



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



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences et de la
Technologie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du
diplôme de Master académique en
Filière : Electronique
Spécialité : Instrumentation

Présentée par : **Mr. BOUGHENA Ayoub**

Thème

Smart Solar : Étude et simulation d'un système de surveillance intelligent de l'énergie solaire sous Arduino et Proteus

Soutenu le, 29/06/2026

Devant le Jury :

Mr : HAMRI Yazid Zakaria	Président	M.C.B.	Univ Tissemsilt
Mr : SALIM Karim	Encadreur	M.C.B.	Univ-Tissemsilt
Mr : DJOUDI Lakdhar	Examineur	Prof.	Univ-Tissemsilt
Mr : NEHAL Mohamed el Fatah	Examineur	M.C.B.	Univ-Tissemsilt

Année universitaire : 2025-2026

DÉDICACE

Nous dédions ce travail à : ma mère et mon père,
et je souhaite à mon père un prompt
rétablissement. À mes frères et sœurs, que Allah
les protège. À toute ma famille, pour leur présence
et leurs encouragements. À toutes les personnes
que j'ai eu le plaisir de connaître durant mon
parcours universitaire. Je dédie ce modeste travail
à vous tous. J'exprime ma profonde reconnaissance
à mon encadreur, Monsieur **SALIM Karim**, qui a
accepté de nous guider, ses conseils avisés et sa
disponibilité tout au long de ce travail. Qu'il trouve
ici l'expression de ma sincère gratitude. Nous le
remercions également pour sa gentillesse, sa
compétence et sa compréhension. Enfin, nos
sincères remerciements s'adressent à tous les
professeurs qui nous ont transmis leur savoir. Si
nous sommes arrivés à ce stade, c'est en grande
Partie grâce à leur dévouement.

REMERCIEMENTS

Nous remercions le Bon Dieu de nous avoir donné la volonté et la patience qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Monsieur SALIM Karim, qui a accepté de me guider et de m'accompagner tout au long de ce travail. Nous remercions chaleureusement les membres du jury **Pr: DJOUDI Lakdhar, Mr : NEHAL Mohamed el fatah et Mr : HAMRI Yazid Zakaria** pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer notre travail, Enfin, nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance à nos parents, pour leurs sacrifices, leur soutien inconditionnel et leurs encouragements constants. Ils ont largement contribué à notre réussite, et nous leur dédions ce mémoire. Nos remerciements s'adressent également à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques	
I.1 Introduction aux systèmes photovoltaïques.....	4
I.2 Principe de conversion de l'énergie solaire.....	5
I.2.1 Généralités sur le rayonnement solaire.....	5
I.2.2 Effet photovoltaïque : principe fondamental.....	6
I.2.3 Structure d'une cellule photovoltaïque.....	8
I.2.4 Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	8
I.2.5 Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque.....	10
I.2.6 Influence de la température et de l'éclairement.....	12
I.2.7 Récapitulatif de la chaîne de conversion.....	13
I.3 Caractéristiques des panneaux photovoltaïques.....	13
I.3.1 Différentes technologies de cellules photovoltaïques.....	14
I.3.2 Paramètres de performance (STC et NOCT).....	15
I.3.3 Paramètres caractéristiques d'un panneau PV.....	16
I.3.4 Rendement du panneau photovoltaïque.....	17
I.4 Composition d'un système photovoltaïque.....	18
I.4.1 Panneau solaire (Générateur PV).....	18
I.4.2 Régulateur de charge.....	19
I.4.3 Système de stockage (Batteries).....	21
I.4.4 Onduleur et Charge (Utilisation).....	21
I.5 Facteurs influençant le rendement des systèmes photovoltaïques.....	23
I.5.1 Ensoleillement et rayonnement solaire.....	23
I.5.2 Température de fonctionnement.....	24
I.5.3 Encrassement et accumulation de poussière (Soiling).....	25
I.5.4 Ombrage et pertes d'appariement.....	26
I.5.5 Dégradation et vieillissement des modules.....	26
I.5.6 Rendement des composants électroniques.....	27
I.6 Mesure et acquisition des grandeurs électriques et environnementales.....	29
I.6.1 Mesure de la tension.....	30
I.6.2 Mesure du courant.....	31
I.6.3 Mesure de la puissance.....	32

I.6.4 Mesure de la température.....	32
I.6.5 Mesure de l'éclairement.....	34
I.6.6 Architecture d'acquisition.....	34
I.7 Conclusion.....	34

Chapitre II : Outils de conception et environnement de développement

II.1 Introduction.....	37
II.2 Présentation de la plateforme Arduino.....	37
II.2.1 Architecture de la carte Arduino.....	38
II.2.2 Fonctionnement du microcontrôleur.....	39
II.2.3 Entrées / Sorties (analogiques et numériques).....	40
II.3 Présentation du logiciel Proteus.....	40
II.3.1 Interface et fonctionnalités principales.....	40
II.3.2 Simulation des systèmes embarqués.....	41
II.3.3 Avantages et limites.....	42
II.4 Conclusion.....	43

Chapitre III : Conception, modélisation et implémentation du système Smart Solar

III.1 Introduction.....	45
III.2 Architecture globale du système.....	46
III.2.1 Présentation générale.....	46
III.2.2 Architecture matérielle.....	47
III.2.3 Architecture logicielle.....	50
III.3 Description des composants matériels.....	53
III.3.1 Carte Arduino Mega 2560.....	53
III.3.2 Capteur de courant ACS712.....	53
III.3.3 Capteurs de tension.....	54
III.3.4 Capteur de température LM35.....	55
III.3.5 Capteurs LDR.....	55
III.3.6 Servomoteurs.....	56
III.3.7 MOSFET IRLZ44N.....	57
III.3.8 Écran LCD I2C.....	57
III.4 Conception du système.....	58
III.4.1 Schéma fonctionnel.....	59
III.4.2 Diagramme de blocs.....	60

III.4.3 Organigramme de fonctionnement.....	63
III.5 Conception logicielle.....	65
III.5.1 Structure générale du programme.....	66
III.5.2 Acquisition des données.....	67
III.5.3 Traitement des données.....	69
III.5.4 Commande des actionneurs.....	70
III.5.5 Gestion des alarmes et des erreurs.....	71
III.6 Système de Protection de la Batterie (BMS).....	73
III.6.1 Protection contre la surcharge.....	74
III.6.2 Protection contre la décharge profonde.....	74
III.6.3 Détection de court-circuit et de surintensité.....	75
III.6.4 Protection thermique.....	77
III.7 Système de suivi solaire (Solar Tracking).....	78
III.7.1 Principe de fonctionnement.....	78
III.7.2 Algorithme basé sur les LDR.....	79
III.7.3 Commande du servomoteur.....	80
III.8 Système de nettoyage automatique.....	81
III.8.1 Principe de fonctionnement.....	82
III.8.2 Séquence de nettoyage.....	83
III.8.3 Commande du servomoteur de nettoyage.....	84
III.9 Système de supervision.....	86
III.9.1 Affichage local sur LCD.....	87
III.9.2 Signalisation par LEDs.....	88
III.9.3 Alerte sonore par buzzer.....	88
III.9.4 Synthèse du système de supervision.....	89
III.10 Simulation et Validation sous Proteus.....	90
III.10.1 Schéma de simulation.....	91
III.10.2 Intégration du programme Arduino.....	92
III.10.3 Scénarios de test.....	93
III.10.4 Résultats obtenus.....	95
III.11 Réalisation pratique du prototype.....	97
III.11.1 Assemblage matériel.....	98
III.11.2 Câblage des composants.....	99

III.11.3 Intégration du système.....	100
III.11.4 Prototypé final réalisé.....	101
III.12 Tests expérimentaux et interprétation des résultats.....	102
III.12.1 Conditions et protocole de test.....	103
III.12.2 Validation des mesures électriques et thermiques.....	103
III.12.3 Test du système de suivi solaire.....	105
III.12.4 Test du système de nettoyage automatique.....	106
III.12.5 Validation du système de protection (BMS).....	106
III.12.6 Validation du système de supervision.....	107
III.12.7 Comparaison entre simulation Proteus et prototype réel.....	108
Conclusion générale.....	110

Liste des Figures

LISTE DES FIGURES

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Figure 1.1 : Composants d'un système PV.....	5
Figure 1.2 : Spectre du rayonnement solaire.....	6
Figure 1.3 : Principe de l'effet photovoltaïque dans une cellule PV.....	7
Figure 1.4 : Schéma de structure d'une cellule PV.....	7
Figure 1.5 : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.....	9
Figure 1.6 : Caractéristique P–V d'une cellule PV.....	11
Figure 1.7 : Caractéristique I–V d'une cellule PV.....	11
Figure 1.8 : Évolution de la caractéristique I(V) et P(V) pour différentes températures.....	12
Figure 1.9 : Différentes technologies de cellules photovoltaïques.....	14
Figure 1.10 : Illustration du rendement d'un panneau photovoltaïque.....	17
Figure 1. 11 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT.....	20
Figure 1. 12 : Schéma de principe de la conversion continu-alternative (DC-AC).....	22
Figure 1. 13 : Caractéristiques électriques du module pour différentes valeurs de l'éclairement.....	23
Figure 1. 14 : Les courbes I–V et P–V pour différentes valeurs de température.....	24
Figure 1. 15 : variation du niveau d'éclairement avec humidité.....	25
Figure 1. 16 : variation de V_{co} et du ICC avec le niveau d'irradiance.....	26
Figure 1. 17 : Représentativité des différents modes de dégradation.....	27
Figure 1. 18 : Bilan des pertes dans un système PV.....	28
Figure 1. 19 : Schéma général d'un système d'acquisition des données photovoltaïques.....	29
Figure 1. 20 : Mesure de la tension à l'aide d'un pont diviseur.....	30
Figure 1. 21 : Shunt résistif.....	31
Figure 1. 22 : Structure interne d'un capteur à effet hall.....	32
Figure 1. 23 : Capteur LM35.....	33
Figure 1. 24 : Thermocouple.....	33

Chapitre II : Outils de conception et environnement de développement

Figure 2. 1 : Architecture fonctionnelle et flux de données du système Smart Solar.....	37
Figure 2. 2 : Architecture et brochage de la carte Arduino Mega 2560.....	38
Figure 2. 3 : L'interface de logiciel ISIS Proteus.....	41

Chapitre III : Conception, modélisation et implémentation du système Smart Solar

Figure 3. 1 : Le schéma matériel complet du système smart solaire.....	50
Figure 3. 2 : L'organigramme général du programme.....	52

Figure 3. 3 : Le schéma fonctionnel du système Smart Solar.....59

Figure 3. 4 : Le diagramme de blocs du système.....61

Figure 3. 5 : Schéma complet de simulation sous Proteus.....90

Figure 3. 6 : Réalisation pratique du prototype.....99

Liste des tableaux

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

Tableau 1. 1 : Rôle des couches élémentaires dans la conversion de l'énergie photovoltaïque.....	8
Tableau 1. 2 : Paramètres caractéristiques des courbes I–V et P–V d'un module photovoltaïque.....	10
Tableau 1. 3 : Comparaison des performances techniques et économiques des différentes technologies de cellules photovoltaïques.....	15
Tableau 1.4 : Paramètres caractéristiques d'un panneau photovoltaïque.....	16
Tableau 1. 5 : Récapitulatif des composants du système.....	22
Tableau 1. 6 : Récapitulatif des facteurs influençant le rendement.....	28

Chapitre III : Conception, modélisation et implémentation du système Smart Solar

Tableau 3. 1 : Affectation des broches analogiques de l'Arduino Mega pour le bloc d'acquisition.....	61
Tableau 3. 2 : Affectation des broches numériques de l'Arduino Mega pour le bloc d'actionnement.....	62
Tableau 3. 3 : Affectation des broches de l'Arduino Mega pour le bloc de supervision (IHM).....	62
Tableau 3. 4 : Correspondance des entrées analogiques de l'Arduino Mega et des grandeurs physiques acquises.....	67
Tableau 3. 5 : Équations de conversion des mesures brutes (ADC) en grandeurs physiques.....	68
Tableau 3. 6 : Récapitulatif des protections logicielles (seuils et actions correctives).....	69
Tableau 3. 7 : Codage couleur des LEDs en fonction du statut du système Smart Solar.....	72
Tableau 3. 8 : Organisation de l'affichage LCD.....	87
Tableau 3. 9 : Signification des LEDs de signalisation.....	88
Tableau 3. 10 : Synthèse des moyens de supervision.....	89
Tableau 3. 11 : Comparaison entre la tension réelle (multimètre) et la tension mesurée par l'Arduino (panneau solaire).....	103
Tableau 3. 12 : Comparaison entre la tension réelle (multimètre) et la tension mesurée par l'Arduino (batterie).....	104
Tableau 3. 13 : Comparaison entre le courant réel (multimètre) et le courant mesuré par l'ACS712 (Arduino).....	104
Tableau 3. 14 : Gain énergétique apporté par le suivi solaire actif.....	105
Tableau 3. 15 : Efficacité du nettoyage – comparaison des puissances mesurées.....	106
Tableau 3. 16 : Chronométrage du cycle de nettoyage.....	106
Tableau 3. 17 : Réponses du système face aux anomalies.....	106
Tableau 3. 18 : Écarts entre les résultats simulés et expérimentaux pour les principaux critères du système.....	108

Liste des abréviations

LISTE DES ABRÉVIATIONS

Abréviation	Signification
BMS	Système de gestion de la batterie (Battery Management System)
LDR	Capteur de luminosité (Light Dependent Resistor)
PV	Photovoltaïque
R	Résistance
I	Courant
V	Tension
q	Charge de l'électron
k	Constante de Boltzmann
T	Température (en Kelvin)
n	Facteur d'idéalité
MPP	Point de puissance maximale (maximum power point)
STC	Les conditions d'essai standardisées (Standard Test Conditions)
P	Puissance
G	Eclairement solaire
S	Surface du panneau
FF	Facteur de forme
P&O	Perturbation et Observation (Perturb and Observe)
PWM	Modulation par largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation)
PID	Dégradation induite par le potentiel électrique (Potential-Induced Degradation)
LID	Dégradation induite par la lumière (Light-Induced Degradation)
UV	Ultraviolet
DAQ	Systèmes d'acquisition de données (Data Acquisition)
CAN	convertisseurs analogique-numérique
AC	Courant Alternatif (Alternating Current)
DC	Courant Continu (Direct Current)
PCB	Carte de circuit imprimé (Printed Circuit Board)
VSM	Modélisation virtuelle des systèmes (Virtual System Modelling)

Introduction générale

Face à la croissance continue de la demande énergétique mondiale et à l'épuisement progressif des ressources fossiles, le recours aux énergies renouvelables constitue aujourd'hui une nécessité stratégique pour assurer un développement durable et respectueux de l'environnement. Parmi ces sources d'énergie, l'énergie solaire photovoltaïque occupe une place privilégiée grâce à son abondance, sa disponibilité et son caractère propre. Cependant, malgré les progrès technologiques réalisés dans le domaine photovoltaïque, plusieurs facteurs limitent encore le rendement des installations solaires, notamment les variations de l'orientation du soleil, l'encrassement des panneaux et les contraintes liées au stockage de l'énergie [1].

Dans ce contexte, l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes photovoltaïques représente un axe de recherche particulièrement important. Les technologies de suivi solaire (Solar Tracking) permettent d'optimiser l'orientation des panneaux afin de maximiser la captation du rayonnement solaire tout au long de la journée. De même, les systèmes de nettoyage automatique contribuent à maintenir les performances des cellules photovoltaïques en réduisant les pertes causées par l'accumulation de poussière et de particules sur leur surface. Par ailleurs, la protection et la gestion intelligente des batteries de stockage sont essentielles pour garantir la fiabilité, la sécurité et la durée de vie des systèmes autonomes.

C'est dans cette optique que s'inscrit le présent travail, qui porte sur la conception et la réalisation d'un système photovoltaïque intelligent dénommé Smart Solar. Le prototype développé intègre plusieurs fonctionnalités avancées : un mécanisme de suivi solaire automatique basé sur des capteurs de luminosité (LDR), un système de nettoyage automatique commandé par servomoteur et pompe à eau, un système de gestion et de protection de batterie (BMS) implémenté par logiciel, ainsi qu'un module de supervision locale permettant l'affichage des paramètres de fonctionnement et la signalisation des anomalies.

L'objectif principal de ce projet est de développer une solution autonome capable d'améliorer le rendement énergétique d'un panneau photovoltaïque tout en assurant la sécurité des équipements et la continuité du fonctionnement. L'ensemble du système est piloté par une carte Arduino Mega 2560 qui assure l'acquisition des données, l'exécution des algorithmes de contrôle et la gestion des actionneurs.

Dans cette optique, notre étude porte sur la conception et la réalisation d'un système photovoltaïque intelligent intégrant le suivi solaire automatique, le nettoyage automatisé des panneaux, la supervision des paramètres de fonctionnement ainsi que la gestion et la protection de la batterie (BMS), le tout développé sous Arduino et Proteus sous le titre de smart Solar . Le projet « Smart Solar » ne se limite donc pas à la simple surveillance d'une installation photovoltaïque ; il vise également à optimiser l'orientation du panneau afin de maximiser la captation de l'énergie solaire, à réduire les pertes dues à l'encrassement grâce à un mécanisme de nettoyage automatique, et à assurer une gestion efficace de l'énergie stockée. L'ensemble de ces fonctionnalités est supervisé par une plateforme basée sur Arduino, dans le but d'améliorer les performances, la fiabilité et l'autonomie du système photovoltaïque.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

- **Le premier chapitre** présente les généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque, les systèmes de stockage, les techniques de suivi solaire ainsi que les principaux composants utilisés dans les installations photovoltaïques intelligentes.
- **Le deuxième chapitre** est consacré à l'étude théorique, à l'analyse fonctionnelle du système Smart Solar et au choix des composants matériels et logiciels retenus pour sa conception.
- **Le troisième chapitre** détaille la conception, la simulation, la réalisation pratique et la validation expérimentale du prototype développé. Les résultats obtenus sont analysés et comparés aux prévisions théoriques afin d'évaluer les performances globales du système.

Enfin, une conclusion générale synthétise les principaux résultats obtenus et présente les perspectives d'amélioration et d'évolution futures du projet.

Chapitre I : Généralités sur les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction aux systèmes photovoltaïques

L'énergie photovoltaïque est aujourd'hui reconnue comme une technologie clé susceptible de répondre aux exigences croissantes en matière de consommation électrique globale, tout en participant activement à l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre. Les données de l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE, 2024) indiquent que la capacité photovoltaïque installée mondialement a excédé 1,6 TW, soulignant ainsi l'importance prépondérante de cette filière dans le cadre de la transition énergétique actuelle. À la différence des approches énergétiques conventionnelles qui reposent sur les combustibles fossiles, la technologie photovoltaïque assure une conversion directe du rayonnement solaire en énergie électrique, sans nécessiter de processus thermiques ou mécaniques intermédiaires [2-3].

Cette technologie présente plusieurs avantages majeurs qui justifient son adoption croissante à l'échelle mondiale :

- **Durabilité** : exploitation d'une ressource inépuisable et gratuite.
- **Écologie** : absence d'émissions polluantes et de nuisances sonores.
- **Flexibilité** : possibilité d'installation sur toitures, centrales ou sites isolés.

Toutefois, la performance d'un système photovoltaïque demeure significativement influencée par des variables environnementales, notamment l'irradiance, la température ambiante, l'effet d'ombrage, ainsi que le dépôt de salissures sur les modules.

C'est dans cette perspective que les systèmes photovoltaïques contemporains intègrent des solutions basées sur des techniques intelligentes ayant pour objectif de :

- Une surveillance en temps réel.
- Une gestion optimisée de l'énergie.
- Une amélioration du rendement global.
- Une prolongation de la durée de vie des composants.

Comme illustré à la Figure 1.1, un système photovoltaïque est composé de plusieurs éléments assurant la production, le stockage et l'utilisation de l'énergie électrique.

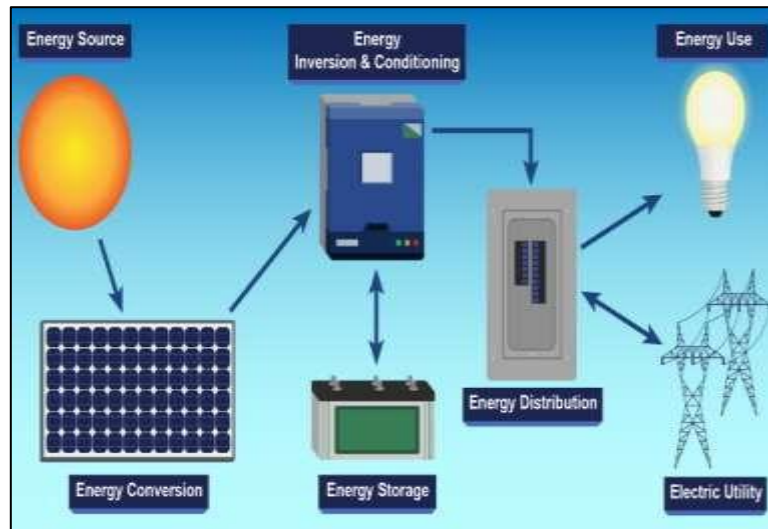


Figure 1.1 : Composants d'un système PV [4].

La Figure 1.1 expose les interdépendances structurelles entre les divers constituants d'un système photovoltaïque. Pour saisir pleinement la dynamique opérationnelle de ces dispositifs, il apparaît fondamental d'examiner préalablement le mécanisme de conversion de l'énergie solaire.

I.2 Principe de conversion de l'énergie solaire

I.2.1 Généralités sur le rayonnement solaire

Le Soleil constitue une source d'énergie dont l'ampleur est considérée comme pratiquement inépuisable à l'échelle humaine. Il émet un rayonnement électromagnétique, dont une fraction significative atteint la surface de la Terre.

Ce rayonnement présente les caractéristiques suivantes :

- **L'éclairement (W/m^2)** : puissance reçue par unité de surface.
- **L'irradiation (Wh/m^2)** : énergie reçue sur une période donnée.

Le spectre du rayonnement solaire, dont la composition est détaillée dans la figure 1.2, s'étend des longueurs d'onde ultraviolettes aux infrarouges, avec une composante prépondérante située dans le domaine visible. Cette radiation représente la source d'énergie essentielle à l'opération des cellules photovoltaïques.

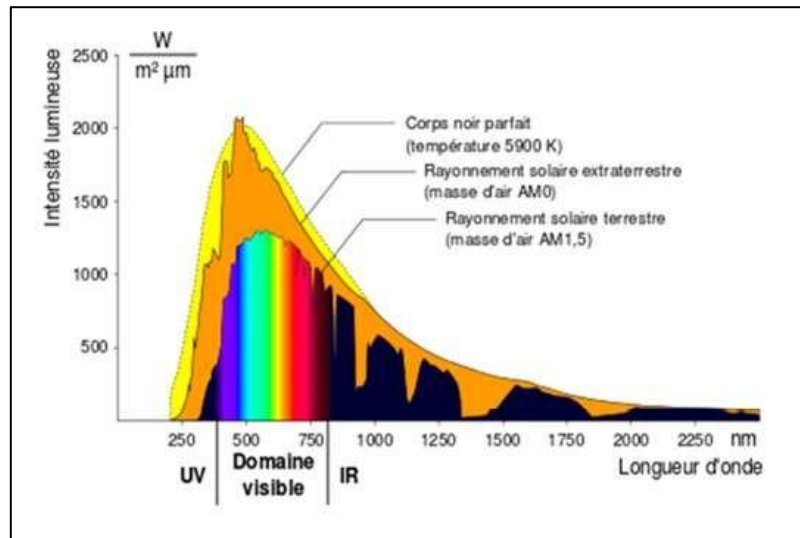


Figure 1.2 : Spectre du rayonnement solaire [5].

La Figure 1.2 indique que le rayonnement solaire concentre la majeure partie de son énergie dans les domaines visible et infrarouge du spectre. La constante solaire, dont la mesure est effectuée en dehors de l'atmosphère terrestre, avoisine les 1367 W/m^2 . Néanmoins, après la traversée de cette atmosphère, l'éclairement au niveau du sol présente une amplitude de variation comprise typiquement entre 0 et 1000 W/m^2 , une valeur dépendante des spécificités climatiques locales et de l'angle d'incidence du flux solaire [6-7].

I.2.2 Effet photovoltaïque : principe fondamental

La conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique s'appuie sur le principe de l'effet photovoltaïque. Ce dernier a été initialement mis en évidence par le physicien français Edmond Becquerel en 1839, et son application à l'échelle industrielle s'est concrétisée à partir des années 1950, parallèlement à l'avancée des technologies des semi-conducteurs. Il est observé que ce phénomène se manifeste principalement au sein de matériaux semi-conducteurs, parmi lesquels le silicium (Si) constitue l'exemple le plus courant.

Le fonctionnement de ce processus se décompose généralement en trois phases distinctes [8-9] :

1. **Absorption des photons** : un photon incident transmet son énergie à un électron du matériau semi-conducteur.

2. **Génération de paires électron-trou** : l'électron excité passe dans la bande de conduction, laissant un trou (absence d'électron) dans la bande de valence.
3. **Séparation des charges** : sous l'effet du champ électrique interne de la jonction P-N, les électrons et les trous sont séparés, générant une différence de potentiel.

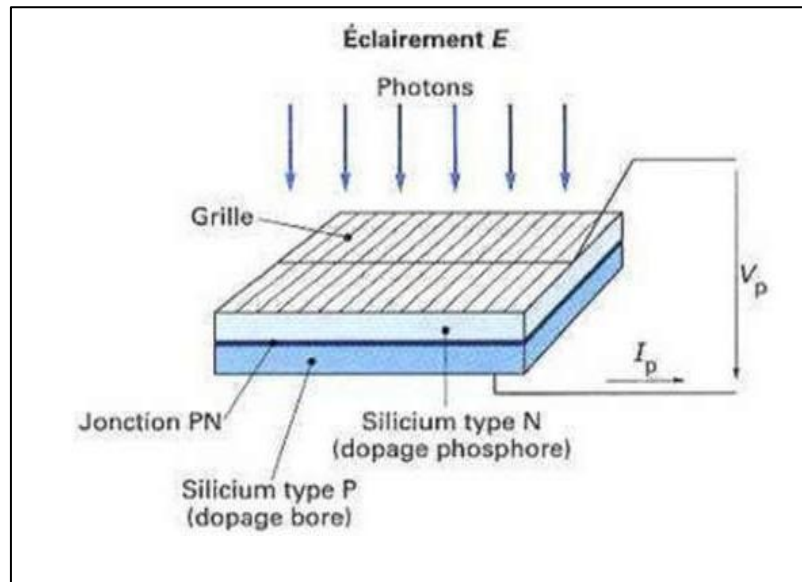


Figure 1.3 : Principe de l'effet photovoltaïque dans une cellule PV [5].

