هذا العمل تصميم وإنجاز منظومة آلية لتنظيف أعمدة الإنارة الشمسية. يرتبط المتحكّم الدقيق ESP32 بساعة زمن حقيقي (RTC) تُشغّل المنظومة كلّ يوم عند الساعة 02:00 صباحًا، حين تكون الإضاءة المحيطة ضعيفة ومستقرّة، فيبدأ مستشعر الأشعة تحت الحمراء عملية القياس. ويكشف هذا المستشعر الغبار بطريقة غير مباشرة انطلاقًا من تغيّر الإشارة المستقبَلة من سطح اللوح، ويقارن المتحكّم هذا التغيّر بقيم مرجعية ليختار بين عدم التدخّل أو المسح الجاف أو التنظيف بالماء، بما يحدّ من استهلاك الماء. وتتولّى مضخّة وممسحة يحرّكهما محرّك واحد ودارة قيادة واحدة عملية التنظيف.

وبعد عرض السياق والدراسة النظرية والتصميم، أُنجز نموذج أوّلي وظيفي أكّدت اختباراته سلامة عمل السلسلة: الساعة – الكشف – القرار – التنفيذ.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE..... 2
REMERCIEMENTS..... 2
RÉSUMÉ..... 3
ABSTRACT..... 4
ملخص..... 5
LISTE DES FIGURES..... 8
LISTE DES TABLEAUX..... 9
LISTE DES ABRÉVIATIONS..... 10
INTRODUCTION GÉNÉRALE..... 11
CHAPITRE 1 : CONTEXTE, PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS..... 12
Introduction..... 13
1.1 Contexte général..... 13
1.2 Problématique..... 14
1.3 Objectifs du mémoire..... 15
1.4 Méthodologie adoptée..... 16
CHAPITRE 2 : ÉTUDE THÉORIQUE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE..... 17
Introduction..... 18
2.1 Généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque..... 18
2.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque..... 19
2.3 Rendement des panneaux photovoltaïques..... 20
2.4 Facteurs influençant les performances des systèmes photovoltaïques..... 20
2.5 Effets de la poussière et de l'encrassement..... 20
2.6 L'éclairage public solaire autonome et les luminaires solaires..... 23
2.7 Techniques de nettoyage des panneaux solaires..... 25
2.8 Capteurs optiques..... 28
2.9 Capteur infrarouge appliqué à la détection de saleté..... 29
2.10 Systèmes automatiques de nettoyage..... 29
CHAPITRE 3 : CONCEPTION ET RÉALISATION DU SYSTÈME..... 30
Introduction..... 31
3.1 Analyse des besoins et spécifications du système..... 31
3.1.1 Présentation du besoin..... 31
3.1.2 Fonctions principales du système..... 31
3.1.3 Contraintes du prototype..... 32

3.2 Architecture générale du système..... 32
3.3 Conception mécanique..... 34
3.3.1 Principe de la conception mécanique..... 34
3.3.2 Principe du système de nettoyage..... 34
3.3.3 Actionnement du mécanisme..... 35
3.3.4 Alimentation..... 35
3.4 Principe de fonctionnement et algorithme de commande..... 36
3.4.1 Séquence générale de commande..... 36
3.4.2 Détection de l'encrassement et choix du nettoyage..... 38
3.5 Conception de la carte électronique..... 39
3.6 Réalisation du prototype..... 43
3.7 Résultats du prototype..... 44
CONCLUSION GÉNÉRALE..... 47
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... 48

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Panneau photovoltaïque recouvert de poussière..... 14
Figure 2.1 : Centrale photovoltaïque composée de nombreux panneaux solaires..... 18
Figure 2.2 : Principe de la conversion photovoltaïque dans une cellule au silicium..... 19
Figure 2.3 : Dépôt de poussière sur un panneau photovoltaïque réel : contraste entre zone propre et zone encrassée..... 21
Figure 2.4 : Panneau photovoltaïque sali par les déchets d'oiseaux et leurs fientes, ainsi que par la poussière et le sable..... 22
Figure 2.5 : Luminaires solaires réels : (a) panneaux séparés montés en tête de mât ; (b) luminaire tout-en-un..... 23
Figure 2.6 : Luminaire solaire d'éclairage public : le panneau est installé en haut du mât..... 24
Figure 2.7 : Nettoyage manuel d'un panneau photovoltaïque à la raclette et à l'eau savonneuse..... 25
Figure 2.8 : Nettoyage manuel d'un panneau photovoltaïque avec une brosse à manche télescopique..... 26
Figure 2.9 : Nettoyage manuel d'un panneau photovoltaïque avec un chiffon..... 27
Figure 2.10 : Nettoyage d'un luminaire solaire par nacelle élévatrice..... 28
Figure 3.1 : Schéma fonctionnel du système automatisé de nettoyage..... 33
Figure 3.2 : Principe simplifié du déplacement vertical de la raclette..... 34
Figure 3.3 : Carte de développement ESP32 utilisée comme unité de commande..... 36
Figure 3.4 : Module horloge temps réel DS1302 utilisé pour la mise en marche à 2h00 du matin..... 36
Figure 3.5 : Organigramme du cycle de nettoyage avec choix du mode (sans eau ou avec eau) selon l'écart ΔS..... 37
Figure 3.6 : Montage de test du système sur platine d'essai (breadboard), avant la réalisation de la carte..... 40
Figure 3.7 : Routage des pistes de la carte électronique de commande..... 41
Figure 3.8 : Vue en trois dimensions de la carte électronique..... 41
Figure 3.9 : Carte électronique réalisée et connectée à ses capteurs..... 42
Figure 3.10 : Prototype réalisé..... 44
Figure 3.11 : Prototype pendant le nettoyage..... 45
Figure 3.12 : Prototype à la fin du nettoyage..... 45
Figure 3.13 : Avant et après le passage de la raclette..... 45

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Principaux composants du prototype..... 35

LISTE DES ABRÉVIATIONS

A4988 : Driver / Pilote de moteur pas-à-pas intégrateur d'enroulement

ESP32 : Microcontrôleur à architecture 32 bits commercialisé par Espressif Systems

IEA : Agence Internationale de l'Énergie (International Energy Agency)

IR : Infrarouge (Infrared)

IRENA : Agence Internationale pour les Énergies Renouvelables (International Renewable Energy Agency)

LDR : Photorésistance (Light Dependent Resistor)

LED: Diode électroluminescente (Light-Emitting Diode)

NREL : Laboratoire National des Énergies Renouvelables (National Renewable Energy Laboratory)

PCB : Carte de circuit imprimé (Printed Circuit Board)

PV : Photovoltaïque

RTC : Horloge temps réel (Real-Time Clock)

STC: Conditions normalisées de test (Standard Test Conditions)

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'énergie solaire photovoltaïque occupe une place croissante dans la transition énergétique, grâce à sa modularité et à la baisse continue de son coût [7], [12]. En Algérie, elle est particulièrement adaptée à l'éclairage public solaire autonome, où chaque luminaire produit et stocke son énergie sans raccordement au réseau, ce qui s'avère particulièrement précieux dans les zones isolées.

Or, en Algérie, de nombreux projets de luminaires solaires ont été réalisés dans plusieurs villes, dont Bordj Bou Arréridj, mais leur nettoyage n'est presque jamais assuré, car il est compliqué : panneaux en hauteur, nacelle, équipe et eau nécessaires. Le sable et la poussière s'accumulent alors sur les panneaux et réduisent le rayonnement qui atteint les cellules [10], [14]. Après un certain temps, les batteries ne se chargent plus suffisamment et les luminaires s'arrêtent de fournir de l'électricité : l'investissement est fait, mais l'éclairage ne fonctionne plus. C'est ce constat, visible sur le terrain, qui est à l'origine de ce projet.

La question de ce mémoire est donc la suivante : comment concevoir un dispositif intégré au luminaire, simple et autonome, capable de déterminer le moment opportun du nettoyage et de l'exécuter sans intervention humaine ? Nous proposons un prototype fondé sur un ESP32, une horloge temps réel mettant le système en marche à 2h00 du matin, un capteur infrarouge de détection de poussière, une pompe et une raclette entraînée par un seul moteur.

Le mémoire comprend trois chapitres : le cadre et les objectifs (chapitre 1), l'étude théorique (chapitre 2), puis la conception, la réalisation et les résultats du prototype (chapitre 3). Une conclusion générale présente le bilan du travail.

CHAPITRE 1 :

CONTEXTE, PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

Introduction

Ce chapitre introduit l'étude théorique et la conception. Il situe le travail dans son contexte énergétique, énonce le problème technique auquel il répond, fixe les objectifs poursuivis, décrit la démarche suivie.

1.1 Contexte général

Avec l'augmentation continue de la demande énergétique mondiale et l'épuisement progressif des ressources fossiles, les énergies renouvelables occupent aujourd'hui une place stratégique. L'énergie solaire photovoltaïque, propre, durable et abondante, est particulièrement adaptée aux régions fortement ensoleillées comme l'Algérie.

Les panneaux photovoltaïques convertissent directement le rayonnement solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Leur rendement dépend toutefois des conditions de fonctionnement : température des cellules, éclairement reçu et état de la surface du panneau [2], [15].

Cette énergie trouve une application directe dans l'éclairage public solaire autonome. Communes et gestionnaires de voirie installent de plus en plus de luminaires qui produisent et stockent leur propre énergie, sans raccordement au réseau. Ce type d'éclairage est avantageux pour les zones isolées, mais il repose entièrement sur la capacité du panneau à capter le rayonnement solaire, donc sur la propreté de sa surface.

En Algérie, plusieurs projets d'éclairage public solaire ont ainsi été lancés dans de nombreuses villes, dont Bordj Bou Arréridj. Le constat de terrain est cependant le suivant : le nettoyage de ces luminaires est quasiment absent, car il est difficile et coûteux à organiser. Au bout d'une certaine période, de nombreux luminaires ne donnent plus de lumière et ne se mettent plus en marche, non pas à cause d'une panne, mais parce que leurs panneaux sont sales, couverts de poussière, et ne produisent plus assez d'énergie. C'est ce constat qui est à l'origine de ce projet.

1.2 Problématique

Dans les zones désertiques et très sèches, les panneaux sont fortement exposés au dépôt de poussière, de sable et de particules atmosphériques. Ce dépôt réduit la transmission lumineuse vers les cellules et diminue la puissance produite. Selon les sites et la durée d'exposition sans nettoyage, les pertes rapportées dans la littérature vont de quelques pour cent à plus de 30 % dans les cas extrêmes [10], [14].