La figure 1.3 présente le principe de l'effet photovoltaïque, lequel se manifeste par la génération de paires électron-trou au sein d'un matériau semi-conducteur suite à l'absorption de photons. La réalisation de ce phénomène est intrinsèquement conditionnée par la configuration structurale spécifique de la cellule, ainsi que le détail en est apporté par la figure 1.4.

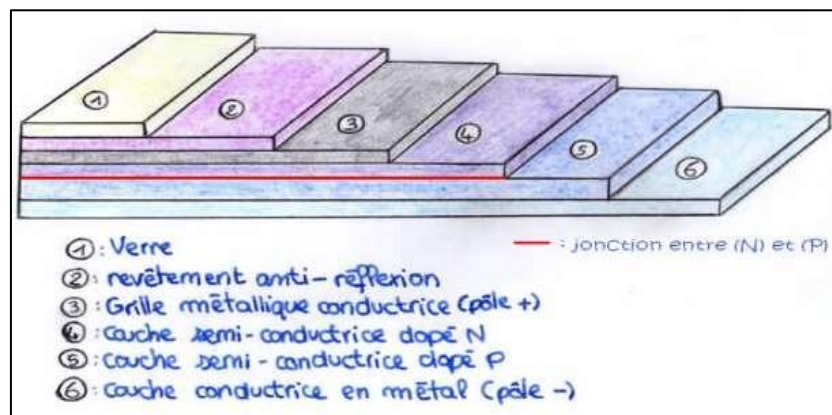


Figure 1.4 : Schéma de structure d'une cellule PV [10].

Ce processus permet la production d'un courant électrique continu lorsque la cellule est connectée à une charge extérieure.

I.2.3 Structure d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque élémentaire présente une configuration architecturale caractérisée par plusieurs couches superposées, dont la disposition est détaillée dans la figure 1.4. Chaque couche y assume une fonction spécifique, essentielle à l'efficacité du processus de conversion énergétique. Ce type d'agencement multicouche contribue de manière significative à l'optimisation de ladite conversion, tout en concourant à la minimisation des pertes d'ordre optique et électrique [11].

Le Tableau 1.1 récapitule la fonction précise de chaque élément constitutif d'une cellule photovoltaïque standard.

Tableau 1. 1 : Rôle des couches élémentaires dans la conversion de l'énergie photovoltaïque.

Couche	Rôle
Verre de protection	Protection mécanique et transmission de la lumière
Couche anti-reflet	Réduction des pertes par réflexion
Contact avant (grille métallique)	Collecte des électrons (pôle négatif)
Couche N (silicium dopé au phosphore)	Excès d'électrons
Jonction P-N	Création du champ électrique interne
Couche P (silicium dopé au bore)	Excès de trous
Contact arrière	Collecte des charges positives (pôle positif)

Lorsque la cellule est éclairée et connectée à une charge extérieure, les électrons circulent dans le circuit externe, produisant ainsi un courant continu exploitable.

I.2.4 Modèle électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque réelle peut être modélisée par un circuit électrique équivalent comprenant [9][11] :

- Une source de courant **I_{ph}** , proportionnelle à l'éclairement
- Une diode représentant la jonction P-N
- Une résistance série **R_s**
- Une résistance parallèle **R_{sh}** .

Le modèle électrique équivalent présenté dans la figure 1.5 permet de représenter le comportement réel d'une cellule photovoltaïque à l'aide de composants électriques.

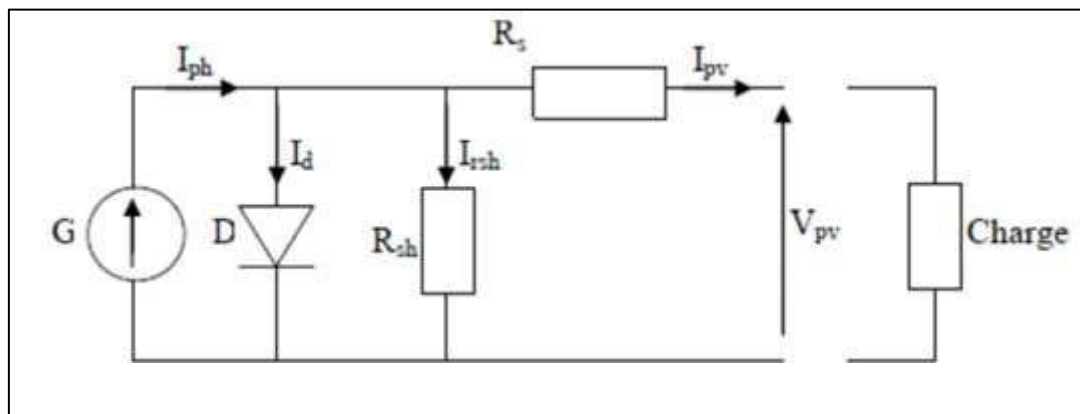


Figure 1.5 : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV.

L'équation caractéristique est donnée par équation (1) :

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{nkT} \right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

- I_{ph} : courant généré par la lumière
- I_{sat} : courant de saturation de la diode
- q : charge de l'électron
- k : constante de Boltzmann
- T : température (en Kelvin)
- n : facteur d'idéalité
- R_s (Résistance série)
- R_{sh} (Résistance shunt)

Cette équation traduit le comportement non linéaire de la cellule photovoltaïque, en tenant compte des pertes internes dues aux résistances série et shunt [11-12].

I.2.5 Caractéristiques électriques d'un panneau photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque élémentaire présente généralement une tension en circuit ouvert (V_{oc}) se situant entre 0,5 et 0,6 V. Le courant de court-circuit (I_{sc}), quant à lui, est fonction de la surface active de la cellule et de l'irradiance solaire incidente.

Afin d'obtenir des tensions et des puissances d'un niveau exploitable, l'assemblage de plusieurs cellules est réalisé. L'association en série permet d'augmenter la tension, tandis que le couplage en parallèle vise à accroître le courant, formant ainsi un module photovoltaïque.

L'analyse des courbes caractéristiques de courant-tension ($I-V$) et de puissance-tension ($P-V$) est un moyen pertinent pour évaluer les performances électriques d'un module photovoltaïque. Ces représentations graphiques révèlent par ailleurs l'existence de trois points caractéristiques fondamentaux [7][11].

Les points caractéristiques fondamentaux qui définissent le comportement électrique du module sont résumés dans le Tableau 1.2.

Les courbes caractéristiques courant-tension $I(V)$ et puissance-tension $P(V)$ constituent les outils fondamentaux d'évaluation des performances électriques d'un module photovoltaïque. Elles permettent d'identifier trois points de fonctionnement remarquables, dont la définition et la symbolique normalisée sont rappelées dans le Tableau 1.2.

Tableau 1. 2 : Paramètres caractéristiques des courbes $I-V$ et $P-V$ d'un module photovoltaïque

Point	Symbole	Signification
Court-circuit	I_{sc}	Courant maximal (tension nulle)
Circuit ouvert	V_{oc}	Tension maximale (courant nul)
Point de puissance maximale	MPP	Point où la puissance $P = V \times I$ est maximale

Ces grandeurs caractéristiques, bien que définies dans des conditions standardisées, sont en réalité fortement dépendantes des conditions opérationnelles. La section suivante examine en détail l'influence des deux principaux facteurs environnementaux que sont l'éclairement et la température sur le comportement électrique du module.

La figure 1.6 représente la courbe puissance-tension ($P-V$), mettant en évidence le point de puissance maximale (MPP).

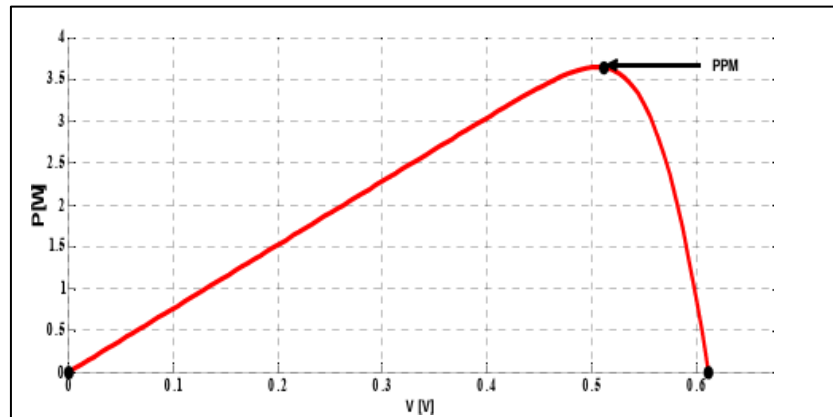


Figure 1.6 : Caractéristique $P-V$ d'une cellule PV [13].

PPM: Point de Puissance Maximal (MPP).

La courbe courant-tension ($I-V$), illustrée dans la figure 1.7, permet d'analyser les performances électriques du panneau photovoltaïque.

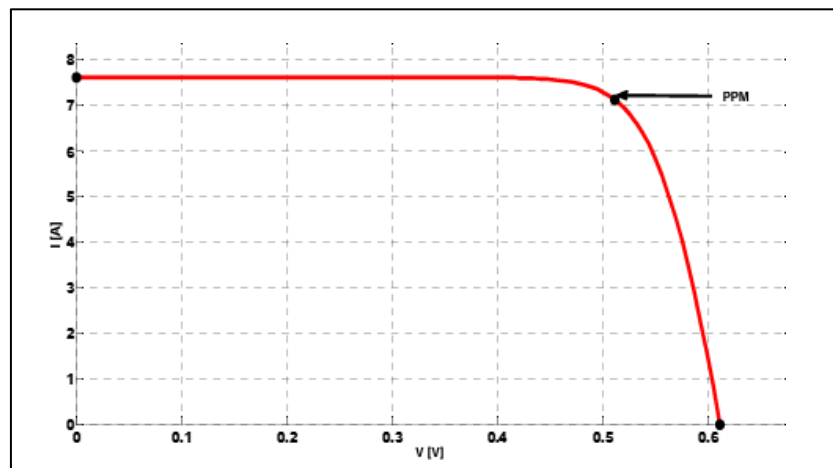


Figure 1.7 : Caractéristique $I-V$ d'une cellule PV [13].

Les Figures 1.6 et 1.7 illustrent le point de puissance maximale (MPP), lequel représente le régime de fonctionnement optimal d'un panneau photovoltaïque.

Afin d'assurer une exploitation optimale du panneau, il est impératif que son fonctionnement s'effectue à proximité du point MPP. Cette condition est couramment atteinte par l'implémentation de techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT).

I.2.6 Influence de la température et de l'éclairement

Les performances d'un panneau photovoltaïque dépendent principalement de deux paramètres environnementaux [7-8] :

- **L'éclairement** : une augmentation de l'éclairement entraîne une augmentation du courant produit.
- **La température** : une élévation de la température provoque une diminution de la tension et donc une baisse du rendement.

La sensibilité inhérente des systèmes photovoltaïques aux variations des conditions environnementales représente un défi majeur pour leur performance opérationnelle. Ce constat justifie par conséquent le recours à des techniques d'optimisation, parmi lesquelles le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est couramment employé [7].

Pour illustrer ce phénomène, la figure 1.8 met en évidence l'évolution des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque en fonction de la température, sous un éclairement constant.

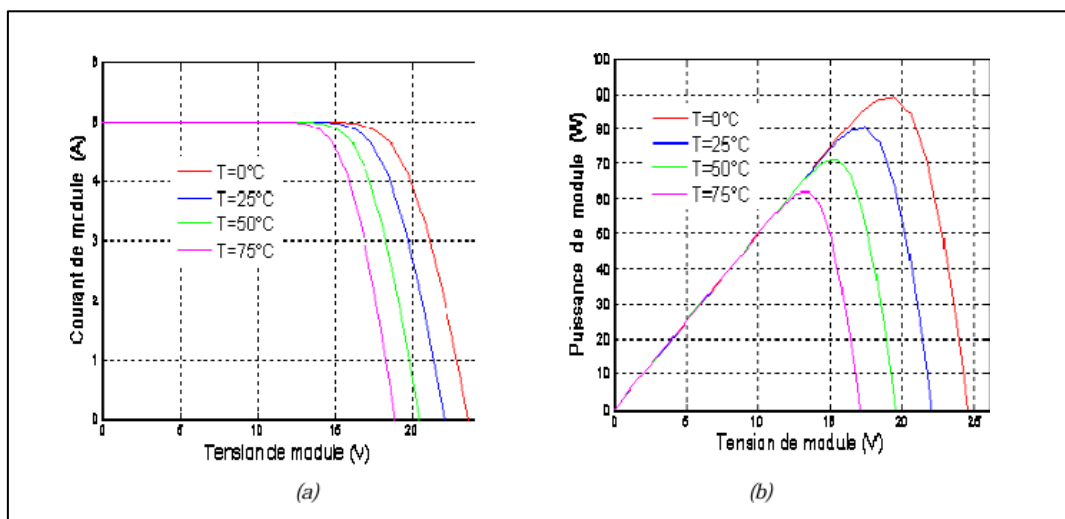


Figure 1.8 : Évolution de la caractéristique $I(V)$ et $P(V)$ pour différentes températures [14].

La Figure 1.8 illustre l'influence de la température sur les caractéristiques électriques, notamment la diminution de la tension.

La puissance maximale décroît généralement de l'ordre de 0,35 à 0,5 % pour chaque degré Celsius excédant 25°C, cette sensibilité étant modulée par la technologie cellulaire employée (cf. Tableau 1.3).

En conséquence, cette interdépendance justifie le déploiement de systèmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) afin d'assurer une optimisation continue de la performance du générateur.

I.2.7 Récapitulatif de la chaîne de conversion

La chaîne de conversion énergétique dans un système photovoltaïque peut être résumée comme suit :

Rayonnement solaire → Conversion photovoltaïque → Énergie électrique (DC) → Conditionnement → Stockage / Utilisation

Dans le cadre du système « Smart Solar », cette chaîne est optimisée grâce à l'intégration de fonctions intelligentes telles que :

- Le suivi solaire (tracking)
- Le nettoyage automatique
- La gestion de la batterie (BMS)
- La surveillance en temps réel.

Cette modélisation constitue une base essentielle pour la compréhension et la conception du système développé dans les chapitres suivants.

I.3 Caractéristiques des panneaux photovoltaïques

Les modules photovoltaïques constituent un composant essentiel de la conversion énergétique. Toutefois, leurs performances se distinguent significativement selon la technologie implémentée et les conditions d'opération [7][15].

Un module photovoltaïque est composé d'un ensemble de cellules élémentaires, interconnectées en série et/ou en parallèle, dont le but est de générer des niveaux de tension et de courant aptes à être exploités. Les caractéristiques électriques de ce module sont fonction de la technologie employée et des conditions environnementales.

Les paramètres électriques indiqués par les fabricants sont habituellement évalués sous des conditions d'essai standardisées, désignées par l'acronyme **STC (Standard Test Conditions)** :

- Éclairement : 1000 W/m^2
- Température de cellule : $25 \text{ }^\circ\text{C}$
- Spectre solaire : AM = 1.5

I.3.1 Différentes technologies de cellules photovoltaïques



Figure 1.9 : Différentes technologies de cellules photovoltaïques [16].

La figure 1.9 illustre les distinctions structurelles et les variations de rendement intrinsèques aux différentes technologies de cellules photovoltaïques [7-8][17] :

- **Silicium monocristallin :**
Les cellules en silicium monocristallin se caractérisent par un rendement élevé, généralement compris entre 18 % et 22 %, et une longévité notable. Visuellement, elles présentent une coloration foncée et uniforme, bien que leur coût de production tende à être supérieur à celui d'autres alternatives.
- **Silicium polycristallin :**
Issues de la cristallisation de silicium en multiples grains, ces cellules affichent un rendement légèrement inférieur, typiquement de 15 % à 18 %, ce qui est souvent compensé par un coût de fabrication plus modéré.
- **Couches minces (Thin Film) :**
Les technologies à couches minces, qui englobent des matériaux tels que le silicium

amorphe, le tellurure de cadmium (CdTe) ou le sélénium de cuivre, d'indium et de gallium (CIGS), offrent des avantages en termes de légèreté et de flexibilité.

Toutefois, leur efficacité de conversion énergétique demeure généralement plus faible, s'établissant entre 6 % et 12 %.

Le Tableau 1.3 présente une synthèse comparative des principales caractéristiques techniques et économiques de ces trois familles technologiques.

Tableau 1. 3 : Comparaison des performances techniques et économiques des différentes technologies de cellules photovoltaïques.

Technologie	Rendement	Coût	Durée de vie	Coefficient de température
Monocristallin	18-22%	Élevé	25-30 ans	-0,35%/°C
Polycristallin	15-18%	Moyen	20-25 ans	-0,40%/°C
Couches minces	6-12%	Faible	10-15 ans	-0,25%/°C

Comme en témoigne la Figure 1.9, les différentes technologies de cellules photovoltaïques se distinguent par leur structure et leur rendement [6-7]. Le Tableau 1.3 propose une synthèse comparative de leurs performances techniques et économiques, permettant d'orienter le choix technologique en fonction des contraintes de l'application visée.

I.3.2 Paramètres de performance (STC et NOCT)

Afin de comparer les performances des panneaux photovoltaïques, deux conditions de référence sont utilisées [11][18] :

- **STC (Standard Test Conditions) :**

Conditions idéales de laboratoire (1000 W/m², 25 °C, AM = 1.5).

- **NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) :**

Conditions proches de la réalité :

- Éclairement : 800 W/m²
- Température ambiante : 20 °C
- Vitesse du vent : 1 m/s

Ces conditions permettent d'évaluer le comportement réel du panneau en fonctionnement extérieur.

I.3.3 Paramètres caractéristiques d'un panneau PV

Afin de caractériser précisément un module photovoltaïque et de comparer les fiches techniques des fabricants, il est nécessaire de maîtriser un ensemble de paramètres normalisés. Ceux-ci, mesurés principalement dans les conditions STC (Standard Test Conditions), sont récapitulés dans le Tableau 1.4.

Tableau 1.4 : Paramètres caractéristiques d'un panneau photovoltaïque

Paramètre	Symbole	Définition
Puissance crête	P _{max} (W _c)	Puissance maximale sous STC
Tension à vide	V _{oc} (V)	Tension sans charge
Courant de court-circuit	I _{sc} (A)	Courant maximal
Tension au MPP	V _{mp} (V)	Tension au point optimal
Courant au MPP	I _{mp} (A)	Courant au point optimal
Rendement	η (%)	Performance énergétique

Ces paramètres, fournis systématiquement par les fabricants dans les fiches techniques des modules, constituent les indicateurs de référence pour le dimensionnement et l'évaluation des performances d'une installation photovoltaïque. Parmi eux, le rendement η occupe une place centrale, car il synthétise l'efficacité globale de la conversion énergétique réalisée par le panneau. La section suivante est consacrée à la définition précise de ce rendement et aux facteurs qui le conditionnent.

I.3.4 Rendement du panneau photovoltaïque

L'efficacité (η) d'un module photovoltaïque représente la capacité de ce dispositif à convertir l'énergie solaire incidente en énergie électrique exploitable. Elle est établie comme le rapport entre la puissance électrique maximale générée et la puissance solaire reçue par la surface du module [6][19]

$$\eta = \frac{P_{max}}{G \cdot S} = \frac{V_{oc} \cdot I_{sc} \cdot FF}{G \cdot S} \quad (2)$$

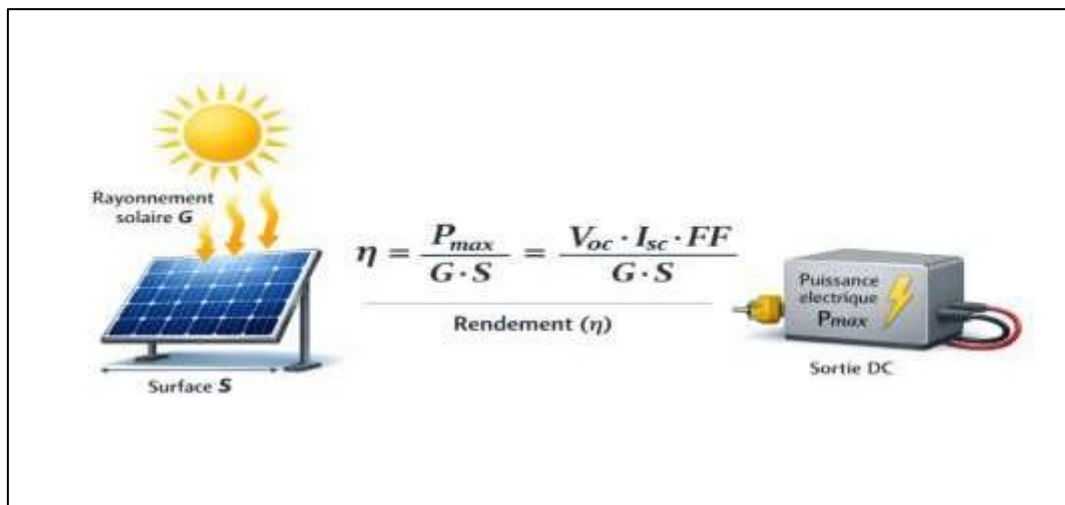


Figure 1.10 : Illustration du rendement d'un panneau photovoltaïque.

où :

- P_{max} : la puissance maximale délivrée
- G : éclairement solaire
- S : surface du panneau
- FF : facteur de forme (indicateur de qualité)

Le facteur de forme (FF) traduit la capacité de la cellule à fournir une puissance proche de sa valeur idéale. Plus il est élevé, plus la cellule est performante.

Le rendement dépend de plusieurs facteurs, notamment :

- La technologie de fabrication (monocristallin, polycristallin, couches minces),

- La température de fonctionnement (le rendement diminue avec l'augmentation de la température),
- Les pertes électriques internes (effet Joule, résistances parasites),
- Les conditions d'ensoleillement.

En pratique, les rendements typiques sont :

- **Silicium monocristallin** : 18 % à 22 %
- **Silicium polycristallin** : 15 % à 18 %
- **Couches minces** : 6 % à 12 %

I.4 Composition d'un système photovoltaïque

Un système photovoltaïque (PV) ne se limite pas à la seule unité de production ; il représente plutôt une architecture complexe composée de sous-systèmes interdépendants, dont la conception vise à satisfaire une demande énergétique spécifique. En fonction de l'application envisagée, on distingue principalement les configurations autonomes (ou isolées) et celles qui sont raccordées au réseau électrique.

Tel qu'illustré par la Figure 1.1, l'agencement typique d'un système photovoltaïque s'articule autour de quatre composants fondamentaux : le générateur photovoltaïque, un régulateur de charge, un dispositif de stockage d'énergie et la charge électrique elle-même. Un onduleur peut être intégré à ces éléments, en particulier dans les situations nécessitant une alimentation en courant alternatif ou une connexion directe au réseau électrique [7][15][20].

Pour une compréhension approfondie de la fonction dévolue à chaque composant, les sections subséquentes proposent une description détaillée des divers éléments qui structurent le système photovoltaïque.

I.4.1 Panneau solaire (Générateur PV)

Le panneau photovoltaïque représente l'élément de conversion énergétique fondamental au sein du système. Sa fonction est d'opérer la conversion directe du rayonnement solaire en énergie électrique sous forme de courant continu (DC), en exploitant le principe de l'effet photovoltaïque, tel qu'il a été détaillé antérieurement (cf. section 1.2).

Les attributs essentiels de ce composant peuvent être synthétisés de la manière suivante :

- **Fonction** : Sur le plan fonctionnel, il s'agit du composant central du système de production, dont le rôle est de convertir l'irradiation solaire incidente, désignée par G (en W/m^2), en énergie électrique utilisable.
- **Performance** : La production du panneau est intrinsèquement variable. Elle dépend fortement des conditions environnementales : l'éclairement G agit principalement sur le courant de court-circuit I_{sc} (relation quasi-linéaire), tandis que la température T agit principalement sur la tension à vide V_{oc} (décroissance d'environ $-0,3\%$ à $-0,5\%$ par degré Celsius). La performance est quantifiée par la **puissance crête** (P_{max} en Wc), mesurée dans les conditions standardisées STC ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$, spectre AM = 1.5) [6-7].
- **Constitution** : La constitution d'un panneau repose sur l'assemblage de cellules élémentaires, organisées en série afin d'accroître la tension et en parallèle pour optimiser le courant. La sélection de la technologie des cellules, qu'il s'agisse de silicium monocristallin ou polycristallin, a une incidence directe sur le rendement global, le coût d'acquisition, et l'empreinte spatiale requise pour l'installation [8][12].
- **Modélisation** : Le comportement électrique du panneau est régi par le modèle à une diode décrit par l'équation caractéristique (section 1.2.4), dont les paramètres (I_{ph} , I_{sat} , R_s , R_{sh}) sont directement liés aux conditions météorologiques [11-12].

En conclusion, bien que le générateur photovoltaïque représente la source d'énergie primaire, sa nature de production intermittente rend impérative l'intégration de dispositifs de conditionnement et de stockage, dont la description sera détaillée dans les sections subséquentes.

I.4.2 Régulateur de charge

Un régulateur de charge constitue un convertisseur statique (DC-DC) dont la fonction est d'assurer l'interfaçage entre le générateur photovoltaïque et le système de stockage d'énergie.

- **Protection** : En matière de protection, ce dispositif régule les cycles de charge et de décharge des batteries. Cette régulation prévient la surcharge et la décharge profonde, contribuant ainsi à prolonger significativement leur durée de vie opérationnelle [21].
- **Optimisation (MPPT)** : Quant à l'optimisation, et plus particulièrement au sein des architectures contemporaines telles que les systèmes dits « Smart Solar », l'intégration d'algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) revêt une importance capitale. Des approches méthodologiques éprouvées, telles que l'algorithme **Perturb and Observe (P&O)** ou la méthode de la conductance incrémentale (**Incremental Conductance**), sont employées pour optimiser la puissance effectivement extraite du générateur photovoltaïque. Ce processus peut se traduire par un gain de puissance allant jusqu'à 20-30 % dans certaines conditions d'exploitation, comparativement aux régulateurs traditionnels de type **PWM** [11][21].

La Figure 1.11 présente schématiquement la chaîne de conversion intégrant un algorithme MPPT, lequel vise à optimiser la puissance prélevée.

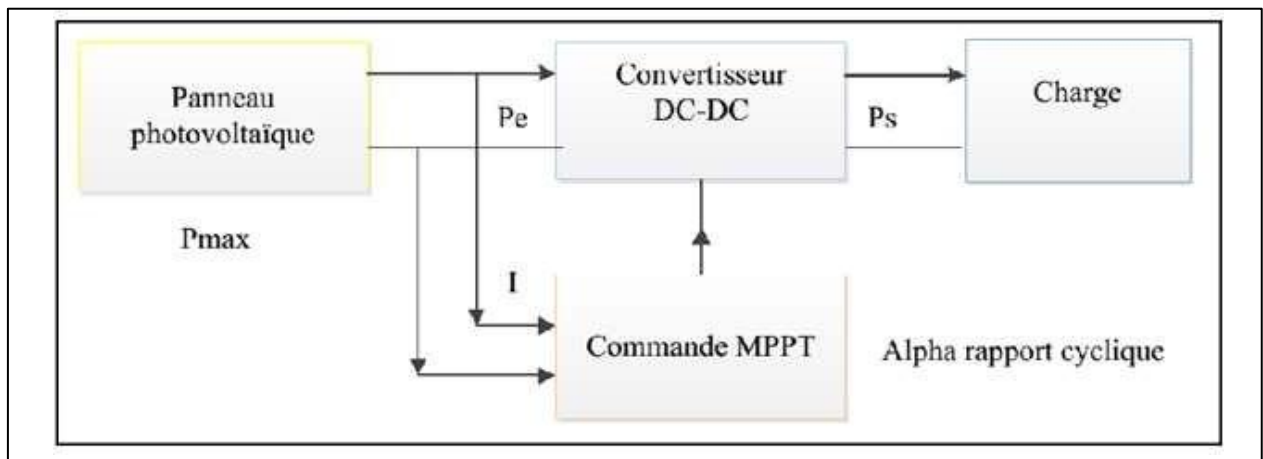


Figure 1. 11 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant une commande MPPT [22].

Avec :

- **P_e** : puissance d'entrée
- **P_s** : puissance de sortie

Le choix de la technique de suivi du point de puissance maximale (MPPT) a une incidence directe sur le rendement global du système photovoltaïque.

Dans le cadre de la présente étude, l'optimisation de la production sera principalement assurée par l'intégration d'un système de suivi solaire mécanique, communément désigné comme suiveur solaire, et par une gestion intelligente de la batterie (BMS), ce qui se distingue de l'emploi classique d'un algorithme MPPT électronique. Contrairement à l'algorithme P&O conventionnel, il a été démontré que la logique floue favorise une convergence plus rapide et une stabilité accrue autour du point de puissance maximale (MPP), particulièrement en présence de variations rapides de l'ensoleillement [21].

I.4.3 Système de stockage (Batteries)

Avec un système de stockage, on peut pallier le fait que l'énergie solaire n'est pas constante, puisqu'il garde l'énergie produite pour quand on en aura besoin plus tard (la nuit, ou quand il y a moins de soleil).

- **Technologies :**
 - Batteries au plomb (GEL, AGM) : elles sont solides et ne coûtent pas très cher, mais elles ne durent pas éternellement.
 - Batteries lithium-ion (LiFePO_4) : celles-ci stockent plus d'énergie pour leur taille, vivent plus longtemps et fonctionnent mieux [23-24].
- **Paramètres clés :** la capacité (Ah) et la tension nominale (V) sont ce qui indique combien de temps le système peut fonctionner sans recharge.

Le dimensionnement du système de stockage constitue une étape essentielle dans la conception d'une installation photovoltaïque autonome de stockage quand on monte une installation solaire autonome.

I.4.4 Onduleur et Charge (Utilisation)

La charge représente l'ensemble des équipements alimentés par le système photovoltaïque.

- **Onduleur :** nécessaire lorsque les charges fonctionnent en courant alternatif (AC). Il convertit le courant continu (DC) en courant alternatif (AC) sinusoïdal.

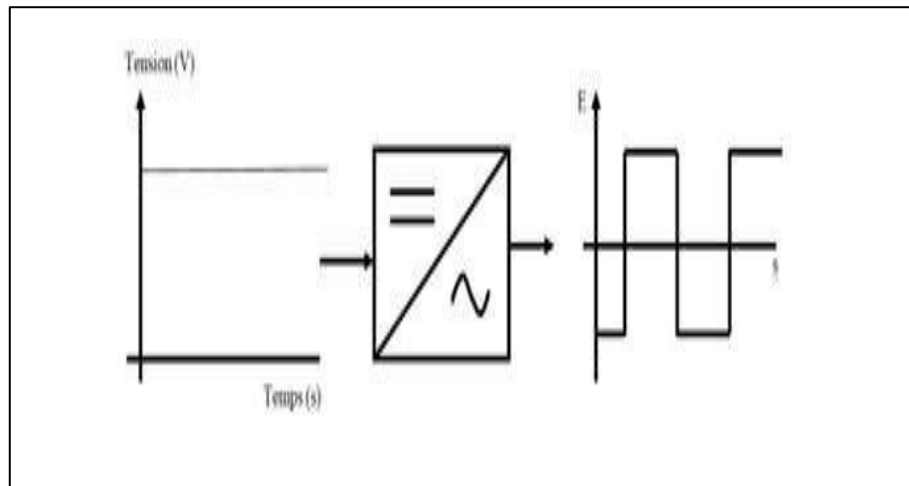


Figure 1. 12 : Schéma de principe de la conversion continu-alternative (DC-AC) [25].

- **Systèmes hybrides** : dans les installations connectées au réseau, c'est lui qui s'occupe de gérer le mouvement de l'énergie entre le générateur PV, les batteries et le réseau principal.
- **Gestion intelligente** : dans les systèmes « Smart Grid », on peut diriger la consommation des appareils. Le but est d'adapter la demande, voire de couper certaines choses si nécessaire, pour mieux profiter de l'énergie qu'on produit soi-même et pour préserver les batteries.

Tableau 1. 5 : Récapitulatif des composants du système.

Composant	Rôle principal	Lien avec le système Smart Solar
Panneau PV	Production DC	Source d'énergie primaire intermittente
Régulateur	Contrôle + MPPT	Algorithmes intelligents (P&O, logique floue)
Batterie	Stockage	Gestion de l'autonomie (Lithium-ion)
Onduleur	Conversion DC/AC	Interface réseau et synchronisation
Charge	Consommation	Pilotage de la demande

Le Tableau 1.5 synthétise l'articulation entre les composants matériels standards et les fonctionnalités avancées qui caractérisent une approche « Smart Solar ». Dans le cadre de ce mémoire, le système proposé s'inscrit pleinement dans cette architecture générale. Il se distingue toutefois par l'intégration de fonctionnalités intelligentes additionnelles, notamment le suivi solaire automatique (tracking), le nettoyage automatisé des panneaux pour lutter contre l'encrassement, et une supervision en temps réel pilotée par microcontrôleur.

I.5 Facteurs influençant le rendement des systèmes photovoltaïques

L'efficacité d'un système photovoltaïque ne dépend pas que de la qualité intrinsèque du panneau. C'est le résultat d'un ensemble complexe de facteurs liés à l'environnement, à l'électricité et à son fonctionnement. Bien comprendre tout cela est essentiel pour identifier les baisses de performance et optimiser la production d'énergie. Une étude récente a regroupé ces facteurs en plusieurs catégories principales, comme l'ensoleillement, la température, la saleté, l'ombre, le vieillissement et la performance des composants électroniques [26-27].

Ces points sont vraiment la base pour créer et améliorer les systèmes solaires modernes. On va les étudier en détail dans les chapitres suivants.

I.5.1 Ensoleillement et rayonnement solaire

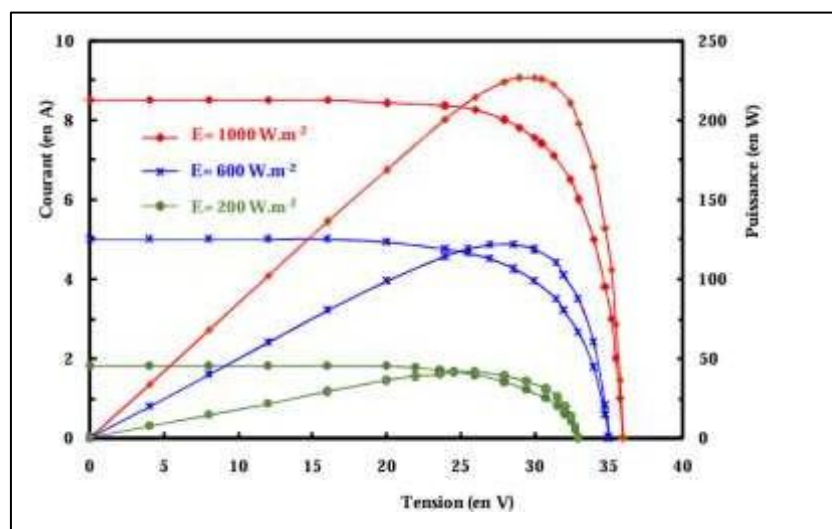


Figure 1. 13 : Caractéristiques électriques du module pour différentes valeurs de l'éclairement [28].

Le soleil est le facteur le plus important et le plus variable pour la production d'énergie solaire. La puissance qu'un panneau délivre dépend directement de la quantité de lumière qu'il reçoit, que l'on mesure en $G(W/m^2)$. Cela influence surtout le courant de court-circuit (I_{sc}).

La figure 1.13 montre comment la lumière du soleil agit sur le courant et la tension d'un module photovoltaïque.

La production d'énergie, elle, dépend beaucoup de l'endroit où l'on se trouve, de la saison et même du moment de la journée.

À cette variabilité naturelle, s'ajoute le fait que des conditions météo comme les nuages, les particules dans l'air (les aérosols) ou la pollution peuvent encore la réduire. Des études récentes confirment que la quantité de soleil reçue varie fortement dans l'espace et le temps, ce qui en fait le critère le plus important pour savoir si un endroit est bon pour installer des panneaux solaires [26-27].

I.5.2 Température de fonctionnement

La température agit principalement sur la tension de sortie des cellules solaires. Quand la température monte, la tension à vide V_{oc} diminue, ce qui fait baisser l'efficacité globale du module.

La figure 1.14 nous montre bien comment la température influence les performances électriques du module photovoltaïque, notamment cette baisse de tension.

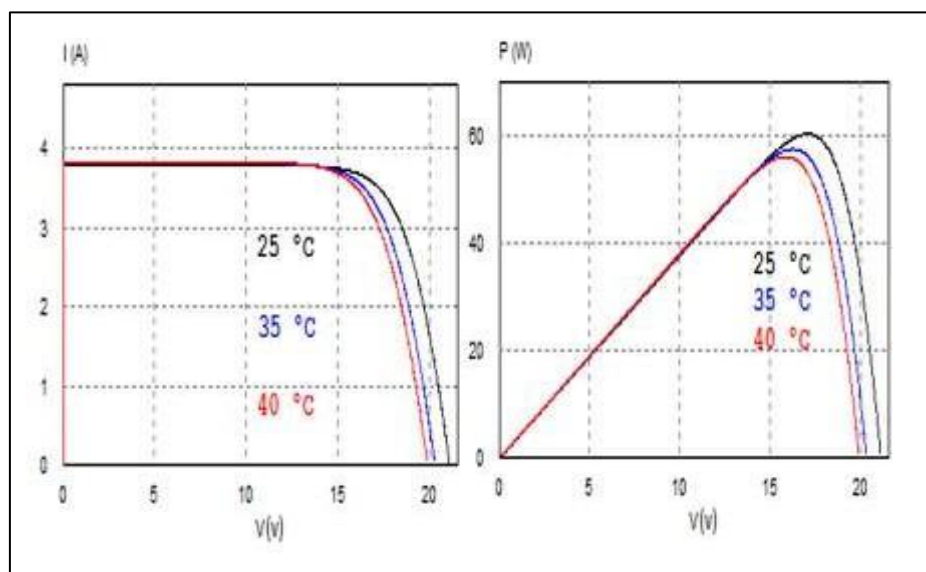


Figure 1. 14 : Les courbes I–V et P–V pour différentes valeurs de température [28].

Les expériences ont montré que le rendement diminue d'environ 0,4 à 0,5 % par degré Celsius d'augmentation de la température. Par exemple, une analyse récente a mesuré une baisse moyenne de 0,52 % par degré Celsius pour le rendement, et de 0,48 % pour la tension. Ça confirme ce qu'on trouve déjà dans la littérature [26][29].

Ce phénomène est vraiment un souci dans les régions chaudes. Là-bas, les températures élevées font que les panneaux solaires fonctionnent beaucoup moins bien.

I.5.3 Encrassement et accumulation de poussière (Soiling)

Quand il y a de la poussière, du sable ou d'autres petites saletés qui s'entassent sur les panneaux, ça devient une cause importante de baisse de leur efficacité. Ce dépôt empêche en fait le soleil d'arriver correctement aux cellules, ce qui fait que les panneaux produisent moins d'énergie.

La figure 1.15, elle, montre comment l'humidité peut jouer sur le rendement des panneaux solaires.

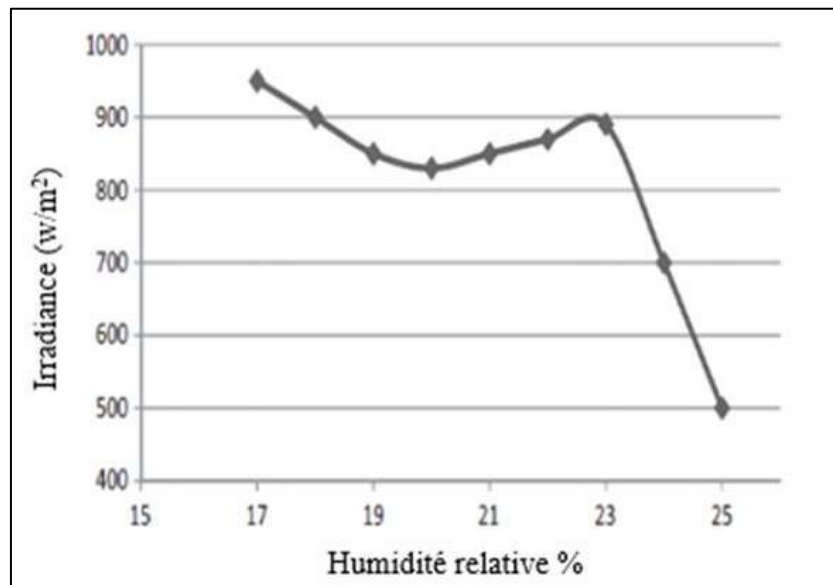


Figure 1. 15 : variation du niveau d'éclairement avec humidité [30].

Des tests ont montré que les pertes peuvent être très importantes. Par exemple, une tempête de sable peut faire baisser l'efficacité de plus de 60 %, et même plus encore si les conditions sont vraiment extrêmes. Ces baisses sont surtout un gros problème dans les régions désertiques ou très sèches.

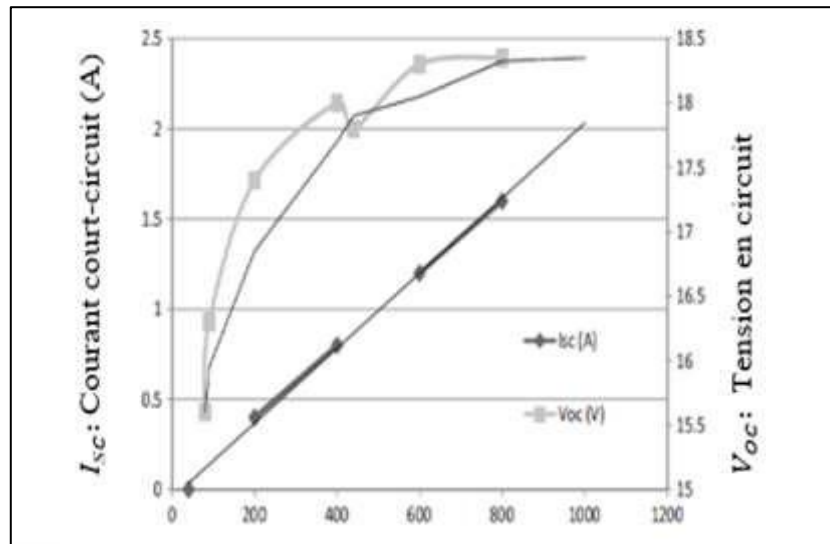


Figure 1. 16 : variation de V_{co} et du ICC avec le niveau d'irradiance [32].

L'encrassement (soiling) dépend de plusieurs choses. Il y a la nature des particules, leur taille, et puis la fréquence des pluies naturelles qui nettoient les panneaux [26].

I.5.4 Ombrage et pertes d'appariement

L'ombre partielle est l'un des problèmes les plus importants pour les installations solaires. Même si une petite zone est à l'ombre, la puissance produite peut chuter de manière notable.

En fait, quand une cellule est à l'ombre, elle peut freiner le courant de toute la série et causer ce qu'on appelle des pertes de (mismatch) (ou de déséquilibre). Ces pertes arrivent parce que les modules branchés en série ne fonctionnent pas tous de la même façon. Des études récentes indiquent que ces différences peuvent vraiment nuire à la performance générale du système [33].

En plus, l'ombre peut créer des points chauds (hot spots). Ces points risquent d'abîmer les cellules et de raccourcir leur durée de vie.

I.5.5 Dégradation et vieillissement des modules

Avec le temps, les panneaux solaires voient leurs performances diminuer progressivement. En général, on estime que cette dégradation est d'environ 0,5 % par an.

Cette baisse de performance s'explique par plusieurs phénomènes physiques et chimiques, comme par exemple :

- La dégradation causée par le potentiel électrique (PID),
- La dégradation due à la lumière (LID),
- Le jaunissement de l'encapsulant (la couche protectrice en EVA),
- La corrosion des points de contact,
- L'apparition de petites fissures dans les cellules.

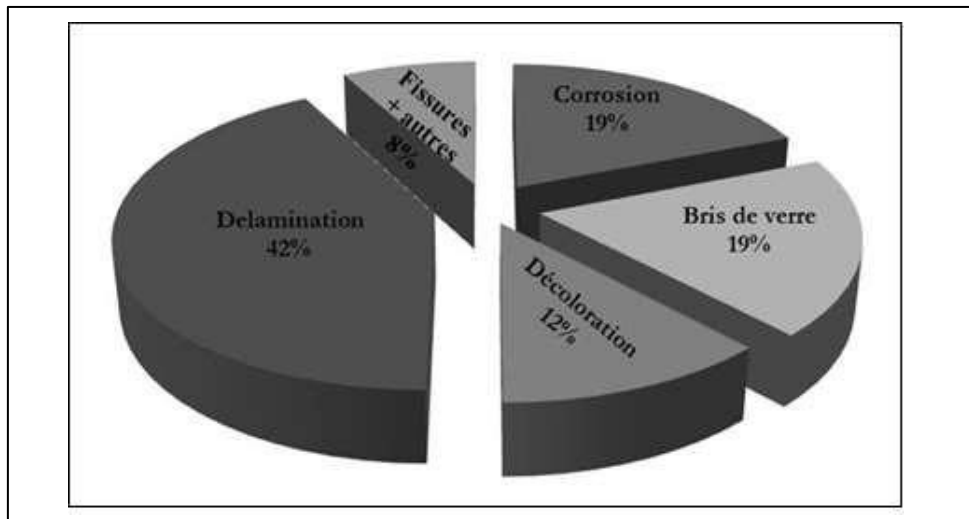


Figure 1. 17 : Représentativité des différents modes de dégradation [32].

Comme l'illustre la Figure 1.17, la dégradation des performances résulte de mécanismes physico-chimiques complexes. Ces mécanismes, incluant notamment la corrosion des contacts, le jaunissement de l'encapsulant (EVA) et l'apparition de microfissures, sont fortement accélérés par les facteurs de stress environnementaux tels que les cycles thermiques, l'exposition prolongée aux rayonnements ultraviolets (UV) et la pénétration d'humidité [32][34].

I.5.6 Rendement des composants électroniques

Le rendement global d'un système photovoltaïque dépend également des performances des composants électroniques associés, notamment le régulateur de charge et l'onduleur.

Chaque étage de conversion (DC-DC et DC-AC) introduit des pertes dues à l'effet Joule et aux phénomènes de commutation. Le bon fonctionnement de ces appareils a un impact direct sur l'énergie utile que l'on reçoit à la fin.

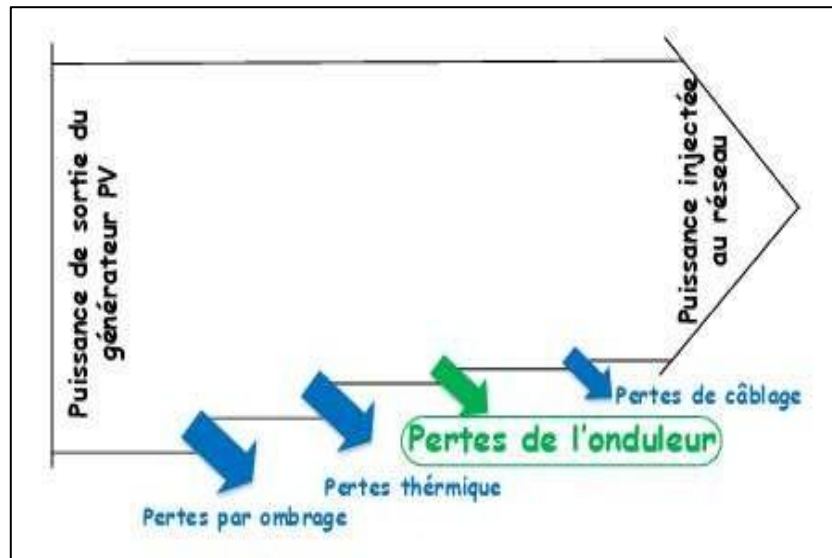


Figure 1. 18 : Bilan des pertes dans un système PV [35].

La Figure 1.18 met en évidence la répartition des pertes énergétiques dans un système photovoltaïque.

L'utilisation de techniques avancées de suivi du point de puissance maximale (MPPT), telles que les algorithmes intelligents (logique floue, méthodes adaptatives), permet de réduire ces pertes et d'optimiser le fonctionnement du système [21].

Tableau 1. 6 : Récapitulatif des facteurs influençant le rendement

Facteur	Impact principal	Ordre de grandeur des pertes
Ensoleillement	Variation du courant (I_{sc})	Dépend de la localisation
Température	Diminution de (V_{oc})	-0,4 à -0,5 %/°C
Encrassement	Réduction du flux lumineux	Jusqu'à 60 %
Ombrage	Pertes d'appariement	Jusqu'à 70 %
Vieillessement	Dégradation progressive	≈ -0,5 %/an
Électronique	Pertes de conversion	Variable

En définitive, l'optimisation du rendement d'un système photovoltaïque repose sur une approche systémique intégrant à la fois la maîtrise des conditions environnementales, la sélection de composants performants et la mise en œuvre de stratégies de contrôle avancées. L'intégration de fonctionnalités intelligentes constitue aujourd'hui un levier essentiel pour minimiser ces pertes et maximiser la production énergétique.

I.6 Mesure et acquisition des grandeurs électriques et environnementales

Pour savoir si un système solaire photovoltaïque fonctionne bien et pour le contrôler efficacement (par exemple, pour le MPPT, la gestion des batteries ou la surveillance), il faut absolument collecter des données électriques et environnementales de manière fiable et très précise.

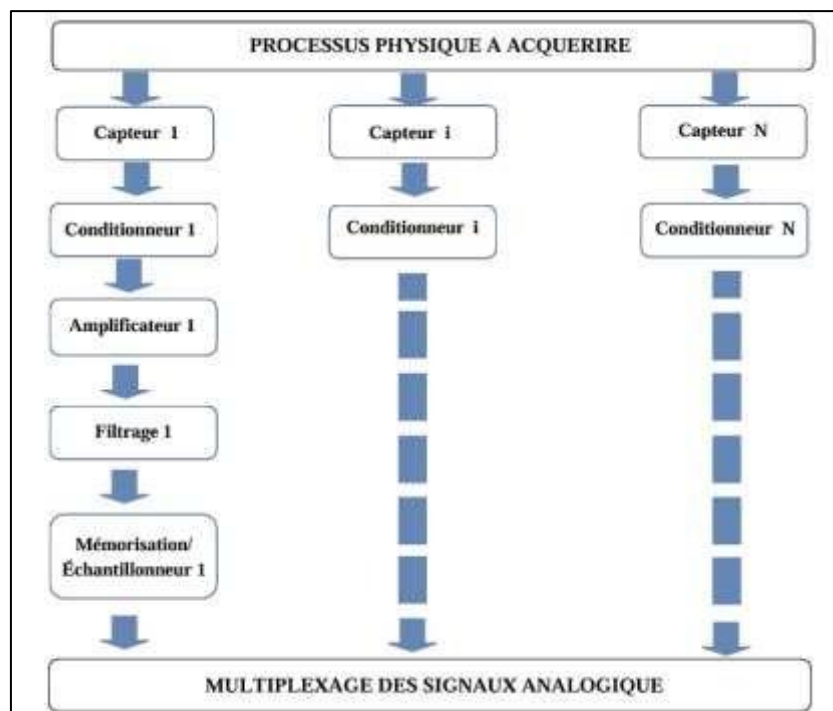


Figure 1. 19 : Schéma général d'un système d'acquisition des données photovoltaïques [36].

Ces informations nous aident à suivre ce qui se passe en direct, à repérer les problèmes éventuels et à améliorer au maximum l'efficacité générale du système [21][26].

Dans les installations solaires modernes, on utilise des capteurs adaptés pour recueillir ces données. Ensuite, des systèmes d'acquisition (qu'on appelle DAQ) ou des microcontrôleurs s'occupent de les traiter. Le but est d'avoir une surveillance constante et intelligente de l'ensemble.

On voit sur la Figure 1.19 comment le système d'acquisition est organisé, avec les capteurs et l'unité de traitement des données.

On utilisera ensuite ces données, dans le chapitre III, pour créer un système de surveillance intelligent qui tourne sur Arduino Cloud.

I.6.1 Mesure de la tension

La tension continue (DC) qu'on trouve aux bornes du panneau solaire, du régulateur et de la batterie est une information cruciale pour comprendre comment tout le système fonctionne. En général, on la mesure avec des ponts diviseurs de tension faits de résistances, connectés à des convertisseurs analogique-numérique (des CAN).

Quand il s'agit de systèmes branchés au réseau électrique, on peut mesurer la tension alternative (AC) en se servant de transformateurs de tension ou de capteurs d'isolation très précis.

Mesurer la tension, ça permet de connaître des valeurs fondamentales, comme la tension à vide (V_{oc}) et la tension au point de puissance maximale (V_{mp}) [7][11].