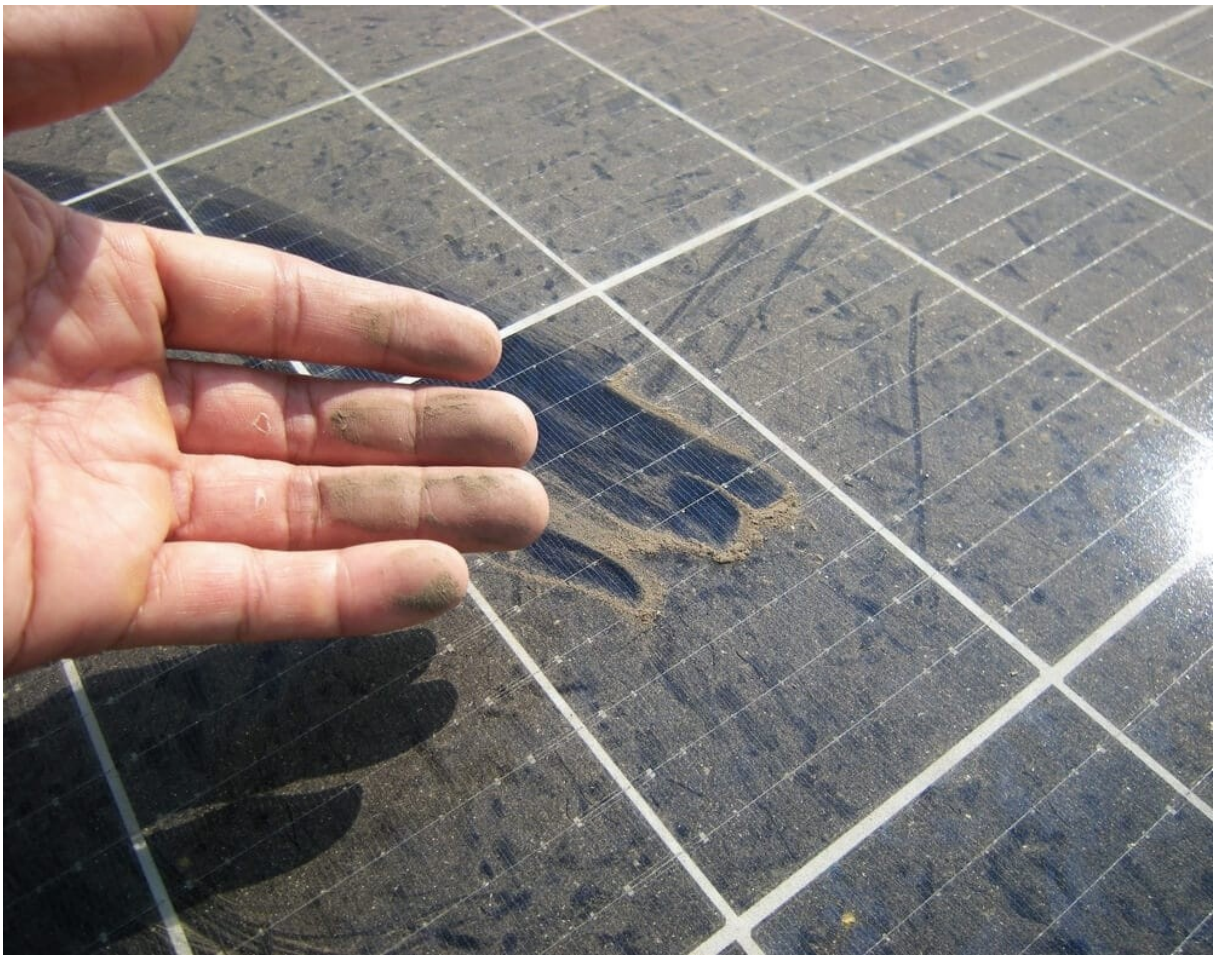


Figure 1.1 : Panneau photovoltaïque recouvert de poussière.

Le nettoyage manuel présente plusieurs inconvénients : il est coûteux, mobilise du personnel, ne peut pas être répété souvent et se heurte à des difficultés d'accès. Le cas de l'éclairage public est le plus défavorable. Les panneaux étant installés en hauteur sur des mâts, l'opération nécessite une nacelle élévatrice, un véhicule spécialisé, une équipe qualifiée et parfois une signalisation de chantier. Elle est donc rarement répétée. Les luminaires se retrouvent alors avec des panneaux sales, une autonomie réduite et un éclairage défaillant.

Les conséquences de l'encrassement s'enchaînent ainsi : la poussière se dépose sur la surface du panneau, ce qui réduit la lumière qui arrive aux cellules ; le panneau produit alors moins d'électricité, la batterie est insuffisamment chargée en fin de journée et la durée d'éclairage se raccourcit ; le luminaire finit par s'éteindre prématurément et la batterie vieillit plus vite.

Face à l'absence d'entretien régulier des équipements, il apparaît indispensable de rendre le luminaire auto-nettoyant.

Il devient dès lors nécessaire de disposer de systèmes de nettoyage automatiques, autonomes et capables de n'intervenir que lorsque cela est utile, afin de maintenir le rendement des panneaux sans mobiliser de moyens lourds.

1.3 Objectifs du mémoire

L'objectif principal est de concevoir et de réaliser un système automatique de nettoyage de panneaux solaires, fondé sur un capteur infrarouge de détection de poussière et destiné aux luminaires solaires autonomes.

Cet objectif général se décline en objectifs spécifiques :

- étudier l'impact de la poussière sur le rendement photovoltaïque ;
- présenter l'éclairage public solaire autonome et le fonctionnement des luminaires solaires ;
- analyser les méthodes de nettoyage existantes et leurs limites ;
- étudier le principe de fonctionnement des capteurs optiques ;
- concevoir un système de détection de saleté fondé sur un capteur infrarouge ;
- intégrer une horloge temps réel (RTC) afin de mettre le système en marche chaque jour à 2h00 du matin ;
- développer un système de nettoyage piloté par microcontrôleur ;
- valider expérimentalement le fonctionnement du prototype par des essais.

1.4 Méthodologie adoptée

La démarche suit cinq étapes. Une étude bibliographique permet d'abord de cerner le phénomène d'encrassement, les solutions de nettoyage existantes et les capteurs envisageables. Les besoins sont ensuite traduits en spécifications, puis en une conception électronique et mécanique, dont la carte de commande a été dessinée à l'aide d'un outil de conception assistée par ordinateur. Le prototype est alors réalisé et testé, et les résultats sont présentés à la fin du chapitre 3. Ces résultats servent aussi à ajuster la conception au fur et à mesure.

CHAPITRE 2 :

ÉTUDE THÉORIQUE DE L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Introduction

Ce chapitre rassemble les bases théoriques sur lesquelles repose la conception du système. Il rappelle d'abord le principe et les performances des cellules photovoltaïques, puis étudie l'effet de l'encrassement, le fonctionnement des luminaires solaires autonomes, les techniques de nettoyage et enfin les capteurs optiques utilisables pour détecter la poussière.

2.1 Généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des principales technologies de conversion des énergies renouvelables. Elle exploite la capacité de certains matériaux semi-conducteurs à produire un courant électrique lorsqu'ils sont exposés au rayonnement solaire. Selon Messenger et Ventre [12], cette technologie se distingue par sa modularité, sa fiabilité et la possibilité de l'adapter à des échelles très différentes, des applications domestiques aux centrales de grande puissance.

Son développement rapide s'explique par la baisse continue du coût de production des modules, l'amélioration des rendements et des politiques énergétiques favorables à la transition [5], [7]. La figure 2.1 montre une centrale composée d'un grand nombre de panneaux.



Figure 2.1 : Centrale photovoltaïque composée de nombreux panneaux solaires.

2.2 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le fonctionnement d'une cellule repose sur l'effet photovoltaïque, mis en évidence par Becquerel en 1839. Une cellule au silicium est constituée d'une jonction p-n obtenue par dopage, qui crée un champ électrique interne [4].

Lorsque le rayonnement atteint la cellule, les photons dont l'énergie est supérieure à la largeur de la bande interdite du matériau génèrent des paires électron-trou. Sous l'action du champ interne, les charges sont séparées puis collectées par les électrodes, ce qui produit un courant continu exploitable [8]. La figure 2.2 illustre ce mécanisme.

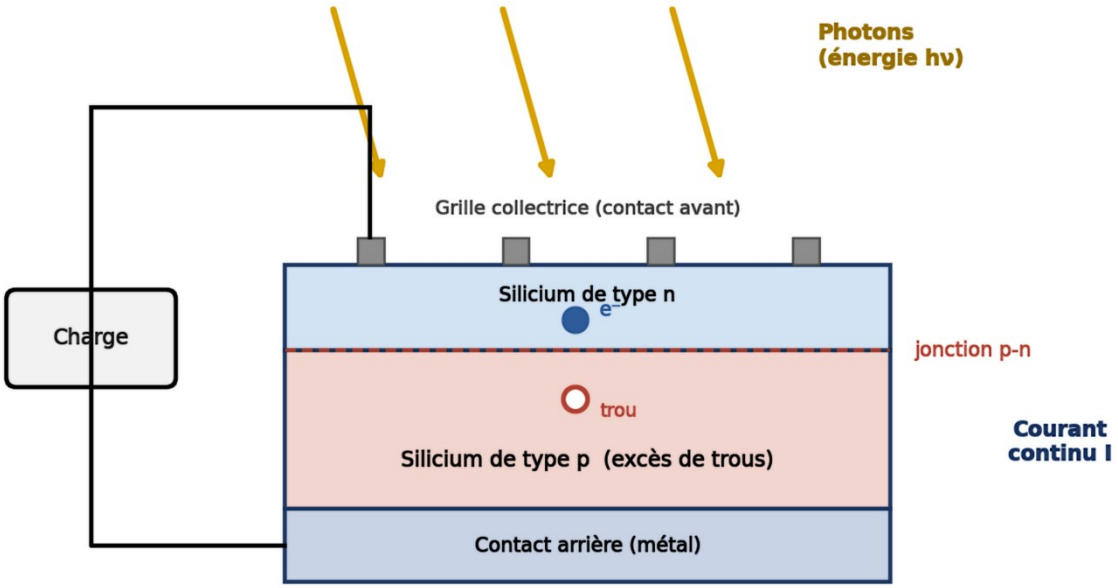


Figure 2.2 : Principe de la conversion photovoltaïque dans une cellule au silicium.