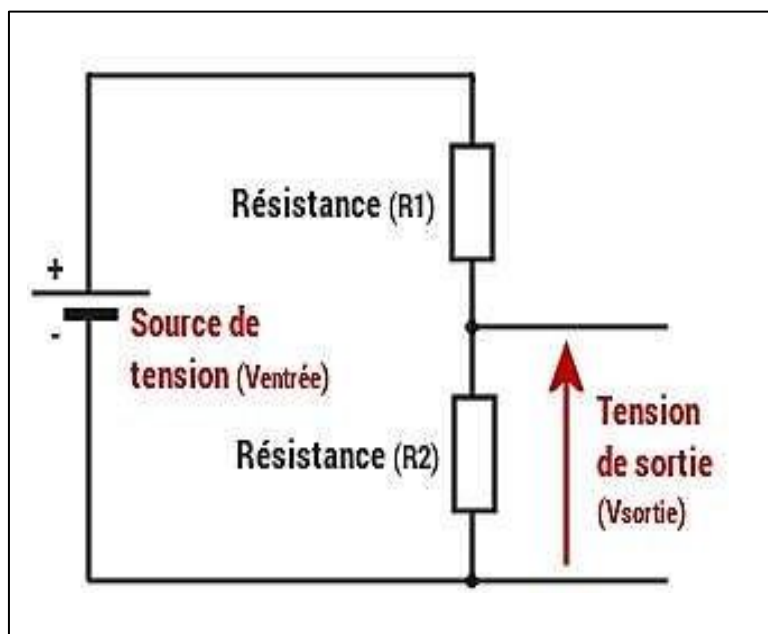


Figure 1. 20 : Mesure de la tension à l'aide d'un pont diviseur.

La Figure 1.20 nous montre comment on fait pour réduire la tension avant qu'elle ne soit transformée en données numériques.

I.6.2 Mesure du courant

Le courant est un élément très important et qui bouge beaucoup. Il est lié directement à la lumière du soleil, et on en a besoin pour bien suivre ce qu'on appelle le point de puissance maximale (le MPP).

On le mesure souvent avec :

- **Shunt résistif** : C'est une méthode simple et qui ne coûte pas cher. Par contre, ça fait perdre de l'énergie sous forme de chaleur (ce qu'on appelle l'effet Joule) :

$$P = R \cdot I^2 \quad (3)$$

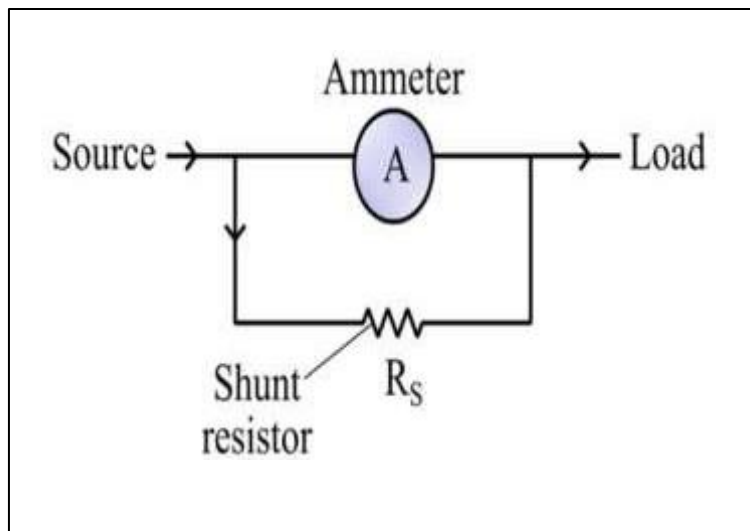


Figure 1. 21 : Shunt résistif.

- **Capteurs à effet Hall** (ex : ACS712, LEM) : offrant une isolation galvanique totale et une bonne précision, adaptés aux courants continus (DC) et alternatifs (AC). C'est précisément ce type de capteur (ACS712) qui sera retenu dans la partie pratique de ce mémoire (Chapitre III) pour sa simplicité d'intégration avec la carte Arduino

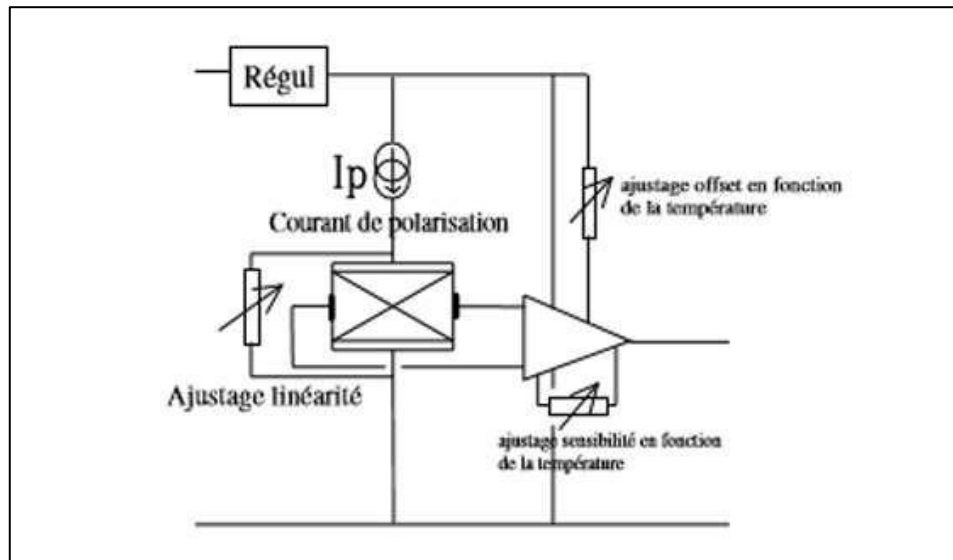


Figure 1. 22 : Structure interne d'un capteur à effet hall [37].

Les figures 1.21 et 1.22 montrent les deux façons principales de mesurer le courant dans les installations solaires.

Avec ces mesures, on peut savoir quel est le courant de court-circuit (I_{sc}) et aussi le courant au moment où la puissance est maximale (I_{mp}) [11-12].

I.6.3 Mesure de la puissance

D'habitude, on ne mesure pas directement la puissance électrique à un instant T . Au lieu de ça, on la calcule en utilisant la tension et le courant qu'on a déjà mesurés :

$$P = V \times I \quad (4)$$

Ça nous aide à voir comment le système fonctionne et à trouver le meilleur réglage possible (le MPP).

Dans les systèmes plus sophistiqués, des puces spéciales (comme l'ADE9000) peuvent mesurer directement la puissance dite active, la puissance réactive, et même l'énergie totale consommée, et ce, très précisément [21].

I.6.4 Mesure de la température

La température des cellules solaires (T_{cell}) joue un rôle direct sur la tension qu'elles produisent et sur l'efficacité générale du système. En général, si la température monte, la tension à vide a tendance à baisser [26][29].

Pour la mesurer, on utilise :

- **Thermistances (NTC/PTC) ou sondes RTD**
- **Capteurs intégrés** (ex : LM35, DS18B20) qui donnent des informations analogiques ou numériques.



Figure 1. 23 : Capteur LM35.

- **Thermocouples**, utilisés pour des plages de température étendues



Figure 1. 24 : Thermocouple.

Ces mesures aident à comprendre comment le système réagit à la chaleur et à le faire marcher au mieux dans la réalité.

I.6.5 Mesure de l'éclairement

Le rayonnement solaire $G(\text{W}/\text{m}^2)$ est ce qui entre principalement dans le système photovoltaïque et ça joue directement sur le courant qu'il produit.

On le mesure avec :

- **Des pyranomètres** : on s'en sert pour avoir des données météo de référence.
- **Des cellules de référence** : ce sont des cellules photovoltaïques ajustées, et le courant qu'elles donnent varie proportionnellement au rayonnement.
- **Des Capteurs à photodiode** (ex : TSL2591) : ceux-là sont pratiques pour les petits systèmes intégrés qui ne coûtent pas cher.

Mesurer ce rayonnement aide à voir comment le système marche et à rendre meilleurs les algorithmes qui suivent le point de puissance maximale (MPPT) [26].

I.6.6 Architecture d'acquisition

Pour s'occuper des signaux que les capteurs envoient, il faut d'abord les préparer. Ça veut dire les filtrer et les amplifier, avant de les transformer en données numériques.

Les systèmes d'aujourd'hui se servent :

- Des **microcontrôleurs** (Arduino, STM32, ESP32),
- ou des **systèmes d'acquisition industriels (DAQ)**.

La fréquence d'échantillonnage dépend de l'application :

- **1 à 10 Hz** pour surveiller les choses de l'environnement (qui changent doucement),
- **Jusqu'à 1 kHz** pour les algorithmes MPPT qui doivent être rapides. C'est pour que le système reste stable même si le soleil change d'un coup [21-22].

I.7 Conclusion

Ce premier chapitre a posé les bases théoriques et techniques de notre recherche. On a commencé par expliquer comment l'énergie du soleil se transforme en électricité. On a regardé en détail ce qui se passe physiquement dans la jonction P-N, et comment on représente électriquement une cellule photovoltaïque.

En étudiant les caractéristiques électriques (courant-tension I-V et puissance-tension P-V), on a vu que le générateur photovoltaïque ne réagit pas de manière linéaire et qu'il dépend beaucoup des conditions météo. C'est en regardant ce qui l'influence comme la température, le rayonnement, une ombre partielle ou la saleté (soiling) qu'on a compris les plus gros problèmes que rencontrent ces systèmes en matière d'efficacité et de fiabilité.

On a aussi passé en revue les différentes technologies de modules photovoltaïques et ce qu'ils offrent comme performances. Ça a montré qu'il faut toujours trouver un équilibre entre le rendement, le prix et combien de temps ça dure. On a aussi montré comment un système photovoltaïque est construit dans son ensemble, en insistant sur l'importance de chaque pièce, du générateur solaire aux parties électroniques qui convertissent l'énergie, sans oublier le stockage.

En plus, la partie qui parle de comment on mesure et on récupère les données électriques et environnementales nous a aidés à identifier les outils indispensables pour surveiller, analyser et contrôler le système en direct. Ces outils sont super importants pour que tout fonctionne au mieux et pour améliorer les performances générales.

Ce chapitre a donc bien posé des bases théoriques solides pour comprendre les systèmes photovoltaïques d'aujourd'hui. Mais cette approche, qui est juste théorique, ne suffit pas pour imaginer un système intelligent et qui marche parfaitement. Il faut donc utiliser des outils de modélisation et de simulation. Ça nous permet de voir comment le système photovoltaïque se comporte vraiment et de mettre en place des méthodes de contrôle plus poussées.

C'est pourquoi le prochain chapitre parlera de la modélisation et de la simulation de ce système photovoltaïque. On y étudiera aussi des stratégies de contrôle avancées pour tirer le maximum de puissance et rendre le système plus fiable.

Chapitre II : Outils de conception et environnement de développement

II.1 Introduction

Pour créer un système intelligent qui surveille et gère des installations solaires, il faut absolument que le matériel (les composants physiques) et le logiciel (les programmes) fonctionnent parfaitement ensemble. C'est pourquoi choisir les bons outils pour développer tout ça est un point crucial, car cela aura un impact direct sur les performances du système, sa fiabilité et sa capacité à évoluer.

Ce chapitre illustre les principaux outils que nous avons employés pour mettre au point le système Smart Solar. Nous allons nous concentrer sur trois éléments fondamentaux : la plateforme Arduino, qui est vraiment le cœur de notre système embarqué ; l'environnement Arduino, qui nous permet de l'intégrer dans une architecture connectée (IoT) ; et enfin le logiciel Proteus, qu'on utilise pour modéliser et simuler le système avant de le construire en vrai.

La Figure 2.1 illustre l'architecture fonctionnelle globale et les flux de données entre ces différents outils.

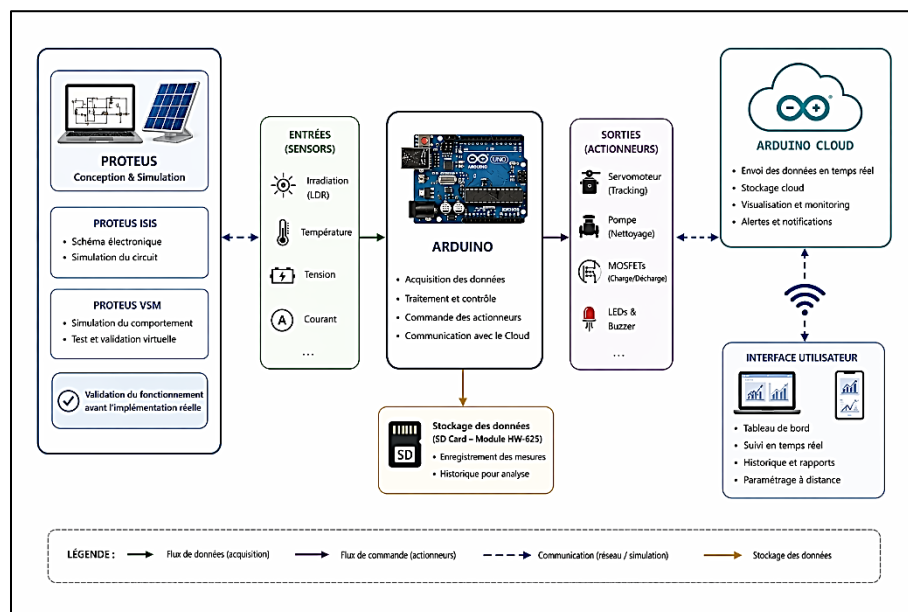


Figure 2. 1 : Architecture fonctionnelle et flux de données du système Smart Solar.

II.2 Présentation de la plateforme Arduino

Arduino, c'est un d'outil open-source pour créer des prototypes électroniques, lancé en 2005. Ça permet de construire des systèmes interactifs. Comme c'est facile à utiliser et qu'il y a plein

de ressources autour, beaucoup de monde s'en sert, aussi bien dans les universités que dans les entreprises.

On a choisi cette plateforme pour notre projet pour plusieurs raisons :

- C'est simple à programmer (on utilise un langage qui vient du C/C++),
- Ça marche avec des capteurs et d'autres modules différents,
- Ça ne coûte pas très cher,
- et puis, on peut l'adapter à beaucoup d'applications électroniques [38-39].

II.2.1 Architecture de la carte Arduino

Pour ce travail, la carte qu'on a prise est un Arduino Mega **2560**. Elle est faite avec un microcontrôleur **ATmega2560**.

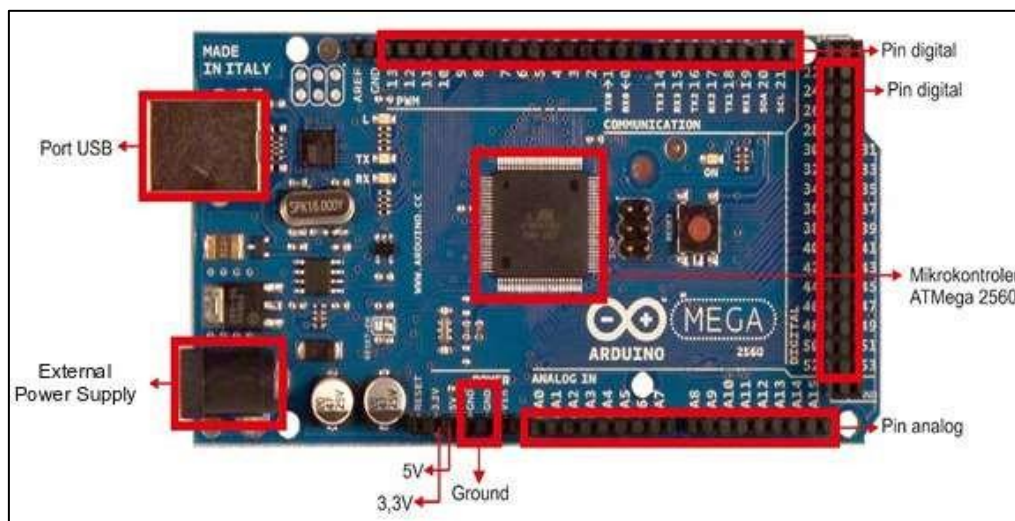


Figure 2. 2 : Architecture et brochage de la carte Arduino Mega 2560 [40].

Ses principales caractéristiques sont [41] :

- Microcontrôleur ATmega2560
- 54 entrées/sorties numériques
- 16 entrées analogiques
- Mémoire Flash de 256 Ko
- Fréquence d'horloge de 16 MHz

Les composants principaux incluent :

- Microcontrôleur,
- Régulateur de tension,
- Oscillateur à quartz,
- Ports USB et alimentation,
- Broches d'entrées/sorties.

Cette architecture permet l'intégration simultanée de plusieurs capteurs et actionneurs, ce qui est essentiel pour le système Smart Solar.

II.2.2 Fonctionnement du microcontrôleur

Le microcontrôleur ATmega2560 fonctionne avec une architecture qu'on appelle Harvard. L'architecture Harvard repose sur une séparation physique entre la mémoire programme et la mémoire de données. C'est ce qui l'aide à être plus rapide et plus efficace quand il travaille [41].

Pour qu'il fonctionne, il passe par trois grandes étapes :

- Acquisition des données (capteurs),
- Traitement via le programme embarqué,
- Commande des actionneurs.

Dans ce projet, il assure :

- La lecture des capteurs (courant, tension, température, luminosité),
- La commande des servomoteurs (suivi solaire et nettoyage),
- La gestion des alarmes,
- ainsi que la communication avec le système de supervision [42].

Cette approche permet de mettre en place un système autonome et intelligent.

II.2.3 Entrées / Sorties (analogiques et numériques)

Les entrées/sorties assurent l'interface entre le système et son environnement.

Entrées analogiques

Elles permettent la mesure de signaux continus (0–5 V), convertis en valeurs numériques à l'aide d'un convertisseur analogique-numérique (CAN) de résolution 10 bits [41].

$$q = \frac{5}{1024} \approx 4.88 \text{ mV}$$

Dans ce projet, elles sont utilisées pour mesurer :

- Le courant (capteur ACS712),
- La tension de la batterie,
- La température,
- La luminosité (LDR).

Entrées/Sorties numériques

Elles fonctionnent en logique binaire (HIGH/LOW) et permettent :

- La commande des MOSFETs,
- Le pilotage des servomoteurs,
- L'activation des systèmes d'alarme.

Les sorties PWM sont exploitées pour assurer un contrôle précis des servomoteurs.

II.3 Présentation du logiciel Proteus

Proteus est un logiciel de simulation électronique développé par Labcenter Electronics, utilisé pour la conception et la validation des circuits électroniques [43].

II.3.1 Interface et fonctionnalités principales

Proteus comprend deux modules :

- ISIS (simulation),

- ARES (PCB).

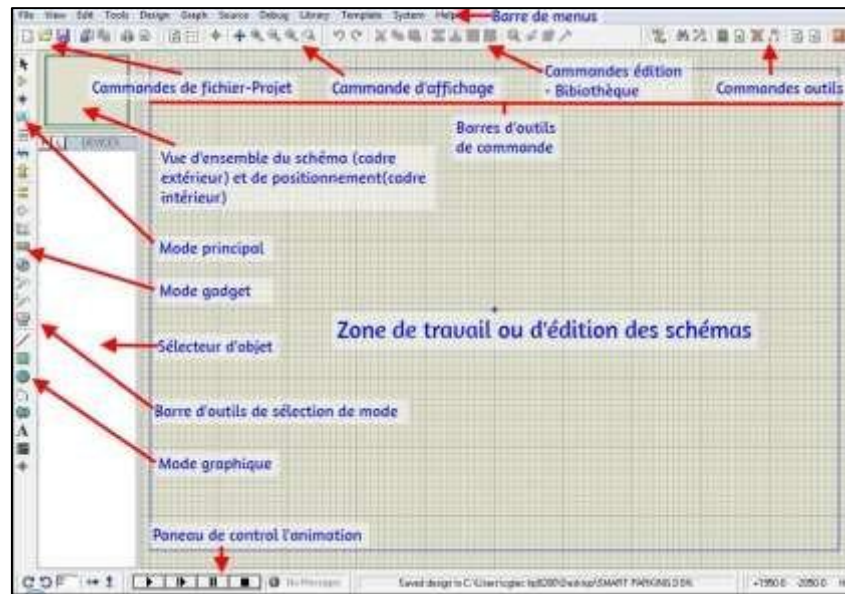


Figure 2. 3 : L'interface de logiciel ISIS Proteus [44].

Fonctionnalités principales :

- Conception de schémas,
- Simulation interactive,
- Instruments virtuels,
- Débogage.

II.3.2 Simulation des systèmes embarqués

Grâce à la technologie **VSM**, Proteus permet de simuler le fonctionnement réel du microcontrôleur avec le code Arduino.

Processus :

1. Création du schéma,
2. Chargement du code (.hex),
3. Simulation,
4. Analyse.

Cette étape est essentielle pour :

- Vérifier le fonctionnement,
- Détecter les erreurs,
- Optimiser le système avant réalisation.

II.3.3 Avantages et limites

Avantages :

- **Validation avant implémentation** : La validation préliminaire à l'implémentation matérielle permet une évaluation approfondie du système et l'identification des anomalies potentielles avant toute concrétisation physique.
- **Réduction des coûts** : Une réduction significative des coûts est observable, découlant de la limitation de l'emploi de composants physiques et de la prévention des déperditions financières engendrées par des défauts de conception.
- **Sécurité** : La sécurité des équipements est assurée, étant donné la possibilité de simuler des conditions critiques, telles que les courts-circuits ou les surcharges, sans compromettre l'intégrité du matériel.
- **Visualisation complète** : Une visualisation exhaustive est disponible, offrant une observation en temps réel du comportement du circuit et des dynamiques des signaux électriques.

Limites :

- **Écart avec la réalité** : Un décalage par rapport aux conditions réelles peut être constaté, les résultats de la simulation étant susceptibles de présenter des variations subtiles comparativement au comportement effectif des composants physiques.
- **Compatibilité logicielle limitée** : La compatibilité logicielle n'est pas toujours complète, certaines bibliothèques Arduino ou fonctionnalités spécifiques n'étant pas systématiquement prises en charge de manière exhaustive.
- **Absence de phénomènes parasites** : L'absence de modélisation des phénomènes parasites constitue une lacune notable, car des effets réels comme le bruit

électronique, les pertes ohmiques dans les câbles ou les perturbations électromagnétiques ne sont généralement pas intégrés dans le modèle.

En dépit de ces limitations, Proteus s'avère être un instrument essentiel pour la phase de conception, car il permet d'effectuer une validation rapide et rigoureuse du système préalablement à son implémentation physique.

II.4 Conclusion

Le présent chapitre a eu pour objectif de synthétiser les outils fondamentaux employés dans la conception du système Smart Solar. La plateforme Arduino s'est avérée être une solution particulièrement adaptée aux déploiements embarqués ; parallèlement, l'intégration de l'Arduino offre une capacité de supervision optimisée par l'Internet des Objets. En outre, le logiciel Proteus fournit un cadre de simulation rigoureux, indispensable à la validation préliminaire du système avant sa concrétisation matérielle.

Ces instruments établissent un fondement crucial pour l'élaboration et la mise en œuvre du système envisagé. Après avoir présenté les principaux outils de conception, Le chapitre suivant est consacré à la conception, à la modélisation et à la réalisation pratique du système Smart Solar. Le chapitre subséquent se focalisera sur la conception détaillée du système Smart Solar, en décrivant la sélection des composants matériels, l'élaboration des schémas de câblage correspondants, et les principes d'implémentation des algorithmes de contrôle et de communication.

Chapitre III : Conception, modélisation et implémentation du système Smart Solar

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons la conception, la modélisation et l'implémentation du système **Smart Solar** développé dans le cadre de ce projet. L'objectif principal est de réaliser un prototype photovoltaïque autonome et intelligent capable d'optimiser le rendement énergétique global tout en garantissant une gestion sécurisée de l'énergie stockée. Pour ce faire, le système intègre trois fonctions principales : un suivi solaire automatique (*Solar Tracking*), un mécanisme de nettoyage automatisé du panneau, et un système de gestion et de protection de la batterie (BMS).

Le cœur de traitement et de contrôle repose sur une carte **Arduino Mega 2560** [38][40], choisie pour sa robustesse computationnelle et sa large connectivité périphérique. Elle assure l'acquisition en temps réel des grandeurs physiques via une chaîne d'acquisition de données optimisée. Ce traitement inclut :

- Le calcul du courant bidirectionnel via le capteur à effet Hall **ACS712-05B** [4],
- La surveillance thermique par le capteur de précision **LM35**,
- La détection différentielle de l'alignement lumineux par deux photorésistances (LDR),
- La mesure des tensions du panneau et de la batterie à l'aide de circuits diviseurs de tension calibrés ($4\text{ k}\Omega / 1\text{ k}\Omega$ pour le panneau, $30\text{ k}\Omega / 4,3\text{ k}\Omega$ pour la batterie).

Les informations collectées subissent un filtrage numérique par moyennage (10 échantillons par capteur) avant d'être traitées par l'algorithme principal afin de commander les différents actionneurs :

- Un servomoteur de positionnement pour le suivi azimutal,
- Un servomoteur couplé à une pompe à eau (5 V) pour la séquence de nettoyage,
- Des interrupteurs statiques à MOSFET (IRLZ44N) pour la régulation des flux de puissance (charge et décharge).

Afin de garantir la sécurité matérielle et la fiabilité à long terme, plusieurs mécanismes de protection (BMS logiciel) ont été rigoureusement implémentés pour isoler les composants en cas d'anomalie :

- Protection contre la **surcharge** (coupure de la charge à 9,2 V),
- Protection contre la **décharge profonde** (déconnexion de l'utilisation à 6,8 V),
- Sécurité thermique et électrique face aux **surintensités** (> 5 A),
- Détection des **courts-circuits** (> 8 A) et des **surchauffes** (> 50 °C).

Une interface de supervision locale, combinant un écran **LCD 20×4** piloté via le bus I2C (PCF8574), des indicateurs visuels (LEDs d'état) et une alerte sonore (buzzer piézoélectrique), assure l'affichage dynamique des états du système (NORMAL, LOW VOLT, HIGH TEMP, etc.).

La méthodologie adoptée suit un cycle de développement d'ingénierie rigoureux : la conception théorique et algorithmique a d'abord été modélisée et validée par une simulation comportementale exhaustive sous **Proteus** [45], avant d'être transposée fidèlement sur un prototype physique fonctionnel. Enfin, une analyse comparative des résultats expérimentaux permet d'évaluer le gain d'efficacité obtenu par rapport à un système photovoltaïque fixe traditionnel.

III.2 Architecture globale du système

III.2.1 Présentation générale

Le système Smart Solar développé dans le cadre de ce projet constitue une station photovoltaïque intelligente et autonome conçue pour optimiser la production d'énergie solaire, assurer la protection du système de stockage et garantir une supervision continue des paramètres de fonctionnement. Contrairement aux installations photovoltaïques conventionnelles à orientation fixe, ce système intègre des mécanismes d'adaptation automatique permettant d'améliorer le rendement énergétique et la fiabilité opérationnelle.

Le fonctionnement global repose sur la synergie de trois boucles fonctionnelles principales :

- **La boucle d'optimisation (Solar Tracking)** : elle oriente automatiquement le panneau photovoltaïque vers la direction présentant l'intensité lumineuse la plus élevée afin de maximiser l'énergie captée.

- **La boucle de maintenance (Nettoyage automatique)** : elle assure le nettoyage périodique de la surface du panneau afin de limiter les pertes de rendement dues à l'accumulation de poussière.
- **La boucle de sécurité (BMS logiciel)** : elle surveille en permanence les paramètres électriques et thermiques du système afin de protéger la batterie contre les conditions de fonctionnement anormales.

L'ensemble des traitements est exécuté par une carte Arduino Mega 2560 selon une boucle de contrôle cyclique d'environ 200 ms, garantissant une réactivité suffisante face aux variations d'ensoleillement et aux éventuels défauts électriques.

III.2.2 Architecture matérielle

L'architecture matérielle du système est organisée autour de quatre blocs fonctionnels principaux : l'unité de contrôle, le bloc d'acquisition, le bloc d'actionnement et l'interface homme-machine. Cette organisation facilite la séparation entre les circuits de commande basse puissance et les circuits de puissance.

1. Unité de contrôle centrale

L'unité de traitement repose sur la carte Arduino Mega 2560 basée sur le microcontrôleur ATmega2560. Elle assure l'acquisition des mesures, l'exécution des algorithmes de décision, la gestion des protections ainsi que la commande des différents actionneurs du système [38][40-41].

2. Bloc d'acquisition des données

Ce bloc est chargé de mesurer les grandeurs électriques et environnementales nécessaires au fonctionnement du système.

Capteurs de tension :

Deux ponts diviseurs de tension permettent l'adaptation des niveaux de tension vers la plage admissible de l'Arduino (0–5 V).

- Panneau photovoltaïque (A1) :

- $R1 = 4 \text{ k}\Omega$
- $R2 = 1 \text{ k}\Omega$
- Facteur de division = 5
- Batterie (A2) :
 - $R3 = 30 \text{ k}\Omega$
 - $R4 = 7,5 \text{ k}\Omega$
 - Facteur de division ≈ 5

Capteur de courant ACS712-05B :

Installé en série sur la ligne principale, il mesure le courant circulant dans le système avec une sensibilité de 185 mV/A et transmet une tension analogique proportionnelle vers l'entrée A0 [37].

Capteur de température LM35 :

Connecté à l'entrée A3, il permet de surveiller la température du système avec une sensibilité de 10 mV/°C.

Capteurs de luminosité LDR :

Deux photorésistances sont placées de part et d'autre du panneau photovoltaïque et connectées aux entrées A4 et A5. Elles permettent de détecter la direction de la source lumineuse en comparant les niveaux d'éclairement reçus.

3. Bloc d'actionnement

Ce bloc exécute les actions décidées par l'unité de contrôle.

Servomoteur de tracking :

Commandé par la broche numérique 5, il ajuste l'orientation du panneau photovoltaïque sur une plage angulaire comprise entre 10° et 170°.

Servomoteur de nettoyage :

Connecté à la broche 4, il effectue le déplacement mécanique du système de nettoyage.

Pompe de nettoyage :

Pilotée via la broche 2 à travers un étage de commande électronique, elle assure l'alimentation en eau durant les opérations de nettoyage.

MOSFETs de puissance IRLZ44N :

Deux transistors MOSFET sont utilisés pour contrôler les phases de charge et de décharge de la batterie :

- MOSFET_CHARGE (broche 7)
- MOSFET_DISCHARGE (broche 6)

Ils assurent une commutation rapide avec de faibles pertes de puissance grâce à leur faible résistance à l'état passant.

4. Interface Homme-Machine (IHM)

L'interface utilisateur permet la supervision locale du système.

Écran LCD 20×4 :

Il affiche en temps réel la tension du panneau solaire, la tension de la batterie, le courant, la température, l'angle du panneau et l'état général du système.

LEDs de signalisation :

Quatre LEDs indiquent les différents états de fonctionnement :

- Verte : fonctionnement normal.
- Jaune : batterie faible ou nettoyage en cours.
- Bleue : mode nuit.
- Rouge : défaut critique.

Buzzer :

Il génère une alarme sonore intermittente lors de la détection d'un court-circuit, d'une surintensité ou d'une surchauffe.

Le schéma matériel complet du système est présenté dans la Figure 3.1.

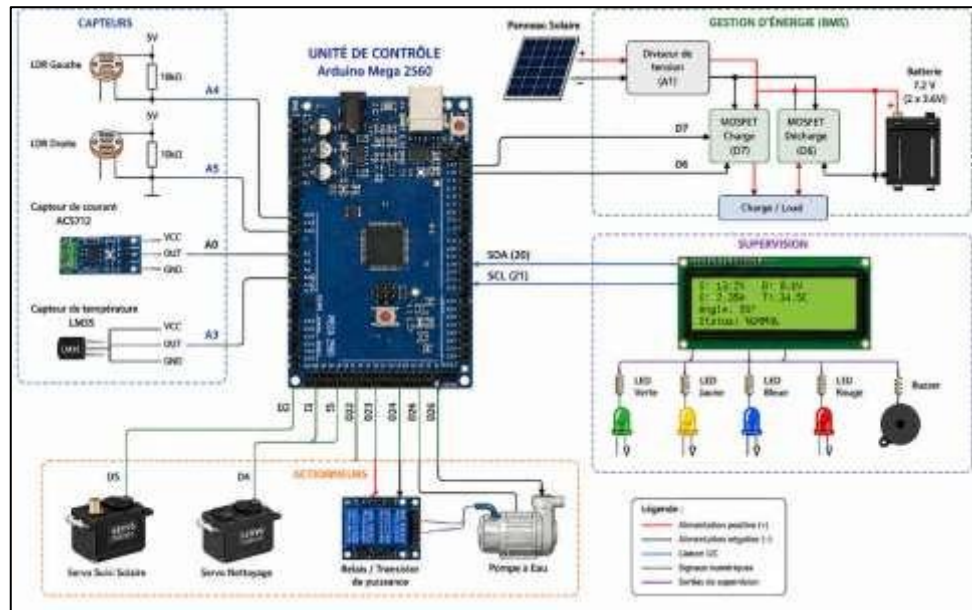


Figure 3. 1 : Le schéma matériel complet du système smart solaire.

III.2.3 Architecture logicielle

L'architecture logicielle est développée sous Arduino IDE selon une approche modulaire et structurée. Le programme principal est exécuté dans une boucle continue assurant l'acquisition des données, leur traitement et la commande des actionneurs.

Phase 1 : Acquisition et filtrage des données

Afin d'améliorer la fiabilité des mesures, les données analogiques sont filtrées à l'aide d'un suréchantillonnage logiciel. La fonction `readAverage()` effectue dix acquisitions successives puis calcule leur moyenne arithmétique afin de réduire l'influence du bruit et des perturbations électriques [36].

Les grandeurs acquises sont :

- Tension du panneau photovoltaïque.
- Tension de la batterie.
- Courant du système.
- Température.
- Intensité lumineuse mesurée par les LDR.

Phase 2 : Traitement logique et gestion des protections

Cette phase constitue le cœur décisionnel du système. Les données mesurées sont comparées à des seuils prédéfinis afin de garantir la sécurité de fonctionnement.

Les principales protections implémentées sont :

- Protection contre la surcharge de batterie ($BattV \geq 9,2 \text{ V}$).
- Protection contre la décharge profonde ($BattV \leq 6,8 \text{ V}$).
- Protection contre les surintensités ($I > 5 \text{ A}$).
- Protection contre les courts-circuits ($I > 8 \text{ A}$).
- Protection thermique ($T > 50 \text{ }^{\circ}\text{C}$).

Lorsqu'un défaut est détecté, les MOSFETs correspondants sont désactivés et l'état du système est immédiatement mis à jour.

Phase 3 : Commande et supervision

Après validation des conditions de sécurité, le programme exécute les fonctions de contrôle.

L'algorithme de suivi solaire compare les valeurs des deux capteurs LDR et calcule l'écart d'éclairement. Lorsque cet écart dépasse un seuil fixé, l'angle du servomoteur est ajusté afin d'orienter le panneau vers la zone la plus éclairée.

Le nettoyage automatique est déclenché après la transition entre le mode nuit et le mode jour. La pompe est activée pendant une courte durée puis le servomoteur de nettoyage effectue un mouvement de balayage sur toute la surface du panneau.

Enfin, le système met à jour l'affichage LCD, active les indicateurs lumineux correspondants à l'état détecté et transmet les données de diagnostic via la liaison série pour les opérations de supervision et de débogage.

L'organigramme général du programme est présenté dans la Figure 3.2, tandis que le code source complet est fourni en annexe.

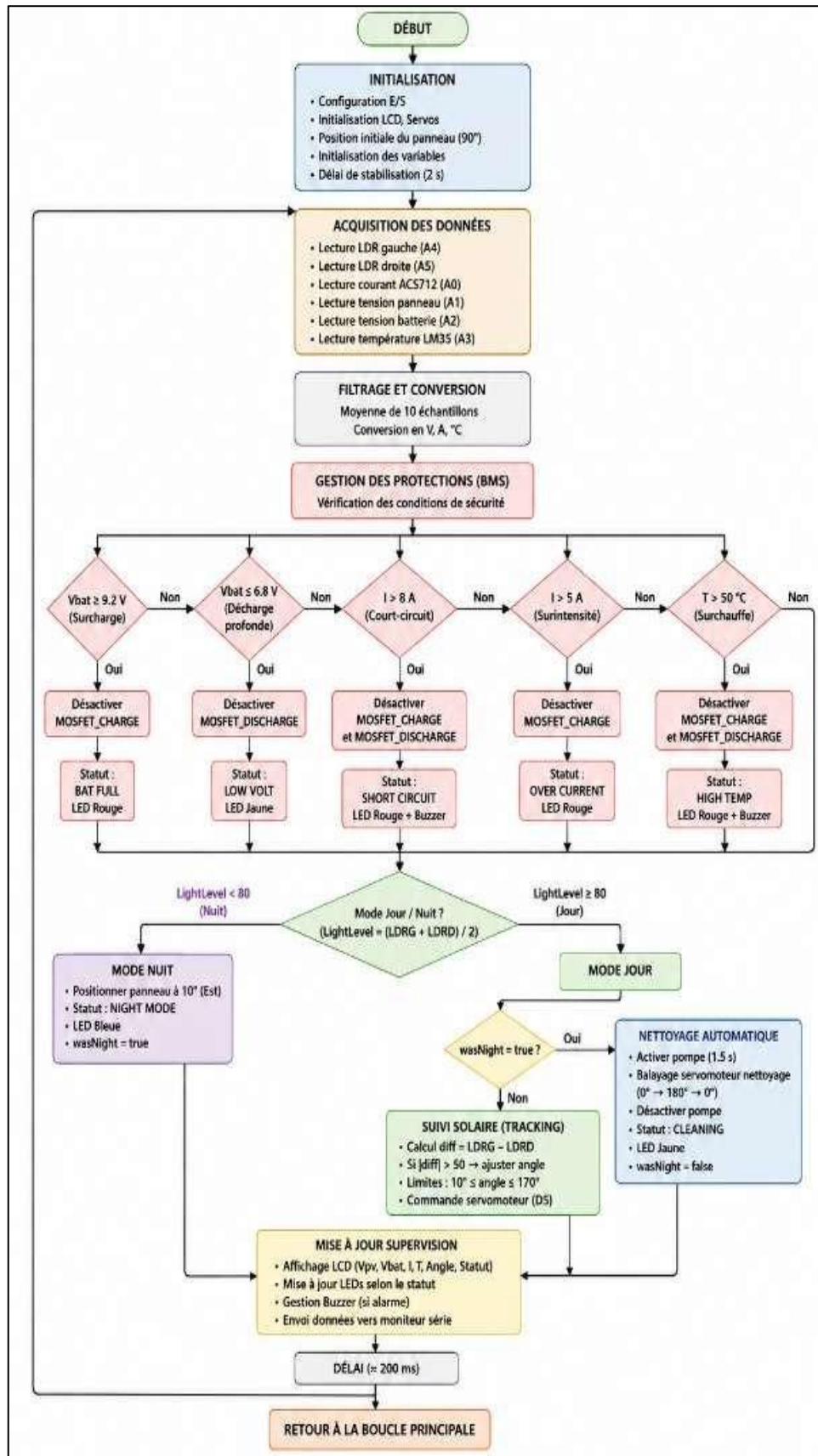


Figure 3. 2 : L'organigramme général du programme.

III.3 Description des composants matériels

Cette section présente les principaux composants matériels utilisés dans la réalisation du système Smart Solar. Le choix de ces composants a été effectué en fonction des exigences de performance, de fiabilité, de coût et de compatibilité avec la plateforme de commande. Chaque élément joue un rôle spécifique dans l'acquisition des données, le traitement des informations, la protection énergétique ou le contrôle des actionneurs.

III.3.1 Carte Arduino Mega 2560

La carte Arduino Mega 2560 constitue l'unité centrale de traitement du système Smart Solar. Basée sur le microcontrôleur ATmega2560, elle dispose de 54 entrées/sorties numériques, de 16 entrées analogiques et de plusieurs interfaces de communication telles que l'UART, le SPI et l'I2C [38][40-41].

Grâce à son nombre élevé de broches et à sa capacité mémoire importante, elle permet de gérer simultanément les capteurs, les actionneurs et les dispositifs d'affichage. Dans ce projet, l'Arduino Mega assure l'acquisition des mesures, l'exécution des algorithmes de suivi solaire, la gestion du système de nettoyage automatique, la supervision des protections de la batterie ainsi que l'affichage des informations sur l'écran LCD.

Caractéristiques principales :

- Microcontrôleur : ATmega2560
- Tension de fonctionnement : 5 V
- Tension d'alimentation recommandée : 7 à 12 V
- Mémoire Flash : 256 Ko
- SRAM : 8 Ko
- EEPROM : 4 Ko
- Entrées analogiques : 16
- Sorties numériques : 54

III.3.2 Capteur de courant ACS712

Le capteur ACS712 est un capteur de courant basé sur l'effet Hall permettant la mesure de courants continus ou alternatifs sans contact électrique direct avec le circuit de puissance [37] [46].

Dans cette réalisation, la version ACS712-05B a été utilisée. Elle présente une plage de mesure comprise entre -5 A et +5 A avec une sensibilité de 185 mV/A. Le capteur est placé en série sur la ligne principale afin de surveiller le courant circulant entre le panneau photovoltaïque, la batterie et la charge.

La sortie analogique du capteur est reliée à l'entrée A0 de l'Arduino Mega. La tension délivrée est proportionnelle au courant mesuré et centrée autour de 2,5 V lorsque le courant est nul.

La conversion numérique du courant est effectuée selon les relations suivantes :

$$V_{sensor} = \frac{ADC_{current} \times 5000}{1023} \quad (1)$$

$$I = \frac{V_{sensor} - 2500}{185} \quad (2)$$

où :

- $ADC_{current}$ représente la valeur convertie par l'ADC de l'Arduino ;
- V_{sensor} est la tension de sortie du capteur (mV) ;
- I est le courant mesuré (A).

Les informations obtenues sont utilisées pour la détection des surintensités et des courts-circuits.

III.3.3 Capteurs de tension

La surveillance des tensions du panneau photovoltaïque et de la batterie est réalisée à l'aide de deux ponts diviseurs de tension connectés aux entrées analogiques de l'Arduino.

Le premier pont diviseur est associé au panneau solaire et utilise :

- $R_1 = 4 \text{ k}\Omega$
- $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$

Le second pont diviseur est connecté à la batterie et utilise :

- $R_3 = 30\text{ k}\Omega$
- $R_4 = 7,5\text{ k}\Omega$

Ces montages permettent d'adapter les tensions mesurées à la plage admissible de l'ADC de l'Arduino (0 à 5 V) tout en conservant une bonne précision de mesure.

Les tensions réelles sont calculées à partir de la relation :

$$V_{mesuree} = V_{ADC} \times \frac{R_{haut} + R_{bas}}{R_{bas}} \quad (3)$$

Ces mesures sont essentielles pour évaluer l'état énergétique du système et déclencher les mécanismes de protection contre la surcharge ou la décharge profonde de la batterie.

III.3.4 Capteur de température LM35

Le LM35 est un capteur analogique de température largement utilisé dans les systèmes embarqués grâce à sa simplicité d'intégration et à sa précision satisfaisante [47].

Il fournit une tension proportionnelle à la température avec une sensibilité de :

$$10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$$

Le capteur est connecté à l'entrée analogique A3 de l'Arduino. La température est déterminée par :

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{V_{LM35}}{10} \quad (4)$$

où V_{LM35} est exprimée en millivolts.

Dans le système Smart Solar, le LM35 permet de surveiller l'échauffement du système et d'activer une protection thermique lorsque la température dépasse le seuil de sécurité fixé à 50 °C.

III.3.5 Capteurs LDR

Les capteurs LDR (Light Dependent Resistor) sont des photorésistances dont la valeur varie en fonction de l'intensité lumineuse reçue.

Deux LDR sont installées de part et d'autre du panneau photovoltaïque et connectées aux entrées analogiques A4 et A5 de l'Arduino. Chaque capteur est associé à une résistance fixe afin de former un pont diviseur de tension.

Le principe de fonctionnement repose sur la comparaison des niveaux d'éclairement détectés par les deux capteurs. Lorsque les valeurs mesurées sont différentes, le système détermine la direction du rayonnement solaire et ajuste l'orientation du panneau afin de maximiser la captation de l'énergie solaire.

Cette technique constitue une solution simple, économique et efficace pour réaliser le suivi solaire automatique.

III.3.6 Servomoteurs

Le système utilise deux servomoteurs MG90S assurant respectivement les fonctions de suivi solaire et de nettoyage automatique.

Servomoteur de tracking

Le premier servomoteur est chargé d'orienter le panneau photovoltaïque selon les informations fournies par les capteurs LDR. Il reçoit un signal PWM généré par la broche numérique 5 de l'Arduino.

L'algorithme de contrôle ajuste progressivement la position du servomoteur dans une plage comprise entre 10° et 170° , garantissant ainsi un suivi optimal du soleil tout au long de la journée.

Servomoteur de nettoyage

Le second servomoteur est connecté à la broche numérique 4 et assure le déplacement mécanique du système de nettoyage.

Lors du déclenchement du cycle de nettoyage, il effectue un mouvement de balayage permettant d'éliminer les poussières et les impuretés accumulées sur la surface du panneau photovoltaïque.

Les servomoteurs ont été retenus pour leur précision de positionnement, leur faible consommation énergétique et leur simplicité de commande.

III.3.7 MOSFET IRLZ44N

Le transistor MOSFET IRLZ44N est un composant de puissance utilisé comme interrupteur électronique dans le système.

Grâce à sa faible résistance à l'état passant :

$$R_{DS(on)} \approx 0,028\Omega$$

il permet de réduire les pertes énergétiques lors de la commutation.

Deux MOSFETs sont utilisés :

- **MOSFET_CHARGE** : contrôle la charge de la batterie.
- **MOSFET_DISCHARGE** : contrôle l'alimentation de la charge.

Ces composants permettent la mise en œuvre des fonctions de protection contre :

- La surcharge ;
- La décharge profonde ;
- Les surintensités ;
- Les courts-circuits.

Lorsque l'un de ces défauts est détecté, l'Arduino désactive immédiatement le MOSFET concerné afin d'isoler électriquement la batterie et de préserver son intégrité.

III.3.8 Écran LCD I2C

La supervision locale du système est assurée par un écran LCD 20×4 équipé d'un module de communication I2C.

L'utilisation du protocole I2C permet de réduire le nombre de connexions nécessaires entre l'écran et l'Arduino. La communication s'effectue uniquement à travers les lignes SDA et SCL.

L'écran affiche en temps réel les principales informations relatives au fonctionnement du système :

- Tension du panneau photovoltaïque ;
- Tension de la batterie ;
- Courant mesuré ;
- Température ;
- Angle d'orientation du panneau ;
- Etat du système (NORMAL, BAT FULL, LOW VOLT, NIGHT MODE, SHORT CIRCUIT, HIGH TEMP, etc.).

Cette interface facilite la supervision et permet à l'utilisateur de suivre l'évolution des paramètres du système de manière simple et intuitive.

III.4 Conception du système

Cette section présente la conception fonctionnelle, structurelle et algorithmique du système Smart Solar. Après l'identification des composants matériels et de leur rôle respectif, il est nécessaire d'étudier leur intégration au sein d'une architecture cohérente permettant d'assurer les fonctions de suivi solaire, de nettoyage automatique, de protection de la batterie et de supervision locale.

Pour offrir une vision claire et rigoureuse du fonctionnement global du prototype, trois niveaux de représentation complémentaires sont utilisés :

- **Le schéma fonctionnel**, qui décrit les échanges d'énergie, d'informations et de matière entre les différents sous-systèmes ;
- **Le diagramme de blocs**, qui représente l'organisation matérielle et l'interconnexion des composants ;
- **L'organigramme de fonctionnement**, qui décrit la logique décisionnelle implémentée dans le programme embarqué de l'Arduino Mega 2560.

III.4.1 Schéma fonctionnel

Le schéma fonctionnel (Figure 3.3) représente le système Smart Solar sous forme de blocs fonctionnels interconnectés. Il met en évidence la circulation des flux énergétiques entre le panneau photovoltaïque, la batterie et la charge, ainsi que les flux d'informations échangés entre les capteurs, l'unité de traitement et les actionneurs.

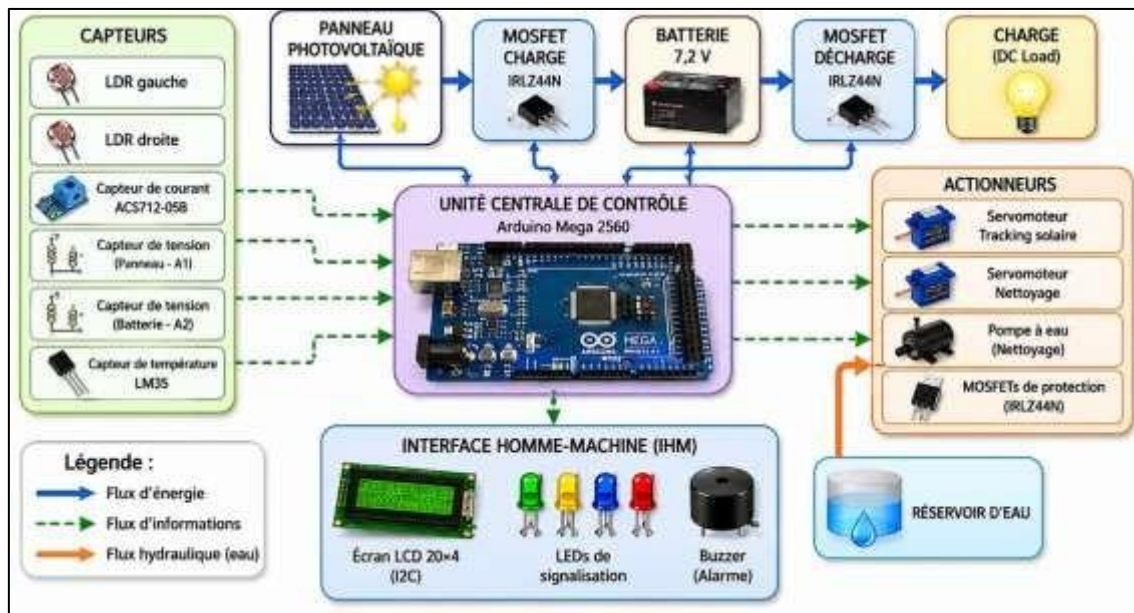


Figure 3. 3 : Le schéma fonctionnel du système Smart Solar.

Le panneau photovoltaïque constitue la source primaire d'énergie. Il convertit le rayonnement solaire en énergie électrique continue. Les paramètres électriques du panneau, notamment sa tension et son courant, sont mesurés en temps réel afin d'évaluer son état de fonctionnement.

L'énergie produite est stockée dans une batterie rechargeable de 7,2 V assurant l'alimentation du système lorsque la production solaire devient insuffisante. La gestion des échanges énergétiques est assurée par deux MOSFETs IRLZ44N commandés par l'Arduino Mega.

Le système de suivi solaire est constitué de deux capteurs LDR et d'un servomoteur permettant d'orienter le panneau vers la zone présentant l'éclairement maximal. Cette fonction améliore significativement le rendement énergétique de l'installation.

Le système de nettoyage automatique comprend un servomoteur et une mini-pompe à eau permettant d'éliminer périodiquement les poussières déposées sur la surface du panneau photovoltaïque.

L'unité centrale de contrôle, basée sur l'Arduino Mega 2560, assure l'acquisition des mesures, l'exécution des algorithmes de contrôle et la commande des différents actionneurs.

Enfin, l'interface homme-machine composée d'un écran LCD 20×4, de LEDs de signalisation et d'un buzzer permet la supervision locale et l'affichage des états du système.

Les principaux flux présents dans le système sont :

Flux d'énergie

Panneau photovoltaïque → MOSFET de charge → Batterie → MOSFET de décharge → Charge.

Flux d'information

Capteurs → Arduino Mega 2560 → Actionneurs et Interface utilisateur.

Flux hydraulique

Réservoir d'eau → Pompe → Système de pulvérisation → Surface du panneau photovoltaïque.

III.4.2 Diagramme de blocs

Le diagramme de blocs (Figure 3.4) présente l'organisation matérielle détaillée du système ainsi que les interconnexions entre les différents composants électroniques.