Le comportement électrique d'un module est décrit par sa caractéristique courant-tension, dont les grandeurs essentielles sont le courant de court-circuit I_{cc}, la tension en circuit ouvert V_{co} et la puissance maximale P_{max}. Le courant de court-circuit est quasi proportionnel à l'éclairement reçu par les cellules, ce qui explique la sensibilité directe du courant produit à toute réduction de la transmission du verre.

2.3 Rendement des panneaux photovoltaïques

Le rendement est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par le module et la puissance du rayonnement incident sur sa surface :

$$\eta = P_{max} / (G \cdot S) \tag{2.1}$$

où G est l'éclairement (W/m²) et S la surface du module (m²). Les performances nominales sont définies dans les conditions normalisées de test (STC) : éclairement de 1000 W/m², température de cellule de 25 °C et spectre AM 1,5. Cet indicateur est essentiel pour comparer les technologies [2].

Les modules au silicium monocristallin présentent les meilleurs rendements commerciaux, pouvant atteindre 24 %, tandis que les technologies polycristallines affichent des rendements légèrement inférieurs. Les couches minces sont moins performantes mais offrent des avantages de coût et de comportement sous faible éclairement [13].

2.4 Facteurs influençant les performances des systèmes photovoltaïques

Les performances réelles dépendent de paramètres environnementaux et techniques. L'élévation de la température diminue la puissance du module : pour le silicium cristallin, la puissance varie d'environ −0,4 % par degré Celsius au-delà de 25 °C [15], soit :

$$P(T) = P_{STC} \cdot [1 + \gamma (T - 25)] \quad \text{avec } \gamma \approx -0{,}004\ °C^{-1} \tag{2.2}$$

Le vieillissement des modules, estimé en moyenne à 0,5 % de perte de performance par an, doit également être pris en compte pour l'analyse à long terme [5]. À ces facteurs s'ajoute l'encrassement de la surface, dont l'effet est détaillé ci-après.

2.5 Effets de la poussière et de l'encrassement

L'encrassement désigne l'accumulation de poussières et de particules diverses sur la surface du panneau. Les dépôts diffusent et absorbent une partie du rayonnement avant qu'il n'atteigne les cellules, ce qui réduit le courant et la puissance produits.

La figure 2.3 montre ce dépôt sur un panneau réel ; la différence de teinte entre la zone propre et la zone encrassée est nettement visible.

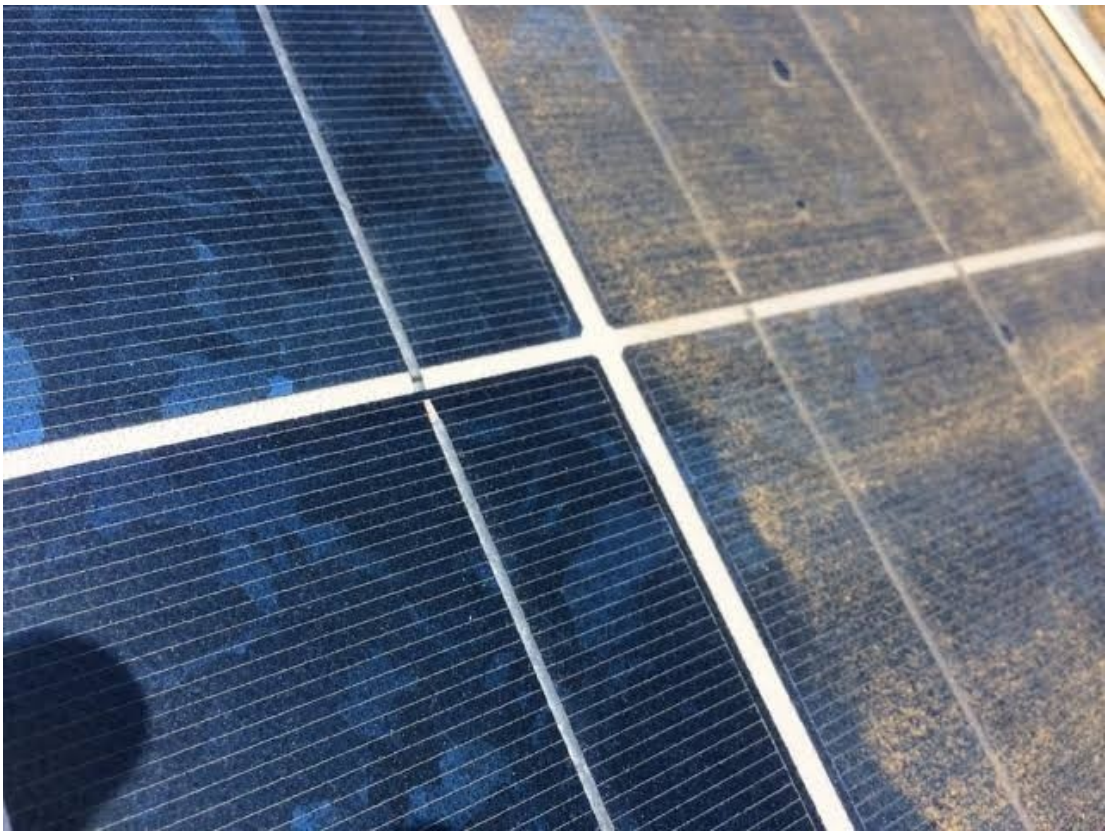


Figure 2.3 : Dépôt de poussière sur un panneau photovoltaïque réel : contraste entre zone propre et zone encrassée.

En réalité, la poussière n'est pas la seule cause de salissure. Un panneau est exposé à toutes sortes de dépôts : le sable et la poussière apportés par le vent, les fientes d'oiseaux (notamment de pigeons), les plumes, les feuilles et d'autres débris (figure 2.4). La pluie ne règle pas toujours le problème : quand elle est faible, elle se mélange à la poussière et forme une boue qui sèche sur la surface et reste collée au verre.

Ces dépôts collants ou durcis ne partent pas avec un simple essuyage à sec. C'est pourquoi le prototype proposé dans ce mémoire peut aussi nettoyer avec de l'eau : l'eau ramollit la boue et les fientes, et la raclette les enlève ensuite plus facilement.



Figure 2.4 : Panneau photovoltaïque sali par les déchets d'oiseaux et leurs fientes, ainsi que par la poussière et le sable.

L'ampleur de la perte dépend de la densité et de la nature des particules, de l'inclinaison du panneau, de l'humidité et de la durée d'exposition sans nettoyage [9], [10]. Lorsque la poussière se combine à la rosée, elle peut former une croûte adhérente plus difficile à éliminer. Dans les régions sèches, comme une grande partie du territoire algérien, le phénomène est amplifié par la fréquence des vents de sable et par la rareté des pluies susceptibles de nettoyer partiellement les surfaces [5], [15].

À l'échelle mondiale, Ilse et al. [6] évaluent les pertes dues à l'encrassement à quelques pour cent de la production photovoltaïque et soulignent que le coût du nettoyage en est un poste de dépense important. Sarver et al. [14] montrent par ailleurs que l'effet de la poussière est local et varie fortement d'un site à l'autre, ce qui plaide pour un nettoyage déclenché selon l'état réel de la surface plutôt que selon un calendrier uniforme.

2.6 L'éclairage public solaire autonome et les luminaires solaires

L'éclairage public solaire autonome désigne un système d'éclairage extérieur (voirie, parkings, cités, zones rurales, pistes) qui produit et stocke lui-même l'énergie dont il a besoin, sans raccordement au réseau. Chaque point lumineux, ou luminaire solaire, est une mini-installation photovoltaïque indépendante. Cette solution convient aux sites isolés ou difficiles à raccorder, fréquents dans les régions sahariennes et rurales d'Algérie.

Un luminaire solaire autonome comprend les éléments suivants :

- un panneau photovoltaïque, qui convertit le rayonnement solaire en énergie électrique pendant la journée ;
- une batterie de stockage (lithium-fer-phosphate ou plomb-gel selon les modèles), qui accumule l'énergie produite le jour pour l'éclairage nocturne ;
- un régulateur de charge, qui protège la batterie contre les surcharges et les décharges profondes et gère l'allumage et l'extinction ;
- une source lumineuse à LED, choisie pour son efficacité lumineuse, sa faible consommation et sa longue durée de vie ;
- un mât ou support, qui porte le panneau et le luminaire à une hauteur généralement comprise entre 4 et 10 mètres pour l'éclairage de voirie.

En pratique, ces luminaires se présentent sous deux configurations : à panneau séparé monté en tête de mât, ou de type tout-en-un (figure 2.5).



Figure 2.5 : Luminaires solaires réels : (a) panneaux séparés montés en tête de mât ; (b) luminaire tout-en-un.

La figure 2.6 montre un exemple de luminaire solaire d'éclairage public : le panneau photovoltaïque est placé en haut du mât, au-dessus de la lampe.



Figure 2.6 : Luminaire solaire d'éclairage public : le panneau est installé en haut du mât.

Le fonctionnement est entièrement automatique : le panneau charge la batterie le jour ; à la tombée de la nuit, détectée par la tension du panneau ou par une cellule crépusculaire, le régulateur alimente la LED, éventuellement avec une gradation de l'intensité ou un détecteur de présence pour économiser l'énergie. On distingue les luminaires « tout-en-un », où panneau, batterie et LED sont réunis dans un même boîtier, et les luminaires à éléments séparés, où le panneau est monté en haut du mât et la batterie placée dans un coffret ou au pied du mât.

Les principaux avantages de cette solution sont l'absence de facture d'électricité, l'absence de tranchées et de câblage, la rapidité d'installation, la continuité de service en cas de coupure du réseau et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Ses limites sont le coût d'investissement initial, la durée de vie limitée des batteries et surtout la dépendance directe de l'autonomie à l'énergie réellement captée.

Cette dernière limite est déterminante. Le luminaire est dimensionné pour fournir un nombre d'heures d'éclairage donné, avec un nombre de jours d'autonomie en l'absence de soleil, en supposant que le panneau produise l'énergie prévue. Or un panneau empoussiéré produit moins : la batterie se charge insuffisamment, la durée d'éclairage diminue, le luminaire peut s'éteindre avant la fin de la nuit et la batterie, régulièrement sous-chargée, vieillit plus vite. Le problème est accentué par la petite taille du panneau d'un luminaire, qui laisse peu de marge de surdimensionnement.

2.7 Techniques de nettoyage des panneaux solaires

Dans la pratique, le nettoyage des panneaux photovoltaïques est réalisé par l'humain, selon deux modes :

- le nettoyage manuel direct, effectué à portée de main avec des outils simples (brosse, chiffon, raclette) et de l'eau, coûteux en main-d'œuvre et difficilement applicable à grande échelle (figure 2.7) ;
- le nettoyage par nacelle, utilisé lorsque les panneaux sont en hauteur, comme sur les luminaires solaires : un opérateur est élevé jusqu'au panneau pour le laver (figure 2.10).