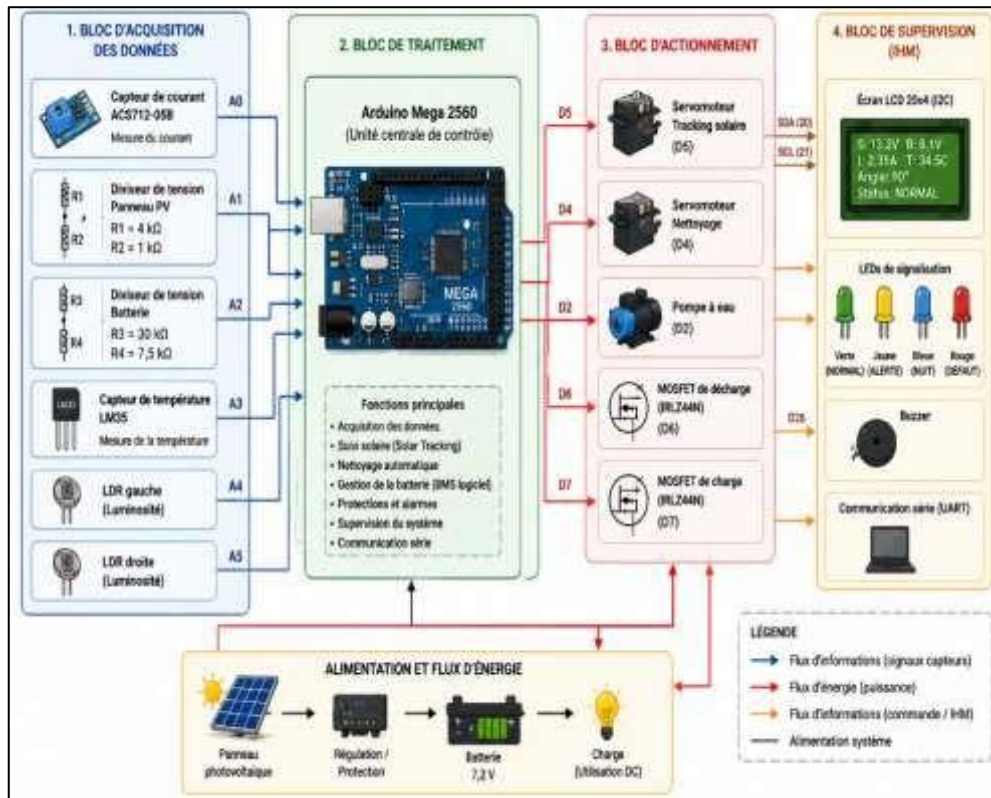


Figure 3. 4 : Le diagramme de blocs du système.

L'architecture est organisée autour de quatre blocs principaux :

Bloc d'acquisition des données

Ce bloc regroupe l'ensemble des capteurs utilisés :

Tableau 3. 1 : Affectation des broches analogiques de l'Arduino Mega pour le bloc d'acquisition

Composant	Broche Arduino
ACS712	A0
Diviseur de tension panneau	A1
Diviseur de tension batterie	A2
LM35	A3
LDR gauche	A4
LDR droite	A5

Ces capteurs fournissent les informations nécessaires au calcul des paramètres électriques et environnementaux du système.

Bloc de traitement

L'Arduino Mega 2560 constitue le cœur du système. Il exécute :

- Les algorithmes de suivi solaire ;
- Les fonctions du BMS logiciel ;
- Le système de nettoyage automatique ;
- La supervision locale.

Bloc d'actionnement

Tableau 3. 2 : Affectation des broches numériques de l'Arduino Mega pour le bloc d'actionnement.

Actionneur	Broche Arduino
Servo Tracking	D5
Servo Nettoyage	D4
Pompe à eau	D2
MOSFET_DISCHARGE	D6
MOSFET_CHARGE	D7

Ce bloc transforme les décisions logiques en actions physiques.

Bloc de supervision

Tableau 3. 3 : Affectation des broches de l'Arduino Mega pour le bloc de supervision (IHM).

Équipement	Broche Arduino
LCD I2C SDA	20
LCD I2C SCL	21

LED Verte	22
LED Jaune	23
LED Bleue	24
LED Rouge	25
Buzzer	26

L'ensemble permet d'informer l'utilisateur sur l'état instantané du système.

III.4.3 Organigramme de fonctionnement

L'organigramme de fonctionnement décrit la logique d'exécution du programme embarqué dans l'Arduino Mega 2560.

Étape 1 : Initialisation

Au démarrage :

- Configuration des entrées/sorties ;
- Initialisation du LCD ;
- Initialisation des servomoteurs ;
- Positionnement initial du panneau à 90° ;
- Attente de stabilisation.

Étape 2 : Acquisition et filtrage

Les mesures des capteurs sont acquises périodiquement. Afin d'améliorer leur précision, chaque grandeur est calculée à partir de la moyenne de dix échantillons successifs.

Les grandeurs obtenues sont :

- Tension du panneau ;
- Tension de la batterie ;
- Courant ;
- Température ;

- Luminosité gauche ;
- Luminosité droite.

Étape 3 : Gestion des protections

Le système vérifie successivement :

- Surcharge de batterie ($V_{bat} \geq 9,2 \text{ V}$) ;
- Décharge profonde ($V_{bat} \leq 6,8 \text{ V}$) ;
- Surintensité ($I > 5 \text{ A}$) ;
- Court-circuit ($I > 8 \text{ A}$) ;
- Surchauffe ($T > 50 \text{ °C}$).

En cas d'anomalie, les MOSFETs concernés sont immédiatement désactivés afin de protéger la batterie et les composants électroniques.

Étape 4 : Détection du mode jour/nuit

Le niveau moyen d'éclairement est calculé à partir des deux LDR.

- Si la luminosité est insuffisante → Mode Nuit.
- Sinon → Mode Jour.

Étape 5 : Suivi solaire

En mode jour, la différence entre les deux LDR est calculée :

$$\Delta = LDR_{gauche} - LDR_{droite} \quad (5)$$

Si :

$$|\Delta| > 50$$

le servomoteur de tracking est déplacé vers la zone la plus éclairée.

Étape 6 : Nettoyage automatique

Lors de la transition entre le mode nuit et le mode jour :

- Activation de la pompe pendant 1,5 s ;
- Balayage du panneau par le servomoteur de nettoyage ;
- Arrêt de la pompe ;
- Retour au mode normal.

Cette opération n'est exécutée qu'une seule fois par jour.

Étape 7 : Supervision

Le système met à jour :

- L'écran LCD ;
- Les LEDs de signalisation ;
- Le buzzer en cas d'alarme ;
- Le moniteur série pour le débogage.

Étape 8 : Retour à la boucle principale

Après l'exécution de toutes les tâches, le programme revient au début de la boucle principale afin d'assurer une surveillance continue et en temps réel du système.

III.5 Conception logicielle

La conception logicielle décrit l'organisation, l'optimisation et la logique algorithmique du micrologiciel (firmware) implanté sur le microcontrôleur ATmega2560. Le programme a été développé en langage C/C++ sous l'environnement Arduino IDE. Il assure l'acquisition des données provenant des différents capteurs, leur traitement en temps réel, la prise de décision selon les algorithmes implémentés ainsi que la commande des actionneurs et la supervision du système.

L'architecture logicielle a été conçue selon une approche modulaire afin de faciliter la maintenance, les phases de test et les évolutions futures du système. Chaque fonction principale (acquisition, traitement, protection, tracking, nettoyage et supervision) est réalisée par un ensemble de routines spécialisées interagissant au sein d'une boucle principale d'exécution.

III.5.1 Structure générale du programme

Le programme suit l'architecture classique dite « **Super Loop** », basée sur une boucle principale infinie sans système d'exploitation temps réel (RTOS). Cette approche garantit un comportement déterministe et une mise en œuvre simple adaptée aux systèmes embarqués de faible complexité.

Le logiciel est organisé autour des deux fonctions fondamentales imposées par l'environnement Arduino :

a) Fonction **setup()**

La fonction `setup()` est exécutée une seule fois lors de la mise sous tension ou après une réinitialisation du microcontrôleur.

Elle assure :

- La configuration des entrées et sorties (`pinMode`) ;
- L'initialisation de l'écran LCD I2C ;
- L'initialisation des servomoteurs ;
- L'initialisation de la liaison série ;
- L'initialisation des variables système ;
- Le positionnement initial des actionneurs ;
- L'affichage d'un message de démarrage.

Une temporisation de 2 secondes est appliquée afin de stabiliser les alimentations et les références analogiques avant le démarrage des acquisitions.

b) Fonction **loop()**

La fonction `loop()` constitue le cœur du programme. Elle est exécutée continuellement tant que le système reste alimenté.

À chaque cycle d'exécution, les opérations suivantes sont réalisées :

1. Acquisition des mesures des capteurs.

2. Filtrage et conversion des données.
3. Vérification des conditions de sécurité (BMS).
4. Gestion du suivi solaire.
5. Gestion du nettoyage automatique.
6. Mise à jour de l'affichage LCD.
7. Gestion des alarmes visuelles et sonores.
8. Transmission des données vers le port série.

La période d'exécution est fixée à environ : $[T=200,ms]$

soit une fréquence de fonctionnement proche de : $[f=5,Hz]$

Le micrologiciel utilise principalement les bibliothèques suivantes :

- **Wire.h** : gestion du protocole I2C ;
- **LiquidCrystal_I2C.h** : contrôle de l'écran LCD ;
- **Servo.h** : génération des signaux PWM des servomoteurs.

L'occupation mémoire du programme est d'environ 18 Ko, soit moins de 10 % de la mémoire Flash disponible sur l'ATmega2560, laissant une marge importante pour de futures améliorations.

III.5.2 Acquisition des données

L'acquisition constitue la première étape du traitement logiciel. Les mesures sont collectées à partir des six entrées analogiques du système :

Tableau 3. 4 : Correspondance des entrées analogiques de l'Arduino Mega et des grandeurs physiques acquises.

Entrée	Grandeur mesurée
A0	Courant (ACS712)
A1	Tension panneau
A2	Tension batterie

A3	Température LM35
A4	LDR gauche
A5	LDR droite

Afin de réduire les perturbations dues au bruit électronique, aux variations instantanées et aux commutations des MOSFETs, une technique de suréchantillonnage est utilisée.

La fonction readAverage() réalise dix acquisitions successives espacées de 3 ms puis calcule leur moyenne

Cette méthode améliore significativement la stabilité des mesures et la fiabilité des décisions prises par le système.

Conversion des grandeurs physiques

Les mesures numériques sont converties en grandeurs physiques selon les équations suivantes :

Tableau 3. 5 : Équations de conversion des mesures brutes (ADC) en grandeurs physiques.

Grandeur	Équation
Tension panneau	$(V_{pv}=V_{ADC1}\times \frac{R_1+R_2}{R_2})$
Tension batterie	$(V_{bat}=V_{ADC2}\times \frac{R_3+R_4}{R_4})$
Courant ACS712	$(I=\frac{\left(\frac{ADC\times 5000}{1023}\right)-2500}{185})$
Température LM35	$(T=\left(\frac{ADC\times 5}{1023}\right)\times 100)$

avec :

- $(R_1 = 4k\Omega)$
- $(R_2 = 1k\Omega)$
- $(R_3 = 30k\Omega)$

- $(R_4 = 7.5k\Omega)$

Les valeurs des LDR sont exploitées directement sous forme numérique sur une échelle comprise entre 0 et 1023.

III.5.3 Traitement des données

Après leur acquisition, les données sont analysées afin de déterminer l'état de fonctionnement du système et d'assurer sa protection.

a) Système BMS logiciel

Le Battery Management System (BMS) implémenté par logiciel constitue le noyau décisionnel du système. Il surveille continuellement la tension de la batterie, le courant et la température.

Le tableau suivant résume les principales conditions de sécurité :

Tableau 3. 6 : Récapitulatif des protections logicielles (seuils et actions correctives).

Condition	Seuil	Action
Surcharge	$(V_{bat} \geq 9.2V)$	Désactivation de la charge
Décharge profonde	$(V_{bat} \leq 6.8V)$	Désactivation de la décharge
Surintensité	$(I > 5A)$	Coupure de la charge
Court-circuit	$(I > 8A)$	Coupure totale
Surchauffe	$(T > 50^{\circ}C)$	Arrêt de sécurité

Les variables logiques chargeEnable et dischargeEnable déterminent directement l'état des MOSFETs.

Les défauts critiques tels que les courts-circuits ou les surchauffes possèdent la priorité absolue et provoquent l'isolement immédiat de la batterie.

b) Algorithme de suivi solaire

Le suivi solaire repose sur la comparaison des niveaux lumineux mesurés par les deux capteurs LDR. le programme modifie progressivement la position du servomoteur de tracking.

L'introduction d'une bande morte de ± 50 permet d'éviter les oscillations permanentes du moteur autour de la position d'équilibre.

L'angle du servomoteur est limité entre : 10° et 170° afin d'éviter les butées mécaniques.

c) Détection du mode nuit

Le niveau global d'éclairement est déterminé par :

$$[LightLevel = \frac{LDR_{\{gauche\}} + LDR_{\{droite\}}}{2}]$$

Si : $[LightLevel < 80]$

le système passe en mode nuit, positionne le panneau à l'Est et prépare le cycle de nettoyage du lendemain.

III.5.4 Commande des actionneurs

Les décisions logiques sont converties en actions physiques sur les différents actionneurs.

Commande des MOSFETs

Les MOSFETs sont pilotés en mode tout-ou-rien :

```
digitalWrite(MOSFET_CHARGE, chargeEnable);
```

```
digitalWrite(MOSFET_DISCHARGE, dischargeEnable);
```

Un niveau HIGH active le transistor tandis qu'un niveau LOW bloque totalement le passage du courant.

Commande du servomoteur de tracking

Le servomoteur est commandé par PWM via la bibliothèque Servo.

Sa position est ajustée progressivement afin d'assurer un mouvement fluide et d'éviter les contraintes mécaniques excessives.

Commande du système de nettoyage

Le nettoyage automatique est déclenché lors du passage du mode nuit au mode jour.

La séquence comprend :

1. Activation de la pompe à eau pendant 1,5 seconde.
2. Mouvement de balayage du servomoteur.
3. Retour à la position initiale.
4. Désactivation de la pompe.

Pendant cette phase, le suivi solaire est temporairement suspendu grâce à la variable logique isCleaning.

Cette stratégie évite les conflits entre les différents actionneurs.

III.5.5 Gestion des alarmes et des erreurs

La supervision des défauts est assurée par la fonction updateIndicators() qui pilote les LEDs et le buzzer.

Signalisation visuelle

Tableau 3. 7 : Codage couleur des LEDs en fonction du statut du système Smart Solar.

État	Indicateur
NORMAL	LED verte
LOW VOLT	LED jaune
CLEANING	LED jaune
NIGHT MODE	LED bleue
BAT FULL	LED rouge
OVER CURRENT	LED rouge
SHORT CIRCUIT	LED rouge
HIGH TEMP	LED rouge

Signalisation sonore

Le buzzer est réservé aux défauts critiques :

- Court-circuit ;
- Surchauffe.

Il émet un signal intermittent de : $[f=2.5, \text{kHz}]$

avec une alternance de 400 ms ON / 400 ms OFF.

Cette gestion est réalisée de manière non bloquante grâce à la fonction millis().

Tolérance aux erreurs

Afin d'améliorer la robustesse du système, plusieurs mécanismes ont été intégrés :

- Filtrage numérique des mesures ;
- Rejet des valeurs aberrantes ;
- Maintien des protections même en cas de défaut d'affichage ;
- Priorité absolue aux sécurités électriques.

Ainsi, lorsqu'un défaut critique est détecté, les MOSFETs restent désactivés tant que la condition dangereuse persiste, garantissant une protection efficace de la batterie et des composants électroniques.

L'architecture logicielle développée permet d'assurer l'acquisition, le traitement et la supervision des données en temps réel tout en garantissant la sécurité du système photovoltaïque. Grâce à sa structure modulaire et à ses mécanismes de protection intégrés, le programme offre une solution fiable, évolutive et adaptée aux exigences d'un système Smart Solar autonome.

III.6 Système de Protection de la Batterie (BMS)

Le système de gestion de batterie (**Battery Management System – BMS**) est entièrement implémenté par voie logicielle au sein du microcontrôleur ATmega2560 de la carte Arduino Mega 2560. Son rôle principal est d'assurer la sécurité électrique du système photovoltaïque en surveillant en temps réel la tension de la batterie, le courant circulant dans le circuit ainsi que la température de fonctionnement [48].

Contrairement aux BMS matériels dédiés, la stratégie adoptée dans ce projet repose sur l'exploitation des mesures fournies par les capteurs de tension, le capteur de courant ACS712 et le capteur de température LM35. Les décisions de protection sont ensuite appliquées par l'intermédiaire de deux MOSFETs IRLZ44N commandant respectivement les phases de charge et de décharge.

Le BMS développé assure principalement :

- La protection contre la surcharge ;
- La protection contre la décharge profonde ;
- La protection contre les surintensités ;
- La détection des courts-circuits ;
- La protection thermique.

Les algorithmes de protection sont exécutés à chaque cycle de fonctionnement (200 ms), garantissant une réaction rapide aux situations critiques.

III.6.1 Protection contre la surcharge

La surcharge se produit lorsque la batterie continue à recevoir de l'énergie après avoir atteint sa tension maximale admissible. Ce phénomène peut provoquer un échauffement excessif, une dégradation accélérée des cellules et une réduction importante de la durée de vie de l'accumulateur.

Dans le système développé, la tension de la batterie est mesurée en permanence via le pont diviseur connecté à l'entrée analogique A2.

Lorsque la condition suivante est vérifiée :

$$[V_{\text{bat}} \geq 9.2, V]$$

le système considère que la batterie est complètement chargée.

Le MOSFET de charge est alors immédiatement désactivé afin d'interrompre le transfert d'énergie provenant du panneau photovoltaïque :

$$[\text{MOSFET}_{\text{CHARGE}} = \text{OFF}]$$

L'état du système est mis à jour avec le statut :

{BAT FULL}

et la LED rouge est activée pour informer l'utilisateur.

Afin d'éviter des commutations répétitives autour du seuil de coupure, une légère hystérésis logicielle est appliquée. La recharge n'est réautorisée qu'après une diminution suffisante de la tension de la batterie.

III.6.2 Protection contre la décharge profonde

La décharge profonde constitue l'un des phénomènes les plus nuisibles pour les batteries rechargeables. Une tension trop faible peut provoquer une dégradation irréversible des cellules et une perte importante de capacité.

Pour prévenir ce risque, le système surveille continuellement la tension de la batterie.

Lorsque la tension devient inférieure ou égale à :

$$[V_{\text{bat}} \leq 6.8, V]$$

la batterie est considérée en état critique.

Le MOSFET de décharge est alors désactivé :

$$[\text{MOSFET}_{\text{DISCHARGE}} = \text{OFF}]$$

ce qui entraîne la déconnexion automatique de la charge alimentée par la batterie.

Le système affiche alors le statut :

{LOW VOLT}

et active la LED jaune afin de signaler cette situation.

La recharge de la batterie reste cependant autorisée afin de permettre la récupération normale de l'énergie produite par le panneau photovoltaïque.

Une fois la tension revenue à un niveau acceptable, le fonctionnement normal est automatiquement rétabli.

III.6.3 Détection de court-circuit et de surintensité

La surveillance du courant est assurée par le capteur à effet Hall ACS712-05B installé sur la ligne principale du système. Cette mesure permet d'identifier rapidement les défauts électriques susceptibles d'endommager les composants de puissance.

a) Protection contre les surintensités

Lorsque le courant dépasse le seuil :

$$[I > 5, A]$$

le système détecte une surcharge électrique anormale.

Le MOSFET de charge est alors désactivé afin de limiter le courant circulant dans le circuit.

L'état du système devient :

{OVER CURRENT}

Cette protection permet d'éviter les échauffements excessifs et les contraintes électriques sur les composants.

b) Détection de court-circuit

Le court-circuit représente le défaut le plus critique du système. Il se traduit par une augmentation brutale du courant pouvant entraîner la destruction des composants électroniques et de la batterie.

Lorsque le courant mesuré dépasse :

$[I > 8, A]$

le logiciel considère qu'un court-circuit est présent.

Une procédure d'urgence est alors exécutée :

[MOSFET_{CHARGE}=OFF]

[MOSFET_{DISCHARGE}=OFF]

La batterie est ainsi totalement isolée du reste du système.

Le statut affiché devient :

{SHORT CIRCUIT}

La LED rouge est activée et le buzzer émet une alarme sonore intermittente afin d'avertir l'utilisateur.

Le temps de réaction du système est inférieur à une période de fonctionnement de la boucle principale (200 ms), ce qui garantit une protection rapide et efficace contre les défauts électriques majeurs.

Par mesure de sécurité, aucune reprise automatique n'est effectuée tant que la condition de court-circuit persiste.

III.6.4 Protection thermique

La température du système est surveillée grâce au capteur LM35 installé à proximité de la batterie ou des composants de puissance.

Lorsque la température dépasse le seuil critique :

$$[T > 50^{\circ}\text{C}]$$

le système entre en mode de protection thermique.

Les circuits de charge et de décharge sont immédiatement désactivés afin d'éviter tout risque de détérioration des composants ou de la batterie.

L'état du système devient :

{HIGH TEMP}

et une alarme sonore est déclenchée.

Cette protection contribue à améliorer la fiabilité et la sécurité globale de l'installation photovoltaïque.

Conclusion

Le système BMS développé constitue une fonction essentielle du système Smart Solar. Grâce à la surveillance continue de la tension, du courant et de la température, il protège efficacement la batterie contre les principaux défauts électriques tels que la surcharge, la décharge profonde, les surintensités, les courts-circuits et les surchauffes. L'utilisation

conjointe des capteurs et des MOSFETs de puissance permet d'assurer une gestion énergétique sûre tout en prolongeant la durée de vie de la batterie et des composants électroniques.

III.7 Système de suivi solaire (Solar Tracking)

Le suivi solaire actif constitue l'un des sous-systèmes essentiels du projet Smart Solar. Il permet d'améliorer significativement le rendement énergétique du panneau photovoltaïque en maintenant sa surface perpendiculaire aux rayons incidents du soleil. Contrairement aux systèmes fixes, cette approche repose sur une orientation dynamique du panneau selon la trajectoire apparente du soleil dans l'axe azimutal Est–Ouest [49].

Le système fonctionne en boucle fermée à l'aide de deux photorésistances (LDR) placées de part et d'autre du panneau. L'algorithme embarqué compare en temps réel les niveaux d'éclairement afin de générer une erreur d'alignement, utilisée pour corriger progressivement la position du panneau via un servomoteur.

III.7.1 Principe de fonctionnement

Le principe repose sur une détection différentielle de la lumière basée sur deux capteurs LDR :

- LDR gauche (Est)
- LDR droite (Ouest)

Les deux capteurs sont séparés par une cloison opaque verticale (baffle d'ombre) permettant de créer une différence d'éclairement lorsque le panneau n'est pas correctement aligné.

Lorsque le panneau est parfaitement orienté vers le soleil, l'ombre est symétrique et les deux LDR reçoivent la même intensité lumineuse :

$$I_{Gauche} = I_{Droite}$$

En cas de désalignement, une différence apparaît immédiatement. La LDR la plus exposée présente une résistance plus faible, ce qui entraîne une tension plus élevée à sa sortie.

L'erreur d'orientation est définie par :

Le système agit ensuite pour réduire cette erreur en ajustant l'angle du panneau.

Le suivi est actif uniquement en mode jour. La nuit, le panneau est automatiquement positionné à un angle de repos ($\approx 10^\circ$ Est) afin de réduire la consommation énergétique et de préparer le cycle de nettoyage.

III.7.2 Algorithme basé sur les LDR

L'algorithme est exécuté de manière cyclique dans la boucle principale du programme avec une période d'environ 200 ms.

a) Acquisition et filtrage des données

Les deux LDR sont connectées aux entrées analogiques A4 et A5. Afin de réduire les bruits de mesure, un filtrage par moyenne glissante (10 échantillons) est appliqué.

Les valeurs sont ensuite utilisées pour calculer un niveau global de luminosité :

$$LightLevel = \frac{LDR_{gauche} + LDR_{droite}}{2} \quad (6)$$

b) Détection du mode jour/nuit

Un seuil de luminosité global est défini :

- Si $LightLevel < 80 \rightarrow$ **Mode Nuit**
- Sinon $\rightarrow$ **Mode Jour**

En mode nuit, le système :

- Positionne le panneau à 10°
- Active un indicateur d'état NIGHT MODE
- Mémoire la transition via un flag (wasNight)

Lors du passage nuit $\rightarrow$ jour, le système peut déclencher automatiquement le cycle de nettoyage.

c) Ajustement différentiel (boucle de contrôle)

En mode jour et hors phase de nettoyage, l'erreur différentielle est calculée :

$$diff = LDR_{gauche} - LDR_{droite}$$

Une bande morte est introduite pour éviter les oscillations :

- Si $|diff| \leq 50 \rightarrow$ aucune action
- Si $|diff| > 50 \rightarrow$ correction de l'orientation

L'algorithme applique alors un ajustement incrémental :

```
if (diff>0 && servoPos<170) servoPos++;  
if (diff<0 && servoPos>10) servoPos--;  
tracker.write(servoPos);
```

Cette approche garantit :

- Une stabilité du système
- Une absence d'oscillations mécaniques
- Une correction progressive et fluide

La plage angulaire est limitée entre **10° et 170°** afin de protéger le mécanisme contre les contraintes mécaniques.

III.7.3 Commande du servomoteur

Le positionnement du panneau est assuré par un servomoteur MG90S commandé par la broche numérique 5 de l'Arduino Mega 2560.

Le contrôle repose sur un signal PWM standard de 50 Hz, généré via la bibliothèque Servo.h. La largeur d'impulsion varie typiquement entre 1 ms et 2 ms, correspondant respectivement aux angles extrêmes du servomoteur.

Initialisation :

```
tracker.attach(TRACK_SERVO_PIN);  
tracker.write(servoPos); // position initiale 90°
```

Mise à jour en fonctionnement :

La variable servoPos est ajustée dynamiquement selon l'erreur de luminosité, puis envoyée au servomoteur sans délai bloquant :

```
tracker.write(servoPos);
```

Aspects énergétiques et performance

Le servomoteur ne consomme de l'énergie que lors des déplacements. En position stable, sa consommation est très faible (courant de maintien minimal). Sur une journée complète, les micro-ajustements sont limités, ce qui rend son impact énergétique négligeable par rapport à la production photovoltaïque.

Robustesse et limites

En cas de conditions météorologiques homogènes (nuages denses), les valeurs des deux LDR deviennent similaires, ce qui fige naturellement le système dans sa dernière position valide.

Cependant, une défaillance d'un capteur LDR peut entraîner un déséquilibre permanent du système. Une amélioration possible consiste à intégrer un module de détection de défauts (FDI) afin d'identifier automatiquement ce type d'erreur.

III.8 Système de nettoyage automatique

L'accumulation de poussière, de sable et de particules environnementales sur la surface des panneaux photovoltaïques (phénomène de *soiling*) constitue l'une des principales causes de diminution du rendement énergétique. Dans les zones arides et semi-arides, les pertes de production peuvent atteindre des valeurs significatives après plusieurs semaines d'exposition. Afin de préserver l'efficacité optique du panneau photovoltaïque et de limiter les

interventions de maintenance manuelle, le système Smart Solar intègre un mécanisme de nettoyage automatique intelligent.