La figure 2.7 illustre un nettoyage manuel à la raclette, avec de l'eau savonneuse.



Figure 2.7 : Nettoyage manuel d'un panneau photovoltaïque à la raclette et à l'eau savonneuse.

D’autres outils simples sont aussi très utilisés, comme la brosse à manche télescopique et le chiffon (figures 2.8 et 2.9).

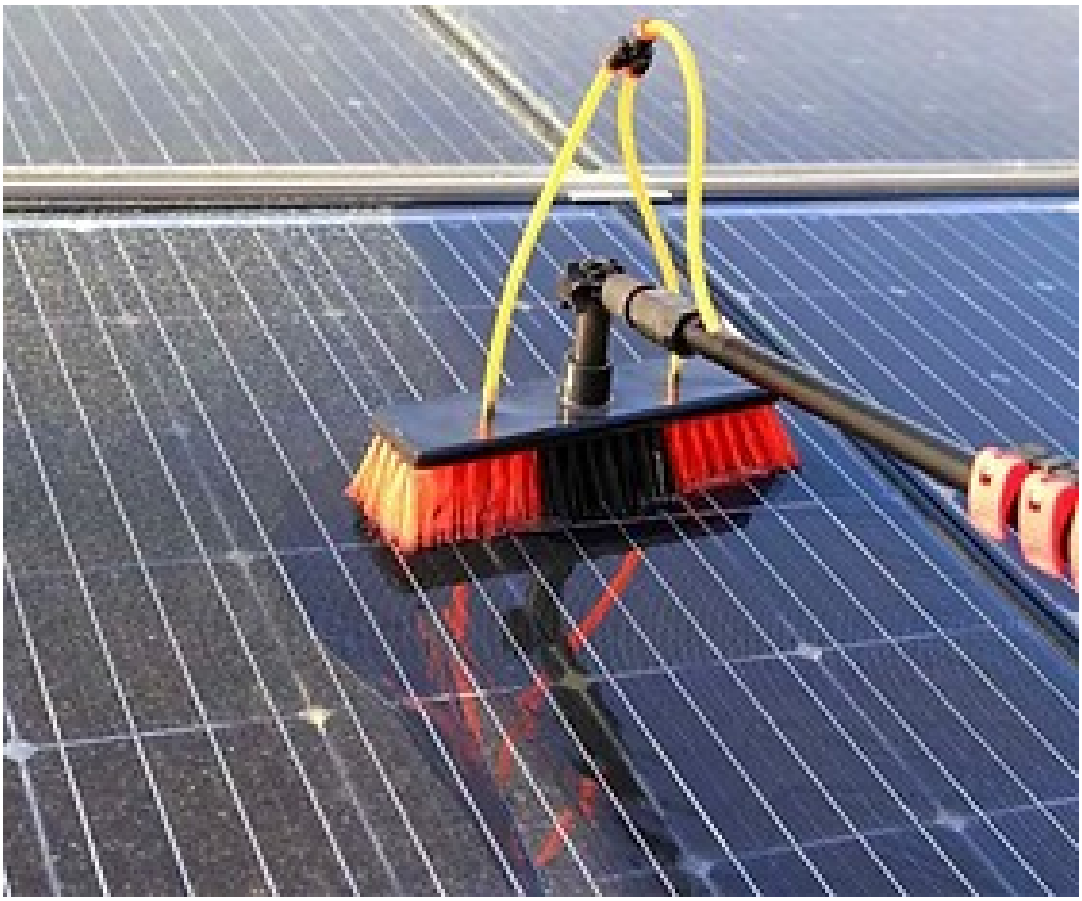


Figure 2.8 : Nettoyage manuel d’un panneau photovoltaïque avec une brosse à manche télescopique.



Figure 2.9 : Nettoyage manuel d'un panneau photovoltaïque avec un chiffon.

Pour l'éclairage public, la difficulté tient à la hauteur des panneaux, inaccessibles depuis le sol. L'opération classique utilise une nacelle élévatrice montée sur camion, qui permet à un opérateur de laver le panneau à l'eau et à la brosse. Cette méthode est efficace mais lourde, pour les raisons suivantes :

- elle nécessite un véhicule spécialisé dont l'acquisition ou la location, le carburant et l'entretien représentent un coût important ;
- elle mobilise au minimum un conducteur et un opérateur en hauteur, formés et habilités ;
- elle impose souvent un balisage de la zone, voire une restriction temporaire de la circulation ;
- elle oblige à transporter l'eau jusqu'au site, alors que la ressource est rare en zone sèche ;
- le temps d'intervention par luminaire (positionnement, montée, lavage, descente) limite le nombre de points traités par journée ;
- le coût est multiplié par le nombre de luminaires et par la fréquence de nettoyage : sur un parc de plusieurs centaines ou milliers de points répartis sur de longues distances, il devient prohibitif.

La figure 2.10 illustre ce nettoyage par nacelle, qui mobilise un véhicule et un opérateur en hauteur.



Figure 2.10 : Nettoyage d'un luminaire solaire par nacelle élévatrice.

En pratique, beaucoup de luminaires ne sont nettoyés qu'une ou deux fois par an, voire jamais, et la poussière s'accumule pendant de longues périodes. Sur la durée de vie de l'installation, le coût cumulé de la nacelle et de la main-d'œuvre peut devenir comparable à une part non négligeable du coût du luminaire. Cette situation justifie un dispositif intégré au luminaire, qui agit directement sur le panneau sans intervention humaine ni engin élévateur.

Le nettoyage par l'humain, qu'il soit manuel ou réalisé par nacelle, reste donc coûteux, peu fréquent et dépendant d'une eau souvent transportée. Pour l'éclairage public solaire autonome, un dispositif de nettoyage intégré au luminaire apparaît comme la solution la mieux adaptée.

2.8 Capteurs optiques

Un capteur optique convertit une grandeur lumineuse en signal électrique. On distingue les photorésistances (LDR), les photodiodes et phototransistors, plus rapides et plus linéaires, et les capteurs à réflexion, qui mesurent la lumière renvoyée par une surface pour en déduire son état. Ils

sont très utilisés pour leur simplicité, leur faible coût et leur compatibilité avec les entrées d'un microcontrôleur.

2.9 Capteur infrarouge appliqué à la détection de saleté

Appliqué à un panneau photovoltaïque, un capteur infrarouge détecte indirectement la poussière : la lumière transmise ou réfléchie par la surface change par rapport à une valeur de référence obtenue panneau propre. L'écart sert à estimer le niveau d'encrassement, que l'unité de commande utilise comme critère de déclenchement du nettoyage.

Le capteur utilisé comprend un émetteur infrarouge (une diode) et un récepteur. L'émetteur envoie un faisceau infrarouge vers la zone surveillée du panneau ; le récepteur mesure l'intensité qui lui revient et la convertit en une tension électrique, que le convertisseur analogique-numérique de l'ESP32 transforme en valeur numérique. Sur un panneau propre, cette valeur est stable et sert de référence (S_propre). Lorsque la poussière se dépose, elle diffuse et absorbe une partie du rayonnement : le signal reçu diminue d'autant plus que la couche de poussière est épaisse. L'écart ΔS entre la référence et la mesure donne ainsi une image du niveau d'encrassement, sans mesurer directement la quantité de poussière (voir la section 3.4.2).

2.10 Systèmes automatiques de nettoyage

Un système automatique de nettoyage combine trois fonctions : la détection de l'encrassement (par capteur optique ou électrique), la décision par une unité de commande (microcontrôleur) et l'action mécanique de nettoyage (brosse, raclette, jet d'eau). L'introduction de seuils de décision permet d'adapter le mode de nettoyage à l'intensité de l'encrassement détecté, donc d'optimiser la consommation d'eau et d'énergie tout en assurant un rendement photovoltaïque satisfaisant. La mise en marche de la détection peut enfin être programmée par une horloge temps réel, ce qui limite le fonctionnement du système aux plages horaires jugées utiles.

Le travail présenté ici se situe dans cette catégorie, avec une particularité : le système est intégré au luminaire, alimenté par sa propre chaîne énergétique, et sa conception privilégie la simplicité (un capteur de détection, un seul moteur, un seul driver) afin de rester compatible avec le faible coût d'un luminaire d'éclairage public.

CHAPITRE 3 :

CONCEPTION ET RÉALISATION DU SYSTÈME

Introduction

Ce chapitre présente la démarche de conception adoptée pour répondre à la problématique posée au chapitre 1, puis la réalisation du prototype de système automatisé de nettoyage d'un luminaire solaire. Le système repose sur trois fonctions complémentaires : la détection de l'encrassement, la décision et l'action mécanique de nettoyage. L'ensemble est mis en marche chaque jour à 2h00 du matin par une horloge temps réel. Les résultats obtenus avec le prototype sont présentés à la fin du chapitre.

3.1 Analyse des besoins et spécifications du système

3.1.1 Présentation du besoin

L'accumulation de poussière sur le panneau d'un luminaire solaire réduit la quantité de rayonnement reçue et affecte ses performances. Un nettoyage régulier est donc nécessaire pour maintenir le bon fonctionnement du luminaire. Le besoin identifié est de réaliser un système capable de détecter la présence de poussière et de déclencher automatiquement une opération de nettoyage, tout en restant simple, compact et adapté à la structure d'un luminaire solaire.

Le prototype repose sur un microcontrôleur ESP32 [3], qui gère les capteurs et commande les actionneurs. Ce choix s'explique par son nombre d'entrées-sorties, la présence d'entrées analogiques, sa puissance de calcul largement suffisante pour la tâche et son faible coût.

3.1.2 Fonctions principales du système

Le système doit assurer les fonctions suivantes :

- détecter la présence de poussière sur le panneau à l'aide d'un capteur infrarouge ;
- commander une pompe à eau 12 V pour apporter l'eau nécessaire au nettoyage ;
- commander le déplacement vertical de la raclette à l'aide d'un seul moteur, piloté par un seul driver A4988 [1] ;
- contrôler la séquence de nettoyage à partir de l'ESP32 ;
- borner la course du mécanisme grâce à des capteurs de fin de course ;
- surveiller la présence d'eau dans le réservoir à l'aide d'un capteur de niveau d'eau ;

- vérifier l'état de fonctionnement du luminaire à l'aide d'un capteur Hall ;
- assurer la gestion temporelle à l'aide du module DS1302 [11], qui met le système en marche chaque jour à 2h00 du matin.

3.1.3 Contraintes du prototype

La conception tient compte des contraintes suivantes :

- simplicité de la commande électronique ;
- utilisation d'un seul moteur et d'un seul driver ;
- encombrement limité du mécanisme ;
- alimentation adaptée aux différents éléments ;
- fonctionnement automatique, sans intervention permanente de l'utilisateur ;
- intégration au luminaire solaire ;
- protection des composants électroniques contre les conditions extérieures.

L'objectif n'est donc pas de réaliser un système mécanique complexe, mais de valider expérimentalement le principe d'un nettoyage automatisé d'un luminaire solaire à partir d'une architecture électronique simple.

3.2 Architecture générale du système

L'architecture s'organise autour de quatre blocs : la programmation horaire, la détection, le traitement et l'action (figure 3.1). Le module DS1302 fournit l'heure à l'ESP32 ; à 2h00 du matin, le système est mis en marche et le capteur infrarouge commence à rechercher la présence de poussière sur la surface du panneau. Le traitement est assuré par l'ESP32, qui analyse le signal du capteur et commande les actionneurs. L'action est réalisée par une pompe, pour l'apport d'eau, et par un mécanisme de nettoyage entraîné par un seul moteur commandé par un seul driver.

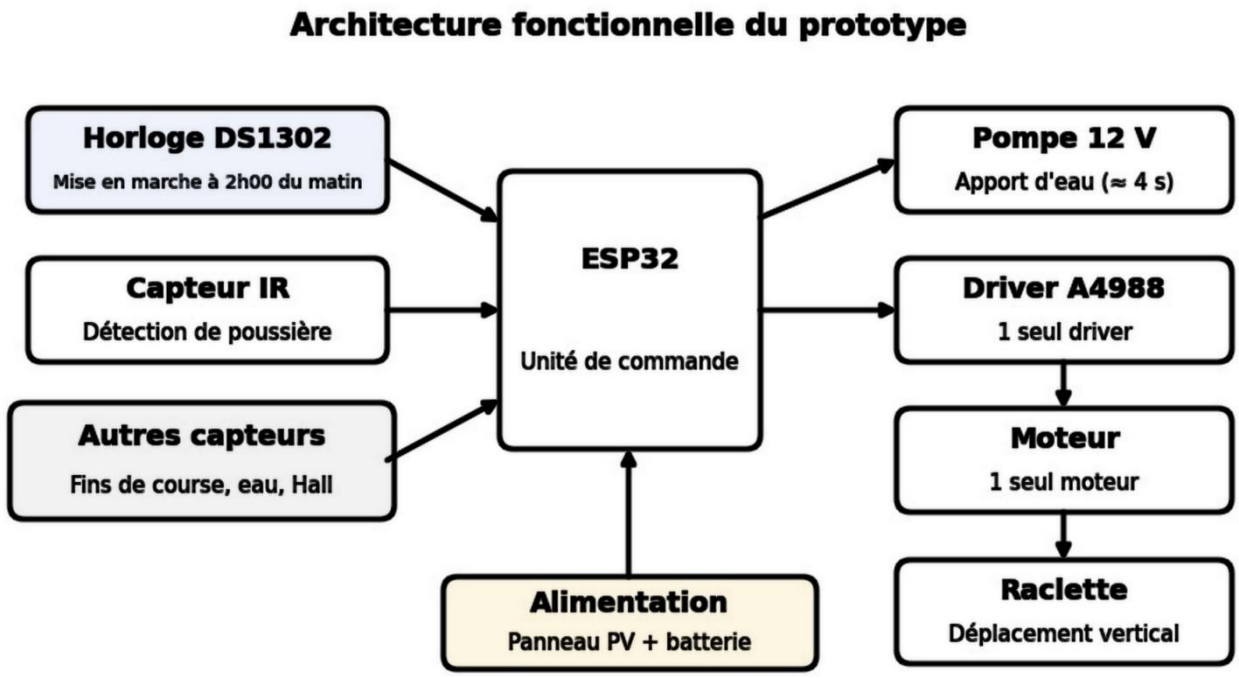


Figure 3.1 : Schéma fonctionnel du système automatisé de nettoyage.

La figure 3.1 se lit de gauche à droite. À gauche figurent les entrées : l'horloge DS1302 fournit l'heure et déclenche la mise en marche à 2h00 du matin ; le capteur infrarouge mesure le signal renvoyé par la surface du panneau (un émetteur envoie un faisceau infrarouge et un récepteur en mesure l'intensité, comme expliqué à la section 2.9) ; les autres capteurs (fins de course, niveau d'eau, capteur Hall) assurent la surveillance et la sécurité du prototype. Au centre, l'ESP32 reçoit ces informations, les traite et commande les sorties. À droite se trouve la chaîne d'action : la pompe 12 V apporte l'eau (environ 4 s), le driver A4988 pilote l'unique moteur, et ce moteur déplace verticalement la raclette. En bas, l'alimentation (panneau photovoltaïque et batterie du luminaire) alimente l'ensemble. Les flèches indiquent le sens de circulation des informations et des commandes.

L'ensemble est alimenté par la chaîne énergétique du luminaire (panneau photovoltaïque, régulateur de charge et batterie), ce qui garantit l'autonomie complète du dispositif. Le capteur de niveau d'eau, le capteur Hall et les fins de course complètent les fonctions de surveillance et de sécurité du prototype.

3.3 Conception mécanique

3.3.1 Principe de la conception mécanique

La conception mécanique reste volontairement simple afin de limiter l'encombrement. La raclette est guidée sur la surface du panneau et se déplace verticalement pour effectuer le nettoyage (figure 3.2). Le mouvement est assuré par un seul moteur, commandé par un seul driver, ce qui simplifie la réalisation et la commande.

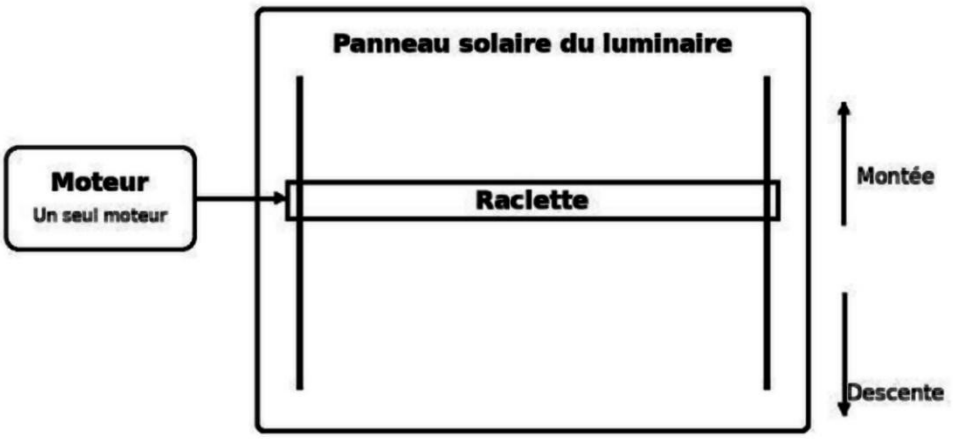


Figure 3.2 : Principe simplifié du déplacement vertical de la raclette.

3.3.2 Principe du système de nettoyage

À partir de 2h00 du matin, le nettoyage est déclenché lorsque le capteur infrarouge détecte de la poussière sur la zone surveillée. Selon l'écart mesuré par rapport au panneau propre, le système lance un essuyage à sec ou commande la pompe pour humidifier la surface ; dans les deux cas, le moteur entraîne la raclette dans un mouvement vertical qui assure le nettoyage.

Le nettoyage avec eau est utile parce que des dépôts comme la boue ou les fientes d'oiseaux ne partent pas avec un simple essuyage à sec. Il utilise un réservoir d'eau. La pompe 12 V prélève l'eau dans ce réservoir pour humidifier la surface du panneau avant le passage de la raclette. Un capteur de niveau d'eau surveille la présence d'eau dans le réservoir, ce qui permet de savoir quand il faut le remplir. La capacité du réservoir détermine le nombre de nettoyages avec eau possibles entre deux remplissages.

3.3.3 Actionnement du mécanisme

Le mécanisme utilise un seul moteur pour déplacer la raclette. Le driver A4988, qui permet de piloter un moteur pas-à-pas par signaux de pas et de direction avec micropas [1], assure sa commande. La pompe 12 V apporte l'eau nécessaire au nettoyage avec eau ; elle fonctionne dans le prototype pendant environ quatre secondes et n'est pas utilisée lors d'un essuyage à sec.

3.3.4 Alimentation

Le système est alimenté par la source énergétique du luminaire. L'ESP32, l'horloge RTC et les éléments de commande sont alimentés par la partie basse tension, tandis que le moteur et la pompe utilisent l'alimentation prévue pour les actionneurs. Le tableau 3.1 présente les principaux composants du prototype.

Tableau 3.1 : Principaux composants du prototype.

ESP32	Unité de traitement et de commande
Horloge DS1302	Gestion du temps, mise en marche à 2h00 du matin
Capteur infrarouge	Détection de poussière
Capteur de niveau d'eau	Surveillance de l'eau du réservoir
Capteur Hall	Vérification de l'état du luminaire
Pompe 12 V	Apport d'eau pour le nettoyage
Moteur	Déplacement de la raclette
Driver A4988	Commande du moteur
Fins de course	Limites du déplacement
Condensateurs	Stabilisation et filtrage de l'alimentation
Résistances	Limitation du courant et niveaux logiques stables
Transistor	Amplification du signal de commande du relais
Relais	Commutation de la pompe 12 V
Réservoir d'eau	Réserve d'eau pour le nettoyage

La figure 3.3 montre la carte ESP32 utilisée comme unité de commande, et la figure 3.4 le module horloge temps réel DS1302 qui assure la mise en marche à 2h00 du matin.