Ce sous-système assure l'élimination périodique des dépôts présents sur la surface du panneau grâce à l'action combinée d'une mini-pompe à eau et d'un servomoteur commandés par la carte Arduino Mega 2560. Son fonctionnement est entièrement automatisé et ne nécessite aucune intervention de l'utilisateur.

III.8.1 Principe de fonctionnement

Le système de nettoyage repose sur l'action coordonnée de deux actionneurs :

- Une mini-pompe à eau alimentée sous 5 V et commandée par la broche numérique D2 ;
- Un servomoteur de nettoyage raccordé à la broche D4, entraînant un bras mécanique muni d'une raclette souple.

Le déclenchement du cycle est basé sur la transition entre le mode nuit et le mode jour. Durant la nuit, une variable logique (*wasNight*) mémorise l'état nocturne du système. Lorsque le niveau moyen de luminosité mesuré par les capteurs LDR dépasse le seuil de détection du jour, le programme identifie un lever de soleil et déclenche automatiquement une opération de nettoyage [50].

Cette stratégie présente plusieurs avantages :

- Nettoyage du panneau avant le début de la phase de production maximale ;
- Réduction des pertes énergétiques dues à l'encrassement ;
- Limitation de la consommation d'eau et d'énergie grâce à un seul cycle par jour ;
- Absence de déclenchements multiples lors des variations temporaires d'ensoleillement.

Afin d'éviter toute interférence avec le système de suivi solaire, une variable logique (*isCleaning*) est utilisée pour suspendre temporairement l'algorithme de tracking pendant l'exécution de la procédure de nettoyage.

III.8.2 Séquence de nettoyage

Le cycle de nettoyage est exécuté par la fonction **cleanPanel()** et se déroule selon quatre phases successives.

a) Initialisation de la procédure

Dès la détection du lever du soleil, le système active le mode nettoyage :

- Mise à jour du statut système (*CLEANING*) ;
- Allumage de la LED jaune ;
- Suspension temporaire du suivi solaire.

La variable logique :

$$isCleaning = true$$

Verrouille l'algorithme de tracking pendant toute la durée de l'opération.

b) Pulvérisation de l'eau

La mini-pompe est activée afin d'humidifier uniformément la surface du panneau photovoltaïque :

$$t_{pompe} = 1.5 \text{ s}$$

Cette étape facilite le décollage des particules de poussière et réduit les frottements mécaniques durant le balayage.

c) Balayage mécanique

Après l'arrêt de la pompe, le servomoteur effectue un mouvement de va-et-vient permettant à la raclette de parcourir l'ensemble de la surface active du panneau.

La course aller s'effectue entre :

$$20^\circ \rightarrow 160^\circ$$

par pas successifs de :

$$2^{\circ}$$

avec une temporisation de :

$$20 \text{ ms}$$

entre chaque déplacement.

La durée de la course aller est donnée par :

$$t_{\text{aller}} = \left(\frac{160^{\circ} - 20^{\circ}}{2^{\circ}} \right) \times 0.02 \text{ s} = 1.4 \text{ s} \quad (7)$$

Le mouvement retour suit la même dynamique temporelle, assurant ainsi un nettoyage complet de la surface.

d) Fin du cycle

À l'issue du balayage :

- La LED jaune est désactivée ;
- Le statut du système revient à son état normal ;
- Le suivi solaire est réactivé.

La variable :

$$isCleaning = false$$

autorise alors la reprise du fonctionnement normal du système.

La durée totale de la séquence est d'environ :

$$t_{\text{total}} \approx 4.5 \text{ s}$$

ce qui représente une interruption très faible par rapport à la durée quotidienne de fonctionnement du système photovoltaïque.

III.8.3 Commande du servomoteur de nettoyage

Le mécanisme de nettoyage est actionné par un servomoteur de type MG90S relié à la broche numérique D4 (*CLEAN_SERVO_PIN*) de l'Arduino Mega 2560.

La commande est réalisée à l'aide de la bibliothèque **Servo.h**, qui génère un signal PWM standard de fréquence :

$$f = 50 \text{ Hz}$$

correspondant à une période de :

$$T = 20 \text{ ms}$$

La largeur de l'impulsion varie typiquement entre 1 ms et 2 ms afin de couvrir la plage angulaire du servomoteur.

Pour éviter les contraintes mécaniques et les collisions avec le châssis, la plage de fonctionnement utile est limitée à :

$$20^\circ \leq \theta \leq 160^\circ$$

La vitesse angulaire moyenne du mécanisme est donnée par :

$$\omega = \frac{2^\circ}{0.02 \text{ s}} = 100^\circ/\text{s}$$

Cette valeur garantit un déplacement fluide de la raclette tout en restant compatible avec les caractéristiques mécaniques du servomoteur.

Le déclenchement unique du nettoyage est assuré par la condition logique :

```
if (lightLevel >= NIGHT_THRESHOLD && wasNight)
{cleanPanel();
  wasNight = false;}
```

Cette approche garantit qu'un seul cycle de nettoyage est exécuté après chaque lever du soleil.

Bilan énergétique et limites du système

La consommation énergétique du système de nettoyage demeure très faible. La pompe absorbe environ 200 mA sous 5 V tandis que le servomoteur consomme entre 150 mA et 250 mA uniquement durant les phases de déplacement. L'énergie totale nécessaire à un cycle

complet reste négligeable devant l'énergie supplémentaire récupérée grâce au maintien de la propreté du panneau.

Par ailleurs, le réservoir d'eau intégré permet plusieurs jours, voire plusieurs semaines d'autonomie selon les conditions d'utilisation.

Les principales limites du système sont :

- Dépendance à la disponibilité d'eau dans le réservoir ;
- Efficacité réduite contre les dépôts fortement incrustés ;
- Absence de capteur de niveau d'encrassement ;
- Usure progressive des éléments mécaniques.

Malgré ces limitations, le système de nettoyage automatique contribue efficacement au maintien des performances du panneau photovoltaïque et améliore l'autonomie globale du système Smart Solar.

III.9 Système de supervision

Le système de supervision constitue l'interface homme-machine (IHM) du prototype Smart Solar. Il permet à l'utilisateur de surveiller en temps réel l'état de fonctionnement du système, les paramètres électriques et environnementaux mesurés, ainsi que les éventuels défauts détectés par les algorithmes de protection. Afin d'assurer un diagnostic fiable, rapide et intuitif, trois moyens complémentaires de supervision ont été implémentés :

- Un affichage local sur écran LCD 20×4 ;
- Une signalisation visuelle par LEDs colorées ;
- Une alerte sonore par buzzer piézoélectrique.

Cette architecture de supervision permet de fournir simultanément des informations détaillées, des indications visuelles instantanées et des avertissements acoustiques pour les situations critiques.

III.9.1 Affichage local sur LCD

L’affichage principal des informations est assuré par un écran LCD 20×4 caractères équipé d’un module d’extension I2C basé sur le circuit PCF8574. Ce choix permet de réduire considérablement le nombre de connexions nécessaires avec la carte Arduino Mega 2560. La communication s’effectue uniquement à travers les lignes SDA (broche 20) et SCL (broche 21).

L’utilisation du bus I2C présente plusieurs avantages :

- Réduction du câblage ;
- Occupation minimale des broches du microcontrôleur ;
- Simplicité d’intégration ;
- Amélioration de la fiabilité matérielle.

Le rétroéclairage est maintenu actif en permanence afin d’assurer une bonne lisibilité dans différentes conditions d’éclairage.

Le contenu affiché est actualisé à chaque cycle d’exécution du programme (environ 200 ms). Les informations sont organisées comme indiqué dans le Tableau 3.8.

Tableau 3. 8 : Organisation de l’affichage LCD

Ligne	Informations affichées	Exemple
Ligne 0	Tension panneau et batterie	S:13.2V B:8.1V
Ligne 1	Courant et température	I:2.35A T:34.5C
Ligne 2	Position du panneau	Angle:90
Ligne 3	État du système	Status:NORMAL

Des espaces supplémentaires sont ajoutés à la fin des chaînes affichées afin d’effacer les caractères résiduels provenant des mises à jour précédentes. Cette technique garantit un affichage stable et sans artefacts visuels.

L’écran LCD constitue ainsi le principal moyen de supervision détaillée du système Smart Solar en fournissant une représentation instantanée de l’état énergétique, thermique et opérationnel du prototype.

III.9.2 Signalisation par LEDs

En complément de l’affichage textuel, le système dispose de quatre LEDs de signalisation permettant une identification rapide de l’état général du système sans nécessiter la lecture du LCD.

Les LEDs sont connectées aux broches numériques 22 à 25 de l’Arduino Mega et sont pilotées par la fonction logicielle `updateIndicators()`.

Chaque LED correspond à un état spécifique :

Tableau 3. 9 : Signification des LEDs de signalisation

Couleur	État du système
Verte	NORMAL
Jaune	LOW VOLT ou CLEANING
Bleue	NIGHT MODE
Rouge	BAT FULL, OVER CURRENT, SHORT CIRCUIT, HIGH TEMP

Le fonctionnement est basé sur un codage exclusif : une seule LED est active à la fois afin d’éviter toute ambiguïté d’interprétation.

Chaque LED est associée à une résistance série de 220 Ω afin de limiter le courant et de protéger les composants.

Cette signalisation visuelle permet à l’utilisateur d’identifier instantanément l’état du système, même à distance.

III.9.3 Alerte sonore par buzzer

Afin d’améliorer davantage la sécurité du système, un buzzer piézoélectrique est utilisé pour signaler les défauts critiques nécessitant une intervention rapide.

Le buzzer est connecté à la broche numérique 26 de l’Arduino Mega et n’est activé que dans les situations les plus dangereuses :

- Court-circuit (SHORT CIRCUIT) ;

- Surchauffe (HIGH TEMP).

Contrairement aux LEDs, le buzzer attire immédiatement l'attention de l'utilisateur même lorsqu'il ne se trouve pas à proximité visuelle du système.

Pour éviter toute perturbation du fonctionnement général, l'alarme est gérée de manière non bloquante à l'aide de la fonction `millis()`.

Le signal sonore est constitué d'une tonalité de :

$$f = 2.5 \text{ kHz}$$

avec une alternance périodique :

$$400 \text{ ms ON} / 400 \text{ ms OFF}$$

Même après la coupure des MOSFETs de puissance par le BMS, l'alarme sonore demeure active tant que la condition dangereuse persiste. Cette stratégie garantit que l'utilisateur est averti de manière continue jusqu'à la disparition du défaut.

III.9.4 Synthèse du système de supervision

Le Tableau 3.10 résume les différents moyens de supervision implémentés dans le système Smart Solar.

Tableau 3. 10 : Synthèse des moyens de supervision

Fonction	Équipement	Rôle
Affichage détaillé	LCD 20×4 I2C	Affichage des mesures et du statut
Signalisation rapide	LEDs colorées	Diagnostic visuel instantané
Alerte critique	Buzzer 2.5 kHz	Signalisation sonore des défauts graves
Débogage	Liaison série UART	Analyse et supervision en laboratoire

L'association de ces trois niveaux de supervision permet au système Smart Solar d'être totalement autonome du point de vue de l'information et du diagnostic. L'utilisateur peut suivre en permanence les paramètres électriques, identifier rapidement les états de

fonctionnement et être immédiatement averti en cas de situation critique, ce qui améliore considérablement la sécurité, la fiabilité et la facilité d'exploitation du prototype.

III.10 Simulation et Validation sous Proteus

Avant la réalisation physique du prototype Smart Solar, une phase complète de simulation numérique a été menée sous l'environnement **Proteus Design Suite** afin de vérifier le bon fonctionnement du système embarqué, valider les algorithmes développés et détecter d'éventuelles erreurs de conception matérielle ou logicielle. Cette étape constitue une démarche essentielle du cycle de développement, car elle permet de réduire les coûts de prototypage, d'améliorer la fiabilité du système et d'assurer la cohérence entre la partie matérielle et le programme embarqué.

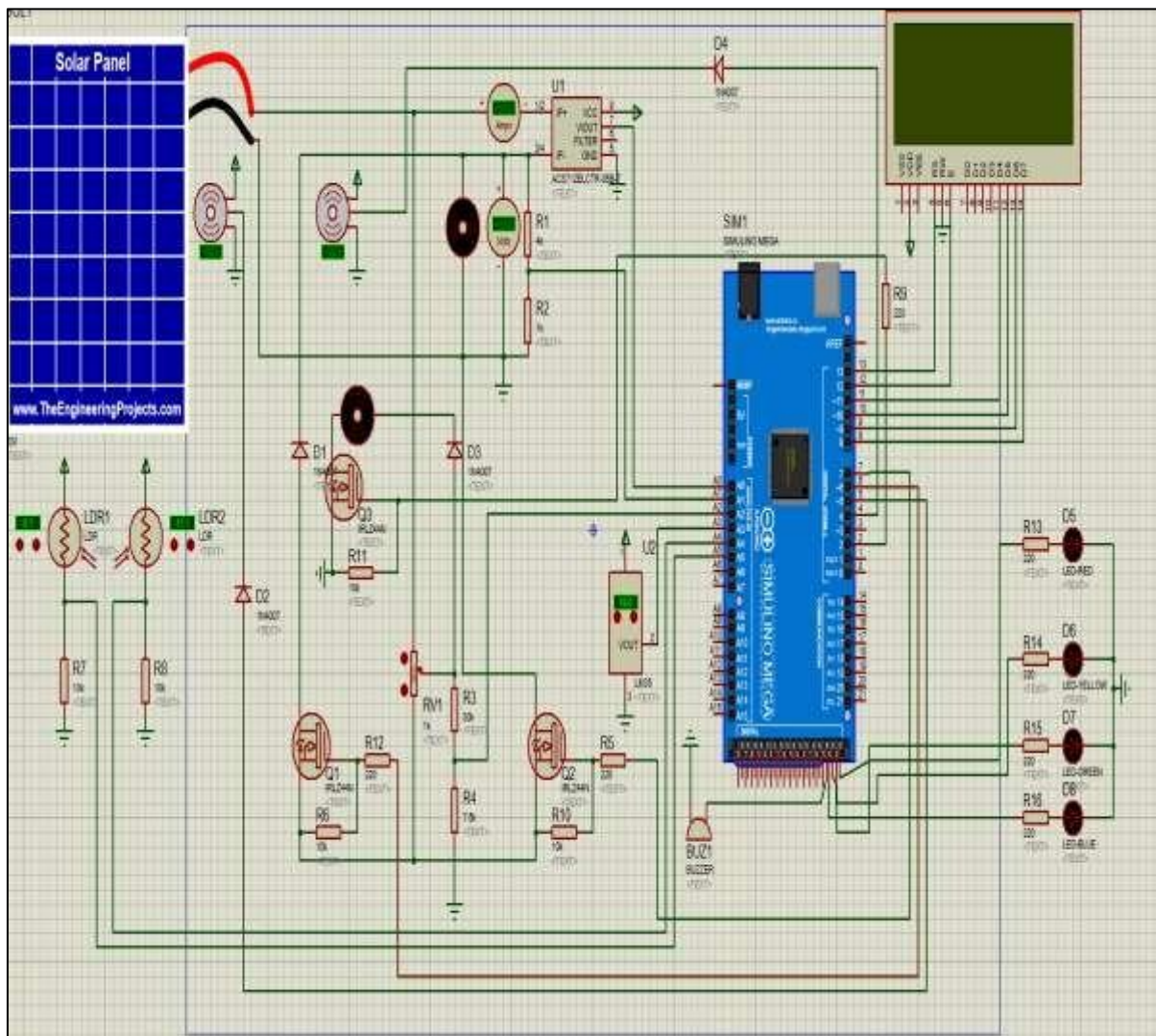


Figure 3. 5 : Schéma complet de simulation sous Proteus

La simulation a porté sur l'ensemble des sous-systèmes développés Comme illustré à la Figure 3.5 : suivi solaire automatique, gestion énergétique de la batterie (BMS), nettoyage automatique, système de supervision (LCD, LEDs et buzzer), ainsi que les mécanismes de protection contre les défauts électriques et thermiques.

III.10.1 Schéma de simulation

Le schéma de simulation a été élaboré sous Proteus en reproduisant fidèlement l'architecture matérielle du prototype réel. Tous les composants principaux ont été intégrés dans l'environnement virtuel afin d'obtenir un comportement aussi proche que possible des conditions réelles d'exploitation.

Architecture simulée

Le montage comprend :

- Une carte **Arduino Mega 2560** jouant le rôle d'unité centrale de contrôle ;
- Deux photorésistances (**LDR gauche et droite**) simulant les capteurs de luminosité du système de tracking solaire ;
- Un servomoteur de poursuite solaire commandé par la broche D5 ;
- Un servomoteur de nettoyage commandé par la broche D4 ;
- Une motopompe pilotée par relais ou transistor de puissance ;
- Un écran LCD I2C 20×4 assurant l'affichage local ;
- Un buzzer piézoélectrique de signalisation sonore ;
- Quatre LEDs d'état (verte, jaune, bleue et rouge) ;
- Des sources de tension variables simulant le panneau photovoltaïque et la batterie ;
- Des instruments virtuels (voltmètres, ampèremètres et oscilloscopes) destinés à l'analyse des signaux.

Le schéma de simulation permet ainsi de reproduire les interactions entre les différents sous-systèmes et d'observer leur comportement dynamique en temps réel.

Objectifs de la simulation

Les principaux objectifs étaient :

- Vérifier le fonctionnement correct du programme Arduino ;
- Tester la logique de prise de décision du système ;
- Contrôler les mouvements des servomoteurs ;
- Valider les seuils de protection de la batterie ;
- Vérifier les transitions Jour/Nuit ;
- Contrôler les scénarios de nettoyage automatique ;
- Observer les réactions aux défauts électriques simulés.

III.10.2 Intégration du programme Arduino

Après compilation du programme sous l'environnement **Arduino IDE**, un fichier exécutable au format **HEX** est généré.

Le processus d'intégration dans Proteus s'effectue selon les étapes suivantes :

1. Compilation du programme Arduino.
2. Génération automatique du fichier *.hex*.
3. Double-clic sur le composant Arduino Mega dans Proteus.
4. Chargement du fichier HEX dans le champ **Program File**.
5. Configuration de la fréquence d'horloge à **16 MHz**.
6. Lancement de la simulation.

L'ensemble du code embarqué développé pour le projet est exécuté directement par le microcontrôleur virtuel, garantissant une parfaite cohérence entre la simulation et le prototype réel.

Validation logicielle

Cette méthode permet de vérifier :

- Le fonctionnement de la boucle principale `loop()`;
- Les lectures analogiques des capteurs ;
- Les algorithmes de décision ;
- Les fonctions de sécurité ;
- Les routines de nettoyage ;

- Les mécanismes de supervision.

Ainsi, toute modification logicielle peut être testée immédiatement sans intervention sur le matériel réel.

III.10.3 Scénarios de test

Afin d'évaluer exhaustivement le comportement du système, plusieurs scénarios représentatifs des conditions réelles de fonctionnement ont été simulés.

a) Test du suivi solaire

Les valeurs des deux LDR ont été modifiées manuellement afin de reproduire le déplacement apparent du soleil.

Cas 1 : Soleil à gauche

$$LDR_{gauche} > LDR_{droite}$$

Résultat attendu :

- Rotation du servomoteur vers l'Est ;
- Augmentation progressive de l'angle ;
- Réduction de l'erreur lumineuse.

Cas 2 : Soleil à droite

$$LDR_{gauche} < LDR_{droite}$$

Résultat attendu :

- Rotation du panneau vers l'Ouest ;
- Diminution progressive de l'erreur ;
- Stabilisation lorsque les deux valeurs deviennent proches.

b) Test du mode nuit

Les deux LDR ont été forcées sous le seuil :

$$lightLevel < NIGHT_THRESHOLD$$

Résultats attendus :

- Passage du système en mode nuit ;
- Positionnement du panneau à 10°;
- Allumage de la LED bleue ;
- Affichage du message :

Status : NIGHT MODE

c) Test du nettoyage automatique

Une transition simulée Nuit → Jour a été provoquée.

Résultats attendus :

- Activation de la pompe pendant 1,5 s ;
- Allumage de la LED jaune ;
- Balayage complet du servomoteur de nettoyage ;
- Retour automatique au mode normal.

d) Test de batterie faible

La tension simulée de la batterie a été progressivement réduite.

Condition :

$$V_{bat} < 7.0V$$

Résultats attendus :

- Affichage :

LOW VOLT

- Allumage de la LED jaune ;
- Avertissement visuel de faible charge.

e) Test de surcharge et court-circuit

Le courant simulé mesuré par le capteur ACS712 a été augmenté artificiellement.

Condition :

$$I > 8A$$

Résultats attendus :

- Coupure des MOSFETs ;
- Affichage :

SHORT CIRCUIT

- Allumage de la LED rouge ;
- Déclenchement du buzzer intermittent.

f) Test de surchauffe

La température simulée a été augmentée au-delà du seuil critique :

$$T > 50^{\circ}C$$

Résultats attendus :

- Affichage :

HIGH TEMP

- Activation du buzzer ;
- Allumage de la LED rouge ;
- Maintien de l'état d'alarme jusqu'au retour à une température normale.

III.10.4 Résultats obtenus

Les simulations réalisées sous Proteus ont permis de valider l'ensemble des fonctionnalités prévues du prototype Smart Solar.

Résultats du suivi solaire

Le servomoteur a correctement suivi les variations d'éclairement simulées par les LDR.

L'erreur différentielle :

$$e = LDR_{gauche} - LDR_{droite}$$

converge progressivement vers zéro grâce à l'algorithme de poursuite.

Le panneau demeure stable lorsque :

$$|e| < 50$$

confirmant l'efficacité de la bande morte implémentée.

Résultats du nettoyage automatique

Le cycle de nettoyage s'est exécuté automatiquement lors de chaque transition matinée simulée.

Les durées observées correspondent aux valeurs théoriques :

- Arrosage : 1.5 s
- Balayage aller : 1.4 s
- Balayage retour : 1.4 s

Durée totale :

$$t_{total} \approx 4.3 - 4.5 \text{ s}$$

Le verrouillage du tracking pendant le nettoyage a été correctement vérifié.

Résultats de la supervision

Les informations affichées sur le LCD correspondent aux valeurs injectées dans le système.

Les LEDs ont signalé correctement chaque état :

État	LED
NORMAL	Verte

LOW VOLT	Jaune
CLEANING	Jaune
NIGHT MODE	Bleue
HIGH TEMP	Rouge
SHORT CIRCUIT	Rouge

Le buzzer s'est activé uniquement lors des défauts critiques conformément aux spécifications.

Résultats des protections

Les mécanismes de protection ont répondu instantanément :

- Détection de surcharge ;
- Détection de court-circuit ;
- Détection de surchauffe ;
- Gestion des seuils batterie.

Aucun comportement instable ni oscillation excessive n'a été observé pendant les essais.

Conclusion de la validation

La campagne de simulation réalisée sous Proteus confirme la validité fonctionnelle du prototype Smart Solar avant sa réalisation matérielle. Les algorithmes de suivi solaire, de nettoyage automatique, de gestion énergétique et de supervision ont tous présenté un comportement conforme aux spécifications établies. Les résultats obtenus démontrent la robustesse du système de contrôle développé et constituent une étape essentielle de validation avant l'implémentation expérimentale et les essais sur prototype réel.

III.11 Réalisation pratique du prototype

Après la phase de conception théorique, de simulation sous Proteus et de validation logicielle, une réalisation matérielle complète du système **Smart Solar** a été effectuée. Cette étape vise à concrétiser l'ensemble des fonctionnalités développées précédemment, notamment la gestion énergétique, le suivi solaire automatique, le nettoyage du panneau, ainsi que la

supervision locale. Le prototype final constitue une plateforme expérimentale permettant de vérifier les performances réelles du système dans des conditions proches d'une installation photovoltaïque autonome.

III.11.1 Assemblage matériel

La réalisation physique du prototype repose sur l'intégration de plusieurs sous-systèmes électroniques, mécaniques et énergétiques montés sur une structure unique.

a) Structure mécanique

Le panneau photovoltaïque est fixé sur un support mobile permettant sa rotation autour d'un axe horizontal. Ce mouvement est assuré par un servomoteur de poursuite solaire commandé par l'Arduino Mega 2560.

La structure mécanique comprend :

- Un châssis principal en matériau léger (PVC, aluminium ou impression 3D).
- Un axe de rotation reliant le panneau au servomoteur.
- Un support pour les capteurs LDR.
- Un réservoir d'eau destiné au nettoyage automatique.
- Un bras mobile équipé d'une raclette actionnée par le servomoteur de nettoyage.

L'ensemble est conçu pour garantir une bonne rigidité mécanique tout en limitant le poids supporté par les actionneurs.

b) Partie électronique

La carte **Arduino Mega 2560** constitue l'unité centrale de commande. Elle assure simultanément :

- L'acquisition des données des capteurs ;
- L'exécution des algorithmes de suivi solaire ;
- La gestion du système de nettoyage ;
- La supervision du système ;
- La protection de la batterie.

III.11.2 Câblage des composants

Le câblage a été réalisé conformément au schéma électrique validé sous Proteus. Une attention particulière a été portée à la séparation des circuits de puissance et de commande afin de limiter les perturbations électromagnétiques.

Comme illustré à la Figure 3.6

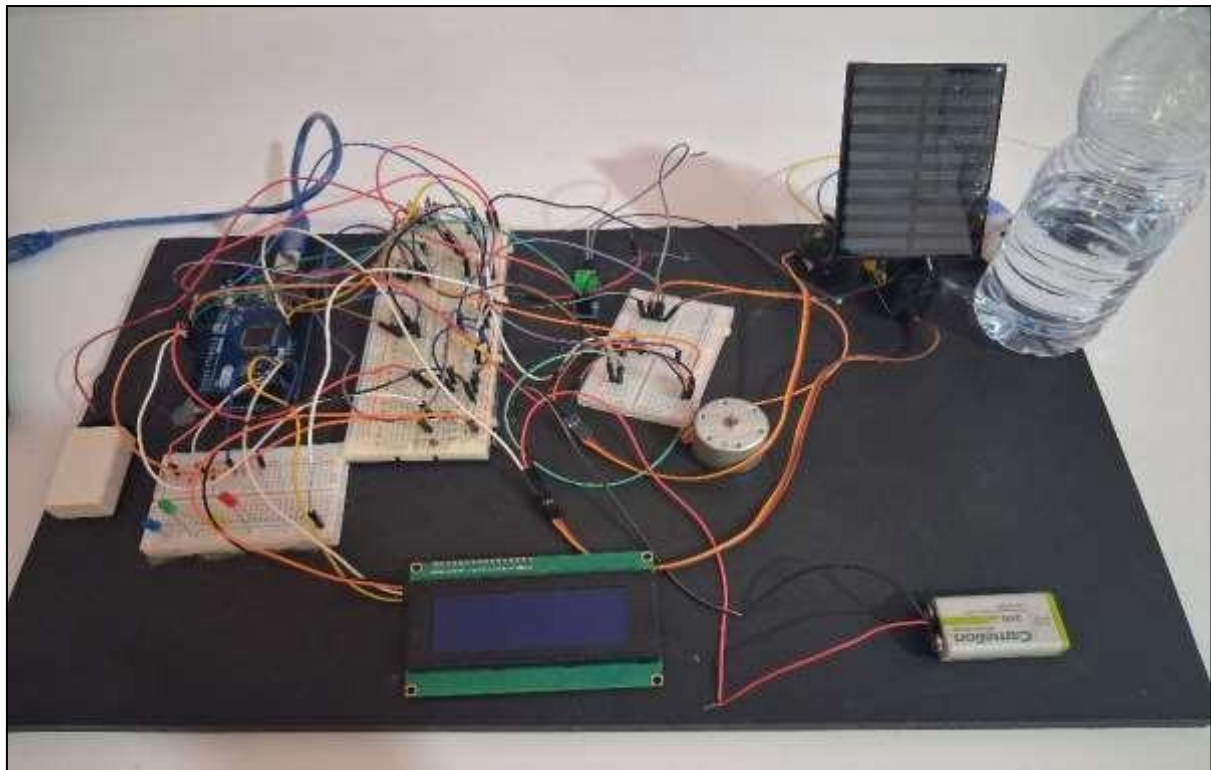


Figure 3. 6 : Réalisation pratique du prototype.