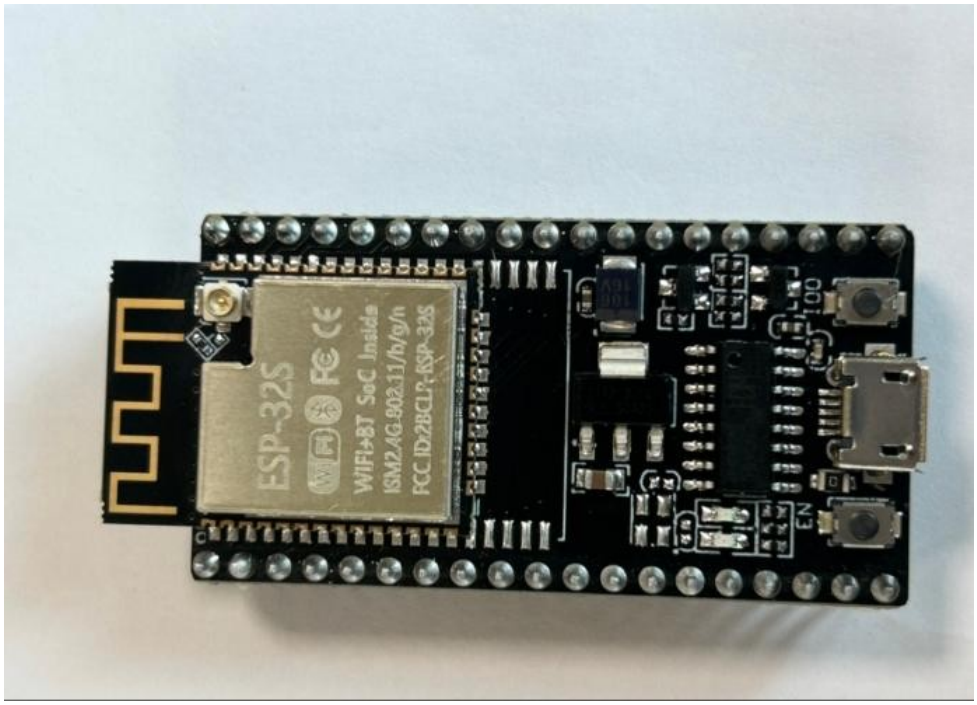


Figure 3.3 : Carte de développement ESP32 utilisée comme unité de commande.

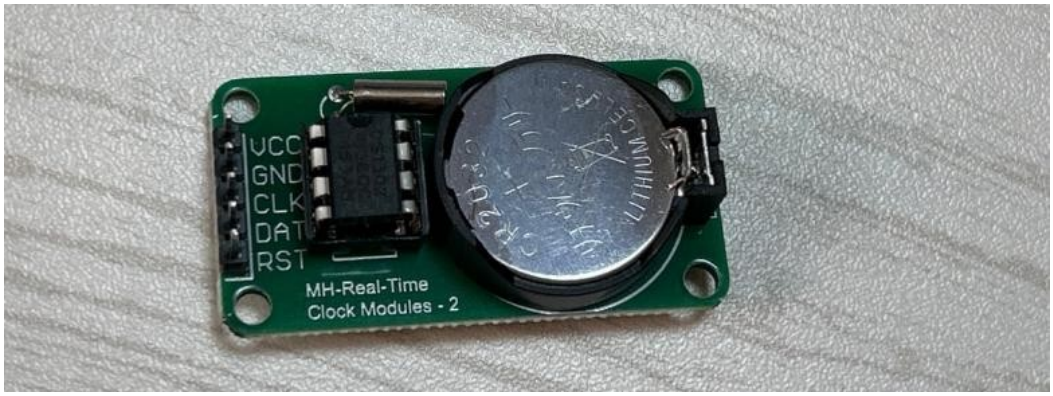


Figure 3.4 : Module horloge temps réel DS1302 utilisé pour la mise en marche à 2h00 du matin.

3.4 Principe de fonctionnement et algorithme de commande

3.4.1 Séquence générale de commande

La commande est exécutée par l'ESP32, qui lit en permanence l'heure fournie par la RTC. Après l'initialisation des capteurs et des actionneurs, le système reste en attente jusqu'à 2h00 du matin. Le capteur infrarouge mesure alors l'écart ΔS de la surface par rapport au panneau propre.

Selon la valeur de ΔS, l'ESP32 choisit entre trois décisions : ne rien faire, effectuer un essuyage à sec, ou effectuer un nettoyage avec eau, pour lequel la pompe fonctionne environ quatre secondes afin d'humidifier le panneau. Dans les deux modes de nettoyage, le moteur entraîne ensuite la raclette dans un mouvement vertical, dont les limites sont contrôlées par les fins de course. À la fin du cycle, le système réinitialise le processus de mesure (figure 3.5).

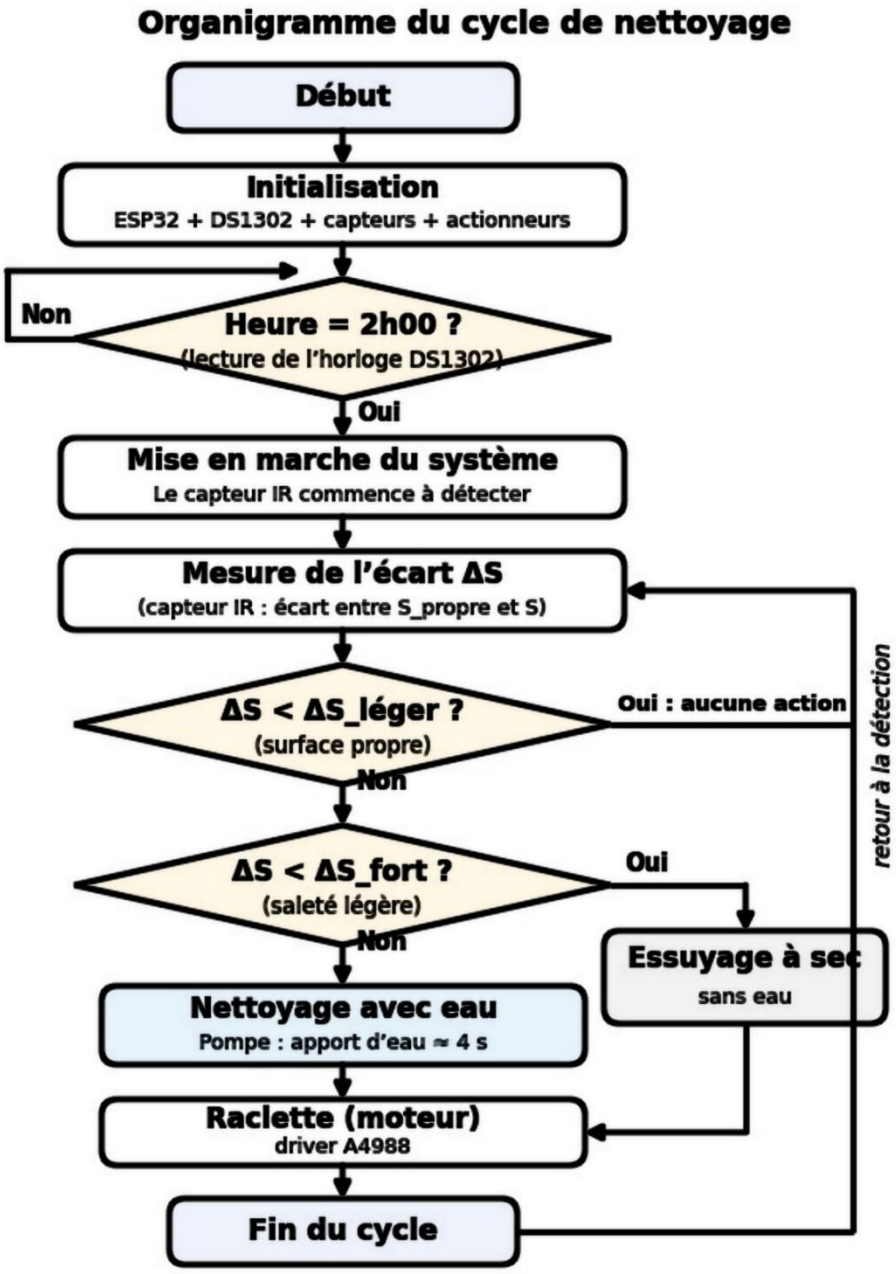


Figure 3.5 : Organigramme du cycle de nettoyage avec choix du mode (sans eau ou avec eau) selon l'écart ΔS.

L'organigramme de la figure 3.5 décrit le déroulement d'un cycle. Après le début et l'initialisation de l'ESP32, de l'horloge DS1302, des capteurs et des actionneurs, le système teste l'heure : tant qu'il n'est pas 2h00 (« Non »), il reste en attente ; à 2h00 (« Oui »), il est mis en marche et le capteur infrarouge commence à détecter. L'ESP32 mesure alors l'écart ΔS. Un premier test compare ΔS à ΔS_léger : si ΔS lui est inférieur, la surface est propre et aucune action n'est menée. Sinon, un second test compare ΔS à ΔS_fort : si ΔS lui est inférieur, la saleté est légère et la raclette passe à sec, sans eau ; dans le cas contraire, la saleté est importante, la pompe apporte de l'eau pendant environ 4 s, puis la raclette, entraînée par le moteur via le driver A4988, nettoie la surface humidifiée. Le cycle se termine alors (« Fin du cycle ») et le système réinitialise le processus de mesure, comme l'indique la flèche de retour à la détection.

Cette logique conserve une architecture simple : l'heure de 2h00 du matin constitue la condition de mise en marche du système, la mesure de l'écart ΔS la condition de déclenchement et de choix du mode de nettoyage, et l'ESP32 coordonne la pompe et le déplacement de la raclette.

3.4.2 Détection de l'encrassement et choix du nettoyage

Le capteur infrarouge ne mesure pas directement la quantité de poussière : il mesure une variation du signal reçu après passage sur la surface du panneau. Le convertisseur analogique-numérique de l'ESP32 transforme ce signal en un nombre entier compris entre 0 et 4095 (12 bits). Ce nombre n'a pas de signification physique en lui-même : il sert à comparer des états du panneau.

Le principe repose sur un étalonnage à trois niveaux. On relève la valeur du capteur dans trois situations, chacune en moyenne de plusieurs lectures pour réduire le bruit :

- S_propre : panneau propre ;
- S_léger : panneau légèrement sale ;
- S_fort : panneau très sale.

Le signal diminue quand la poussière augmente. On travaille donc avec l'écart ΔS entre S_propre et la valeur mesurée S : cet écart augmente avec la saleté. On enregistre dans l'ESP32 deux écarts de référence :

- ΔS_léger : écart relevé quand le panneau est légèrement sale ;
- ΔS_fort : écart relevé quand le panneau est très sale, avec ΔS_léger < ΔS_fort.

À chaque cycle, l'ESP32 relève S, détermine l'écart ΔS avec S_propre, puis le compare aux deux écarts de référence :

- ΔS < ΔS_léger → surface propre, aucune action ;
- ΔS_léger ≤ ΔS < ΔS_fort → saleté légère, la raclette passe à sec, sans eau ;
- ΔS ≥ ΔS_fort → saleté importante, la pompe injecte de l'eau pendant environ quatre secondes, puis la raclette nettoie la surface humidifiée.

L'intérêt est d'utiliser l'eau seulement quand c'est nécessaire, pour limiter la consommation d'une ressource rare dans les régions sèches.

Cette logique reste sensible à l'éclairement ambiant, puisque S varie avec la lumière indépendamment de l'encrassement. La mesure doit donc être faite à heure fixe, dans des conditions d'éclairement comparables : elle est programmée à 2h00 du matin, quand l'éclairement est faible et stable, et les trois valeurs de référence sont relevées dans ces mêmes conditions. Elle pourra être fiabilisée par un capteur de référence (section 4.6).

3.5 Conception de la carte électronique

Avant de dessiner la carte, le système a d'abord été monté et testé sur une platine d'essai (breadboard), comme le montre la figure 3.6. Ces essais ont permis de vérifier le fonctionnement de chaque élément et de corriger le câblage avant la réalisation du circuit imprimé.

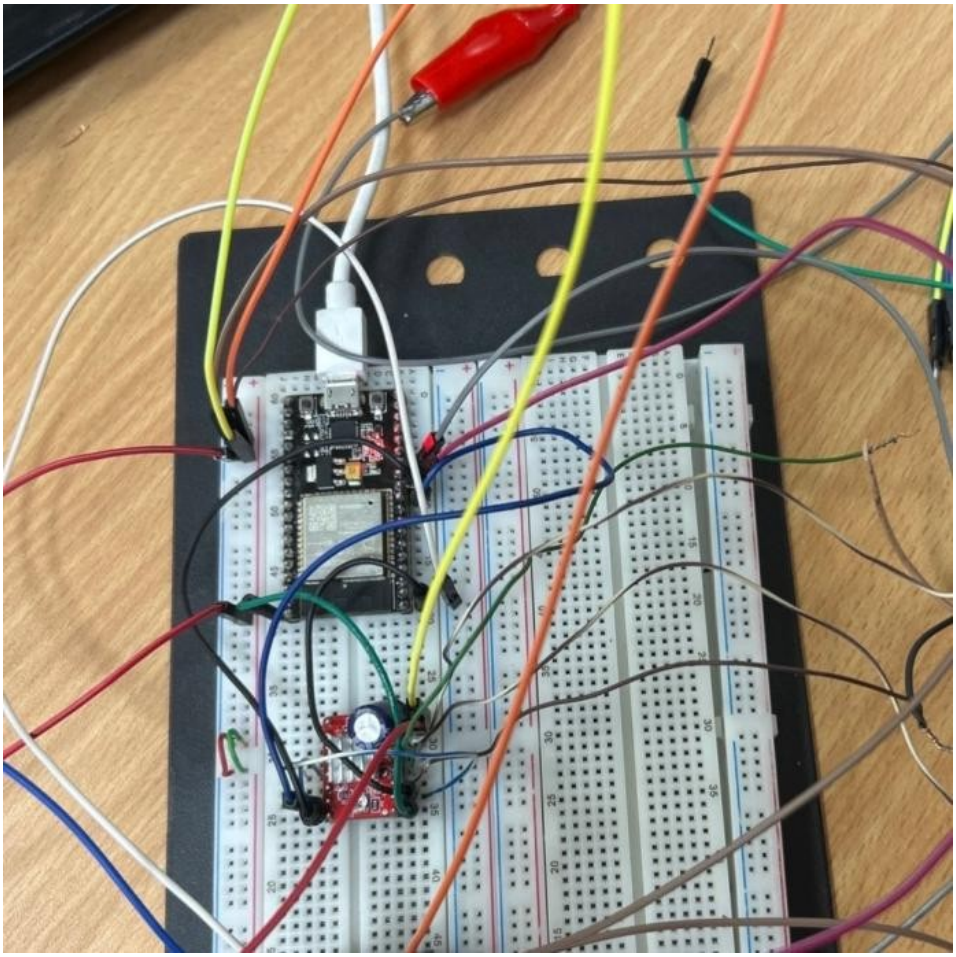


Figure 3.6 : Montage de test du système sur platine d'essai (breadboard), avant la réalisation de la carte.

La commande est regroupée sur une carte qui rassemble l'ESP32, l'horloge RTC, l'interface du capteur infrarouge ainsi que les étages de commande de la pompe et du driver moteur. La carte a été dessinée à l'aide d'un outil de conception assistée par ordinateur : la figure 3.7 présente le routage des pistes, la figure 3.8 une vue en trois dimensions de la carte, et la figure 3.9 la carte réalisée et câblée.

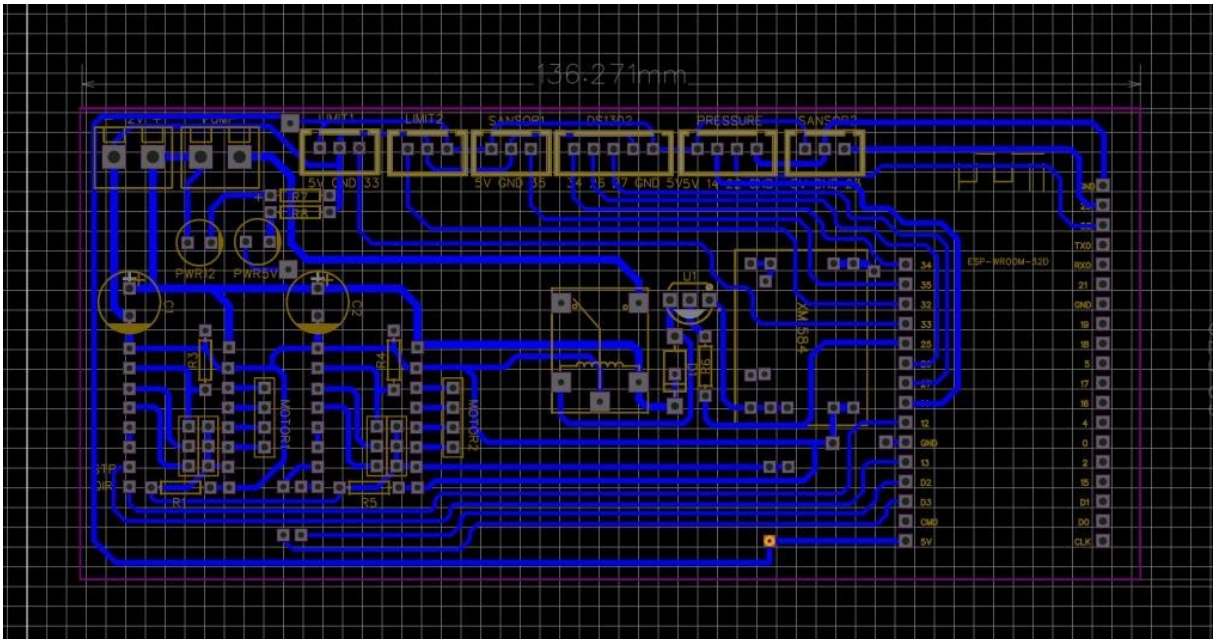


Figure 3.7 : Routage des pistes de la carte électronique de commande.

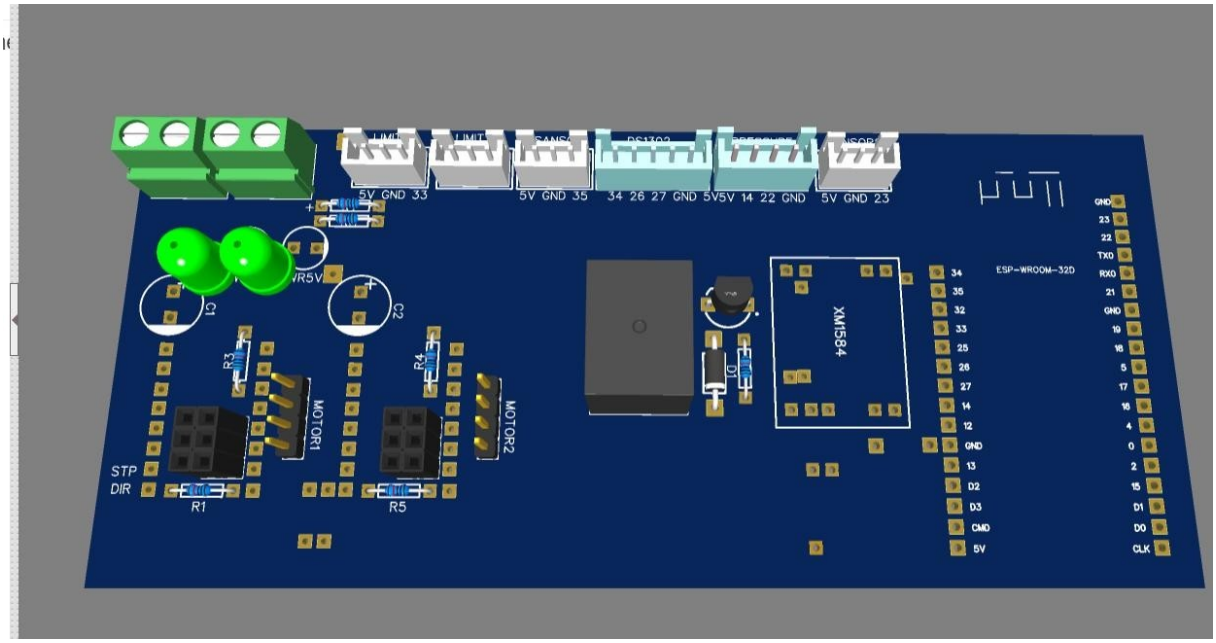


Figure 3.8 : Vue en trois dimensions de la carte électronique.

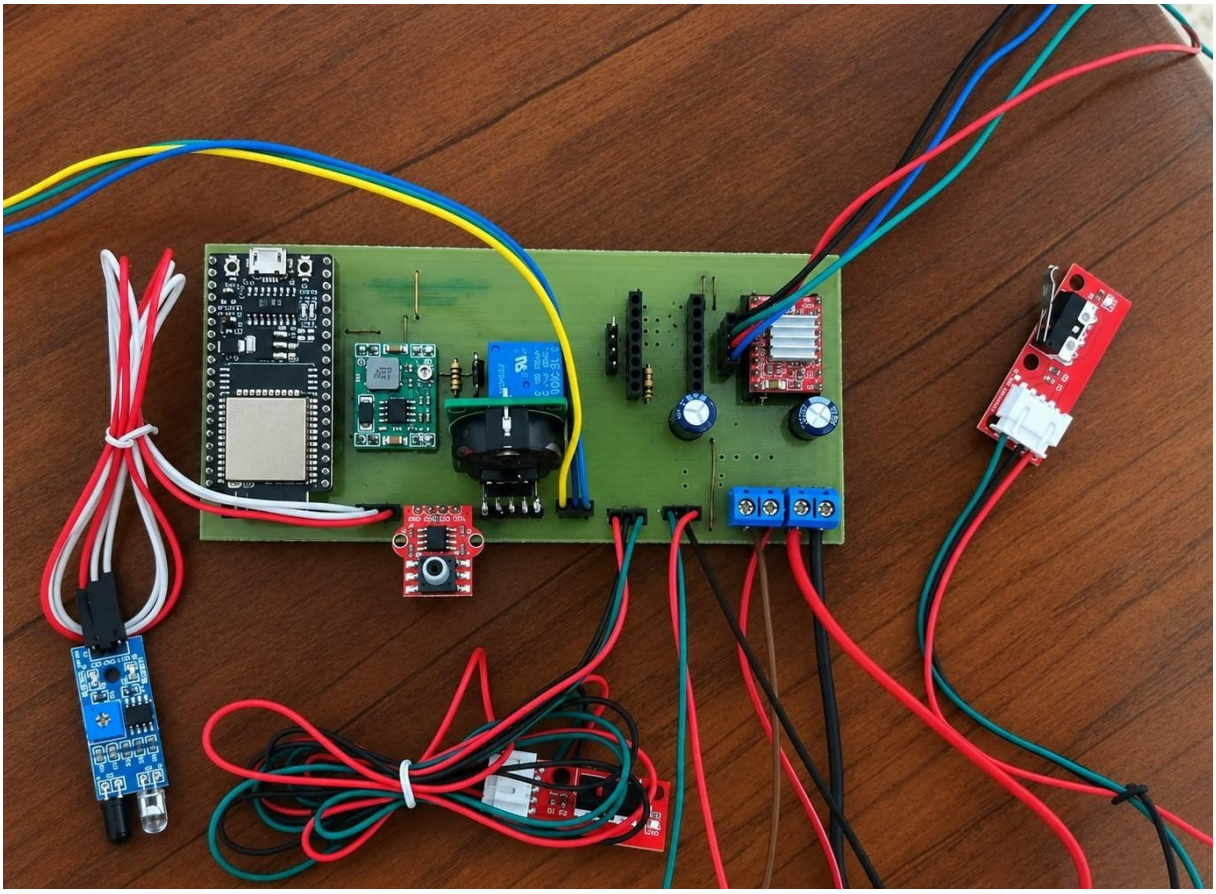


Figure 3.9 : Carte électronique réalisée et connectée à ses capteurs.

Les condensateurs et les résistances sont des composants passifs qui assurent le bon fonctionnement de la carte. Leurs rôles principaux sont les suivants.

Condensateurs de découplage. Placés près de l'ESP32 et du module d'horloge, ils stabilisent la tension d'alimentation et filtrent les petites variations et les parasites, ce qui évite les redémarrages ou les erreurs de lecture.

Condensateur de filtrage. Placé sur l'alimentation du driver A4988 et du moteur, il absorbe les pointes de courant provoquées par le déplacement du moteur et protège le driver contre les surtensions.

Résistances de limitation. Elles limitent le courant dans la diode émettrice du capteur infrarouge et dans les entrées des étages de commande, afin de protéger les composants.

Résistances de rappel (pull-up et pull-down). Elles maintiennent les entrées des fins de course à un niveau logique défini lorsque l'interrupteur n'est pas actionné, ce qui évite les lectures aléatoires.

Transistor. Les sorties de l'ESP32 ne fournissent qu'un très faible courant. Le transistor joue le rôle d'interrupteur électronique : il amplifie le signal de l'ESP32 pour alimenter la bobine du relais.

Relais. Il sépare le circuit de commande de l'ESP32 (3,3 V) du circuit de puissance 12 V et permet à l'ESP32 de mettre la pompe en marche ou de l'arrêter.

Les valeurs de ces composants ont été choisies d'après les fiches techniques des modules utilisés et vérifiées pendant les essais sur platine d'essai.

3.6 Réalisation du prototype

Un prototype fonctionnel a été réalisé pour valider le principe proposé. Le montage associe l'ESP32, l'horloge RTC, le capteur infrarouge, la pompe et un seul moteur commandé par un seul driver. L'ensemble a été intégré sur une maquette reproduisant la configuration d'un panneau de luminaire solaire, avec un panneau incliné et un support fixe (figure 3.10).



Figure 3.10 : Prototype réalisé.

3.7 Résultats du prototype

Une fois le prototype réalisé, il a été testé pour vérifier que le système fonctionne comme prévu. Ces essais sont simples : on regarde si chaque étape de la chaîne se déroule correctement.

Le système se met en marche à 2h00 du matin grâce à l'horloge temps réel. Quand de la poussière est placée sur la zone surveillée, le capteur infrarouge la détecte et l'ESP32 déclenche le cycle de nettoyage. La pompe est alors activée pendant environ quatre secondes, puis le moteur déplace la raclette sur le panneau, dans les limites des fins de course. Le même comportement a été observé d'un essai à l'autre.

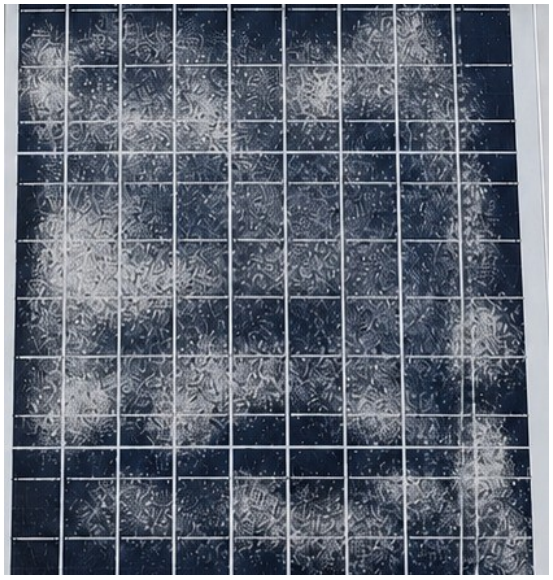
La figure 3.11 montre le prototype pendant l'essai : la partie déjà parcourue par la raclette est propre, le reste est encore couvert de poussière. À la fin du cycle (figure 3.12), le panneau est propre, la quantité de poussière qui était dessus se retrouve en bas. La figure 3.13 compare une zone avant et après le passage de la raclette.



Figure 3.11 : Prototype pendant le nettoyage : la partie déjà parcourue par la raclette est propre.



Figure 3.12 : Prototype à la fin du nettoyage : le panneau est propre, la quantité de poussière qui était dessus se retrouve en bas.



Avant : zone pas encore nettoyée



Après : zone nettoyée par la raclette

Figure 3.13 : Avant et après le passage de la raclette (deux zones du panneau de la figure 3.11).

Ces résultats montrent que la chaîne complète fonctionne : mise en marche par la RTC, détection, décision, puis action de la pompe et du mécanisme. Le prototype répond donc aux objectifs fixés au chapitre 1. Il s'agit d'une validation de fonctionnement.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail a porté sur la conception et la réalisation d'un système automatisé de nettoyage adapté aux luminaires solaires, en réponse à l'encrassement des panneaux photovoltaïques, particulièrement marqué dans les environnements secs et désertiques.

L'étude théorique a rappelé les principes de l'énergie photovoltaïque, l'impact de la poussière sur les performances et le principe de la détection optique de l'encrassement. Elle a surtout établi que l'éclairage public solaire autonome est un domaine d'application critique : l'autonomie d'un luminaire dépend directement de l'énergie captée par son panneau, alors que le nettoyage classique, réalisé en hauteur avec une nacelle, un véhicule spécialisé et une équipe qualifiée, est coûteux, contraignant et rarement répété.

La solution proposée est un dispositif intégré au luminaire. Un microcontrôleur ESP32 associé à une horloge temps réel DS1302 met le système en marche chaque jour à 2h00 du matin ; un capteur infrarouge détecte la poussière ; selon l'écart mesuré, le système choisit un essuyage à sec ou un nettoyage avec eau (pompe d'environ quatre secondes), ce qui limite la consommation d'eau ; un mécanisme entraîné par un seul moteur et un seul driver déplace la raclette sur le panneau. Une carte électronique dédiée a été conçue et réalisée, et un prototype fonctionnel a été construit. Les résultats du prototype ont validé le fonctionnement de la chaîne horloge, détection, décision et action.

Les principales limites de ce travail résident dans le caractère exclusivement fonctionnel des essais : l'effet du nettoyage sur la puissance produite, la consommation d'énergie et d'eau, la durabilité du mécanisme et le comportement en conditions réelles n'ont pas été mesurés. La détection par un capteur infrarouge unique reste sensible à l'éclairement ambiant.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] Allegro MicroSystems ,2022. *A4988 : DMOS Microstepping Driver with Translator and Overcurrent Protection*. Fiche technique.

[2] Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley. Livre.

[3] Espressif Systems 2025. *ESP32 Series Datasheet*. Fiche technique.

[4] Green, M. A. (1982). *Solar Cells : Operating Principles, Technology, and System Applications*. Prentice-Hall. Livre.

[5] IEA (2023). *Renewables 2023 : Analysis and Forecast to 2028*. International Energy Agency. Rapport.

[6] Ilse, K. K., Figgis, B. W., Naumann, V., Hagendorf, C., & Bagdahn, J. (2019). Techno-economic assessment of soiling losses and mitigation strategies for solar power generation. *Joule*, 3(10), 2303-2321. Article de revue.

[7] IRENA (2023). *Renewable Energy Statistics 2023*. International Renewable Energy Agency. Rapport statistique.

[8] Luque, A., & Hegedus, S. (2011). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. Wiley. Livre.

[9] Maghami, M. R., Hizam, H., Gomes, C., Radzi, M. A., Rezadad, M. I., & Hajighorbani, S. (2016). Power loss due to soiling on solar panel : A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1307-1316. Article de revue.

[10] Mani, M., & Pillai, R. (2010). Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance : Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3124-3131. Article de revue.

[11] Maxim Integrated (2015). *DS1302 Trickle-Charge Timekeeping Chip*. Fiche technique.

[12] Messenger, R. A., & Ventre, J. (2010). *Photovoltaic Systems Engineering*. CRC Press. Livre.

[13] NREL (2024). *Best Research-Cell Efficiency Chart*. National Renewable Energy Laboratory. Ressource en ligne.

[14] Sarver, T., Al-Qaraghuli, A., & Kazmerski, L. L. (2013). A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 698-733. Article de revue.

[15] Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance. *Solar Energy*, 83(5), 614-624. Article de revue.