Réseau de mesure des tensions

Les tensions du panneau et de la batterie sont adaptées aux entrées analogiques de l'Arduino grâce à des ponts diviseurs résistifs.

Pour la batterie :

- $R_1 = 30\text{ k}\Omega$
- $R_2 = 7.5\text{ k}\Omega$

La tension appliquée à l'entrée analogique est :

$$V_{A2} = V_{Batt} \times \frac{1}{30 + 7.5}$$

Pour le panneau photovoltaïque :

- $R_1 = 4 \text{ k}\Omega$
- $R_2 = 1 \text{ k}\Omega$

$$V_{A1} = V_{panel} \times \frac{1}{4 + 1}$$

Ces diviseurs garantissent que les tensions mesurées restent inférieures à la limite admissible de 5 V des entrées analogiques.

Alimentation

L'alimentation est répartie en plusieurs niveaux :

- 5 V pour l'Arduino.
- 5 V pour le LCD, les LEDs et les capteurs.
- 5 V pour la pompe.
- 5 – 6 V pour les servomoteurs.
- Batterie rechargeable pour le stockage énergétique.

Toutes les masses (GND) sont reliées en commun afin d'assurer une référence électrique unique et un fonctionnement stable du système.

III.11.3 Intégration du système

Une fois les différents modules assemblés et testés individuellement, l'intégration complète du prototype a été réalisée.

Intégration logicielle

Le programme principal regroupe :

- Le système de gestion de batterie (BMS) ;
- Le suivi solaire automatique ;
- Le nettoyage automatique ;

- Le système de supervision ;
- Les mécanismes de protection.

La boucle principale (*loop()*) exécute périodiquement :

1. Lecture des capteurs ;
2. Calcul des grandeurs physiques ;
3. Diagnostic des défauts ;
4. Mise à jour du tracking ;
5. Gestion du nettoyage ;
6. Actualisation de l’affichage ;
7. Mise à jour des indicateurs lumineux et sonores.

Synchronisation des sous-systèmes

Pour éviter tout conflit :

- Le tracking est désactivé pendant le nettoyage.
- Le nettoyage n’est exécuté qu’une seule fois après chaque nuit.
- Les protections électriques restent prioritaires sur toutes les autres fonctions.
- Les alarmes critiques peuvent interrompre certaines opérations non essentielles.

Cette architecture garantit une exécution robuste et déterministe du système.

III.11.4 Prototype final réalisé

Le prototype final obtenu représente une station photovoltaïque intelligente miniature intégrant l’ensemble des fonctionnalités prévues dans le cahier des charges.

Fonctionnalités validées

Suivi automatique de la trajectoire solaire

Orientation dynamique du panneau entre 10° et 170°

Détection automatique du jour et de la nuit

Nettoyage automatique au lever du soleil

Surveillance de la tension du panneau

Surveillance de la tension batterie

Mesure du courant de charge

Surveillance de la température

Détection de surcharge et de court-circuit

Protection automatique par MOSFET

Affichage temps réel sur LCD

Signalisation par LEDs

Alerte sonore par buzzer

Évaluation globale

Les essais réalisés ont démontré que le prototype fonctionne de manière stable et autonome. Le système est capable d'assurer simultanément la production d'énergie, son stockage, la protection des composants, le suivi solaire intelligent et la maintenance automatique du panneau photovoltaïque.

L'intégration de plusieurs fonctions avancées au sein d'une unique plateforme embarquée basée sur Arduino Mega 2560 permet d'obtenir une solution pédagogique et expérimentale complète. Le prototype constitue ainsi une démonstration concrète d'un système photovoltaïque intelligent à faible coût, capable d'améliorer le rendement énergétique tout en réduisant les besoins d'intervention humaine.

III.12 Tests expérimentaux et interprétation des résultats

Après la phase de réalisation matérielle et d'intégration complète du prototype Smart Solar, une campagne de tests expérimentaux a été menée afin de valider les performances du

système dans des conditions réelles de fonctionnement. Cette étape constitue la phase finale de vérification du projet puisqu'elle permet de confronter les résultats obtenus sur le prototype physique aux prédictions issues de la simulation sous Proteus et aux spécifications définies dans le cahier des charges.

Les essais ont porté sur l'ensemble des sous-systèmes développés : le suivi solaire automatique, le système de nettoyage, les protections du Battery Management System (BMS), le système de supervision ainsi que l'enregistrement des données. Les résultats obtenus ont ensuite été analysés afin d'évaluer la fiabilité, la précision et l'efficacité globale du prototype.

III.12.1 Conditions et protocole de test

Les expérimentations ont été réalisées en extérieur durant plusieurs journées d'ensoleillement stable. Le panneau photovoltaïque a été installé sur un support orienté vers le sud afin de permettre un suivi optimal de la trajectoire solaire.

L'instrumentation utilisée comprend :

- Un multimètre numérique de précision pour la vérification des tensions et courants.
- Un thermomètre infrarouge pour le contrôle thermique des composants.
- Un ordinateur connecté au port série de l'Arduino Mega pour l'acquisition des données.
- Un luxmètre pour l'évaluation de l'éclairement incident.
- Le système d'enregistrement sur carte SD intégré au prototype.

Afin de réduire l'influence des erreurs aléatoires, chaque test a été répété trois fois et les résultats présentés correspondent aux valeurs moyennes obtenues.

III.12.2 Validation des mesures électriques et thermiques

a) Mesure de la tension du panneau solaire

Les mesures fournies par l'Arduino ont été comparées aux valeurs relevées par un multimètre de référence.

Tableau 3. 11 : Comparaison entre la tension réelle (multimètre) et la tension mesurée par l'Arduino (panneau solaire)

Tension réelle (V)	Tension affichée (V)	Erreur (%)
12.0	11.9	0.83
13.5	13.4	0.74
15.0	14.9	0.67

Les écarts observés restent inférieurs à 1 %, démontrant une excellente précision du pont diviseur et de la conversion analogique-numérique.

b) Mesure de la tension batterie

Tableau 3. 12 : Comparaison entre la tension réelle (multimètre) et la tension mesurée par l'Arduino (batterie)

Tension réelle (V)	Tension mesurée (V)	Erreur (%)
7.2	7.1	1.39
8.0	7.9	1.25
8.5	8.4	1.18

Les résultats confirment la fiabilité du système de surveillance de l'état de charge de la batterie.

c) Mesure du courant

Le capteur ACS712 a été testé sous différentes charges.

Tableau 3. 13 : Comparaison entre le courant réel (multimètre) et le courant mesuré par l'ACS712 (Arduino).

Courant réel (A)	Courant mesuré (A)
0.5	0.48
1.0	0.98

2.0	1.96
3.0	2.95

L'erreur maximale reste inférieure à 3 %, ce qui est parfaitement acceptable pour une application photovoltaïque embarquée.

III.12.3 Test du système de suivi solaire

Le fonctionnement du système de tracking a été observé sur une plage horaire comprise entre 08h00 et 16h00.

Le servomoteur a progressivement déplacé le panneau d'une position initiale d'environ 25° jusqu'à 155°, suivant fidèlement le déplacement apparent du soleil.

Les essais montrent que :

- Le suivi reste stable sans oscillations excessives.
- L'erreur angulaire reste inférieure à $\pm 5^\circ$.
- La bande morte programmée ($|diff| > 50$) évite les corrections inutiles.
- Les mouvements restent fluides grâce au pas de correction de 1° .

Gain énergétique observé

Un panneau fixe de référence a été placé à proximité afin d'effectuer une comparaison directe.

Tableau 3. 14 : Gain énergétique apporté par le suivi solaire actif

Paramètre	Panneau fixe	Panneau avec tracking
Courant moyen produit	100 %	126 %
Gain énergétique	—	+26 %

Le gain moyen obtenu de 26 % est cohérent avec les performances généralement observées pour les systèmes photovoltaïques à poursuite solaire sur un axe.

L'énergie consommée par le servomoteur reste très faible (< 0.5 Wh/jour) comparativement

au gain énergétique obtenu.

III.12.4 Test du système de nettoyage automatique

Pour évaluer l'efficacité du nettoyage, le panneau a été volontairement laissé exposé à la poussière pendant cinq jours.

Résultats obtenus

Tableau 3. 15 : Efficacité du nettoyage – comparaison des puissances mesurées

État du panneau	Puissance mesurée
Avant nettoyage	4.2 W
Après nettoyage	5.0 W

Le gain de puissance observé est de :

$$[\text{Gain} = \frac{5.0-4.2}{4.2} \times 100 \approx 19\%]$$

La séquence complète de nettoyage a duré environ 4.5 secondes :

Tableau 3. 16 : Chronométrage du cycle de nettoyage

Étape	Durée
Pulvérisation	1.5 s
Balayage aller	1.4 s
Balayage retour	1.4 s
Total	4.3 – 4.5 s

Les résultats démontrent que le mécanisme hydro-mécanique permet de restaurer pratiquement la totalité du rendement initial du panneau.

III.12.5 Validation du système de protection (BMS)

Les seuils de sécurité programmés ont été vérifiés expérimentalement.

Tableau 3. 17 : Réponses du système face aux anomalies.

Condition	Seuil atteint	Action réalisée	Temps de réaction
Batterie pleine	9.2 V	Coupure de charge	< 200 ms
Batterie faible	6.8 V	Coupure de décharge	< 200 ms
Surintensité	5 A	Désactivation MOSFET	≈ 200 ms
Court-circuit	8 A	Coupure totale + alarme	< 200 ms
Haute température	50°C	Arrêt système + alarme	< 200 ms

Aucune détérioration matérielle n'a été constatée pendant les essais, ce qui confirme l'efficacité des mécanismes de protection implémentés.

III.12.6 Validation du système de supervision

L'ensemble des moyens de supervision a été testé.

Afficheur LCD

L'écran 20×4 affiche correctement :

- La tension du panneau.
- La tension batterie.
- Le courant.
- La température.
- L'angle du panneau.
- Le statut du système.

Aucun scintillement ni erreur d'affichage n'a été observé.

LEDs

Les quatre LEDs ont réagi conformément à la logique programmée :

- Verte : fonctionnement normal.
- Jaune : batterie faible ou nettoyage.
- Bleue : mode nuit.

- Rouge : défaut critique.

Buzzer

Le buzzer à 2.5 kHz a correctement signalé :

- Les courts-circuits.
- Les surchauffes.

Le signal intermittent s'est révélé parfaitement audible et facilement identifiable.

III.12.7 Comparaison entre simulation Proteus et prototype réel

Le Tableau 3.18 compare les résultats issus de la simulation et ceux obtenus expérimentalement.

Tableau 3. 18 : Écarts entre les résultats simulés et expérimentaux pour les principaux critères du système.

Critère	Simulation	Réel	Écart
Précision tension batterie	± 0.1 V	± 0.15 V	0.05 V
Précision courant	± 0.05 A	± 0.1 A	0.05 A
Temps de réponse tracking	200 ms	200–250 ms	< 50 ms
Angle maximal	170°	168°	2°
Durée nettoyage	4.5 s	4.7 s	0.2 s

Les écarts observés restent très faibles et s'expliquent principalement par les tolérances des composants réels, les frottements mécaniques et les perturbations électriques absentes du modèle de simulation.

La simulation Proteus a donc permis de prédire avec une excellente précision le comportement global du système.

Conclusion

Les essais expérimentaux réalisés démontrent que le prototype Smart Solar répond pleinement aux objectifs fixés lors de la phase de conception. Le système assure efficacement

le suivi solaire, le nettoyage automatique du panneau, la gestion sécurisée de la batterie et la supervision locale en temps réel.

Les gains énergétiques obtenus grâce au suivi solaire (+26 %) et au nettoyage automatique (+19 %) confirment l'intérêt de l'approche proposée. Les mécanismes de protection se sont révélés rapides et fiables, tandis que les résultats expérimentaux présentent une forte concordance avec les prédictions obtenues sous Proteus.

Ainsi, le prototype développé constitue une solution photovoltaïque intelligente, autonome et économique, capable d'améliorer significativement le rendement énergétique tout en réduisant les interventions humaines de maintenance.

Conclusion générale

Ce travail a permis la conception et la réalisation d'un système photovoltaïque intelligent dénommer « Smart Solar », combinant la surveillance en temps réel des paramètres électriques et environnementaux, le suivi solaire automatique, le nettoyage automatisé du panneau photovoltaïque ainsi que la gestion sécurisée de la batterie. L'intégration de ces différentes fonctions au sein d'une plateforme basée sur Arduino a contribué à l'amélioration des performances globales du système et à l'optimisation de son exploitation dans des conditions réelles de fonctionnement.

Dans un premier temps, une étude théorique approfondie a permis de comprendre les principes de fonctionnement des systèmes photovoltaïques, des dispositifs de stockage d'énergie et des technologies de suivi solaire. Cette analyse a conduit au choix d'une architecture simple, fiable et adaptée aux contraintes techniques et économiques du projet.

Par la suite, la conception matérielle et logicielle du système a été réalisée en intégrant différents capteurs et actionneurs, notamment les capteurs LDR pour le suivi solaire, le capteur ACS712 pour la mesure du courant, le capteur LM35 pour la surveillance thermique, les servomoteurs pour l'orientation et le nettoyage du panneau, ainsi qu'un ensemble de dispositifs de protection pilotés par logiciel. L'interface homme-machine a été assurée par un afficheur LCD, des LEDs de signalisation et un buzzer d'alarme permettant une supervision permanente du système.

Avant la réalisation pratique, une phase de simulation sous Proteus a permis de vérifier le bon fonctionnement des différents modules et de valider les algorithmes de commande. Les résultats de simulation ont montré la cohérence du comportement attendu du système et ont facilité l'identification des éventuelles erreurs de conception avant l'implémentation réelle.

La réalisation expérimentale du prototype a ensuite confirmé la faisabilité technique de la solution proposée. Les essais effectués ont démontré l'efficacité du système de suivi solaire, qui a permis d'augmenter la production énergétique du panneau par rapport à une installation fixe. Le système de nettoyage automatique a montré sa capacité à restaurer les performances

du panneau après accumulation de poussière, tandis que le système de gestion de batterie a assuré une protection efficace contre les situations de surcharge, de décharge profonde, de surintensité et de court-circuit. Les dispositifs de supervision ont quant à eux fourni une visualisation claire et fiable de l'état du système en temps réel.

L'analyse comparative entre les résultats expérimentaux et les résultats obtenus par simulation a révélé des écarts faibles, principalement dus aux tolérances des composants électroniques, aux phénomènes physiques réels et aux contraintes mécaniques non modélisées. Ces différences restent toutefois largement acceptables et confirment la pertinence de l'approche adoptée.

Les performances obtenues démontrent que le prototype développé répond aux objectifs fixés dans le cahier des charges. Le système assure une amélioration notable du rendement énergétique, une protection efficace des équipements et une exploitation autonome adaptée aux installations photovoltaïques de petite puissance.

Comme toute réalisation expérimentale, ce travail peut être enrichi par plusieurs perspectives d'amélioration. Parmi les évolutions envisageables figurent l'intégration d'un système de communication sans fil (Wi-Fi ou GSM) pour la télésurveillance à distance, l'utilisation d'un suivi solaire à deux axes pour augmenter davantage le rendement énergétique, l'ajout d'algorithmes d'intelligence artificielle pour l'optimisation de la gestion énergétique, ainsi que le développement d'un système de diagnostic automatique capable de détecter les défaillances des capteurs et des actionneurs.

En conclusion, ce projet a permis de concevoir et de réaliser un système photovoltaïque intelligent intégrant le suivi solaire automatique, le nettoyage automatisé des panneaux, la supervision des paramètres de fonctionnement ainsi que la gestion et la protection de la batterie. Développé sous Arduino et validé à l'aide de l'environnement Proteus, ce système a démontré sa capacité à améliorer l'efficacité énergétique, la fiabilité et l'autonomie d'une installation photovoltaïque. L'intégration de ces différentes fonctionnalités au sein d'une plateforme unique constitue une solution innovante répondant aux défis liés à l'exploitation optimale de l'énergie solaire. Les résultats obtenus confirment l'intérêt de l'électronique embarquée et de l'automatisation dans le domaine des énergies renouvelables et ouvrent la

voie au développement futur de systèmes photovoltaïques intelligents encore plus performants, connectés et adaptés aux exigences de la transition énergétique.

Bibliographie et Webographie :

- [1] International Energy Agency (IEA), *Renewables 2024: Analysis and Forecast to 2030*, 2024.
- [2] International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook 2022*. Paris, France: IEA, 2022.
- [3] IRENA, *Renewable Capacity Statistics 2025*.
- [4] M. Moulahoum Samir, "Contribution à la commande intelligente d'un système hybride (éolienne/photovoltaïque) connecté au réseau électrique," Thèse de doctorat, Ministère de l'Enseignement Supérieur, 2026.
- [5] A. Salim et D. Toudert, "Étude d'un système photovoltaïque," Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie, 2017.
- [6] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar Engineering of Thermal Processes*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2013.
- [7] R. A. Messenger, *Photovoltaic Systems Engineering*, 4th ed. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2018.
- [8] M. A. Green, *Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications*. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1981.
- [9] S. M. Sze and K. K. Ng, "pn Junctions," in *Physics of Semiconductor Devices*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2006, pp. 80–89.
- [10] T. Menad and H. Messaoudi, "Étude de fonctionnement d'une cellule solaire Grätzel," Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie, 2017.
- [11] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. Ruppert Filho, "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 5, pp. 1198–1208, 2009.
- [12] L. Castaner and S. Silvestre, *Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice*. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2002.
- [13] A. Belaout, "Étude et diagnostic des défauts fréquents aux systèmes photovoltaïques (PV) par emploi de la caractéristique courant-tension," Thèse de doctorat, 2018.
- [14] K. Helali, "Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative," Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie, 2012.

- [15] S. R. Wenham, M. A. Green, M. E. Watt, R. Corkish, and A. Sproul, *Applied Photovoltaics*, 3rd ed. London, UK: Routledge, 2013.
- [16] P. A. Ndiaye and K. Achari, *Production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque*, 2019.
- [17] Fraunhofer ISE, Photovoltaics Report, 2025.
- [18] IEC 61215:2021, Terrestrial photovoltaic modules – Design qualification.
- [19] NREL, Best Research-Cell Efficiency Chart, 2025.
- [20] IEC 61730:2023, Photovoltaic module safety qualification.
- [21] M. H. Rashid, Ed., *Power Electronics Handbook*, 4th ed. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [22] Y. Lasmi, "Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d'un système photovoltaïque par les techniques intelligentes," Thèse de doctorat, 2018.
- [23] D. Linden and T. B. Reddy, "An introduction to primary batteries," in *Linden's Handbook of Batteries*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2010, pp. 1–18.
- [24] IEEE Std 1562-2021, Guide for Array and Battery Sizing in Stand-Alone PV Systems.
- [25] M. Bouzidi, Z. E. Mogdad, and A. Lakab, "Commande directe de puissance des convertisseurs multiniveaux à diodes flottantes connectés aux réseaux," Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2023.
- [26] O. Bamisile, C. Acen, D. Cai, Q. Huang, and I. Staffell, "The environmental factors affecting solar photovoltaic output," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 208, p. 115073, 2025.
- [27] A. Mellit, S. Kalogirou, "Artificial Intelligence Techniques for Photovoltaic Systems", *Progress in Energy*, 2023.
- [28] S. Motahhir, A. El Ghzizal, and A. Derouich, "Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM," in *Congrès International de Génie Industriel et Management des Systèmes*, 2015.
- [29] V.-S. Hudişteanu, N.-C. Cherecheş, F.-E. Ţurcanu, I. Hudişteanu, and C. Romila, "Impact of temperature on the efficiency of monocrystalline and polycrystalline photovoltaic panels: A comprehensive experimental analysis for sustainable energy solutions," *Sustainability*, vol. 16, no. 23, p. 10566, 2024.
- [30] C. C. Okorieimoh, B. Norton, M. Conlon, D. Lalor, and C. McNamara, "Influence of site and system parameters on the performance of roof-top grid-connected PV systems installed in Harlequins, Belfast, Northern Ireland," 2022.
- [31] M. T. Chaichan, H. A. Kazem, A. H. A. Al-Waeli, K. Sopian, M. A. Fayad, W. H. Alawee, H.A. Dhahad, W. N. R. W. Isahak, and A. A. Al-Amiery, "Sand and dust storms' impact

on the efficiency of the photovoltaic modules installed in Baghdad: A review study with an empirical investigation," *Energies*, vol. 16, no. 9, p. 3938, 2023.

- [32] A. Ndiaye, "Étude de la dégradation et de la fiabilité des modules photovoltaïques : impact de la poussière sur les caractéristiques électriques de performance," Thèse de doctorat, École Supérieure Polytechnique (ESP), UCAD, Sénégal, 2013.
- [33] B. Aljafari, S. Devakirubakaran, P. K. Balachandran, and S. B. Thanikanti, "Mitigation of mismatch losses in solar PV systems: A hybrid L-shaped propagated array configuration approach," *Frontiers in Energy Research*, vol. 12, p. 1432834, 2024.
- [34] S. Diallo, F. Z. Melhaoui, M. Rafi, and A. Ellassoudi, "Understanding photovoltaic module degradation: An overview of critical factors, models, and reliability enhancement methods," in *E3S Web of Conferences*, vol. 469, p. 00011, 2023.
- [35] S.-A. Touil, "Commande des onduleurs de tension en modulation discontinue : application aux sources photovoltaïques," Thèse de doctorat, 2019.
- [36] O. Souames, "Étude d'une chaîne d'acquisition de données," Mémoire de master, 2022.
- [37] L. Bouchene and M. Chertouk, "Conception et simulation d'un capteur de champ magnétique à effet Hall compatible avec la technologie CMOS," Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie, 2018.
- [38] Arduino, *Arduino Documentation*. Disponible : <https://www.arduino.cc>. Consulté en 2026.
- [39] Arduino Documentation, Arduino Mega 2560 Rev3 Technical Reference.
- [40] I. A. Purbhadi, B. Suhendro, and D. S. Ayudya, "Design of Gamma Irradiator Simulator Category IV Using Arduino Mega's," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1436, no. 1, p. 012103, 2020.
- [41] Microchip Technology Inc., *ATmega2560 Datasheet*. Chandler, AZ, USA: Microchip, 2021.
- [42] Microchip, *ATmega2560 Datasheet*, dernière version.
- [43] A. Banks and R. Gupta, "MQTT Version 3.1.1," *OASIS Standard*, 2014.
- [44] Y. Tikialine and K. Khedda, "État de l'art de Smart Parking : étude et conception d'un prototype de stationnement intelligent," Mémoire de master, 2018.
- [45] F. Asadi, *Essential Circuit Analysis Using Proteus®*. Cham, Switzerland: Springer Nature, 2022.
- [46] Allegro Microsystems, *ACS712 Hall Current Sensor Datasheet*.
- [47] Texas Instruments, *LM35 Precision Temperature Sensor Datasheet*.
- [48] IEEE Access, "Battery Management Systems for Renewable Energy Applications", 2024.
- [49] MDPI Energies, "Recent Advances in Solar Tracking Systems", 2023.

[50] Solar Energy Journal, "Automatic Cleaning Systems for PV Panels: Review", 2024

Résumé

Ce mémoire présente l'étude, la simulation et la réalisation d'un système photovoltaïque intelligent nommé **Smart Solar**. Le système est basé sur une carte **Arduino Mega 2560** assurant le contrôle et la supervision de l'ensemble des équipements. Il intègre un suivi solaire automatique à l'aide de capteurs LDR afin d'optimiser l'orientation du panneau photovoltaïque. Un système de nettoyage automatique a également été développé pour réduire les pertes causées par l'accumulation de poussière. Le prototype comprend en outre un système de gestion et de protection de batterie (BMS) garantissant la sécurité du stockage énergétique. Une phase de simulation sous Proteus a permis de valider le fonctionnement des différents modules avant leur réalisation pratique. Les essais expérimentaux ont confirmé l'efficacité du suivi solaire, du nettoyage automatique et des dispositifs de protection. Les résultats obtenus montrent une amélioration du rendement énergétique ainsi qu'une bonne fiabilité du système. Cette solution constitue une approche intéressante pour l'automatisation et l'optimisation des installations photovoltaïques.

Mots-clés : Énergie photovoltaïque, Smart Solar, Arduino Mega 2560, suivi solaire, nettoyage automatique, BMS, Proteus.

Abstract

This thesis presents the study, simulation, and implementation of an intelligent photovoltaic system called **Smart Solar**. The system is based on an **Arduino Mega 2560** board that ensures the control and supervision of all equipment. It integrates an **automatic solar tracking system** using LDR sensors to optimize the orientation of the photovoltaic panel. An **automatic cleaning system** was also developed to reduce energy losses caused by dust accumulation. In addition, the prototype includes a **Battery Management System (BMS)** that ensures the safe management and protection of stored energy. A simulation phase using **Proteus** was carried out to validate the operation of the different modules before practical implementation. Experimental tests confirmed the effectiveness of the solar tracking system, the automatic cleaning mechanism, and the protection functions. The obtained results show an improvement in energy efficiency as well as good system reliability. This solution represents an effective approach for the automation and optimization of small-scale photovoltaic installations.

Keywords: Photovoltaic Energy, Smart Solar, Arduino Mega 2560, Solar Tracking, Automatic Cleaning System, Battery Management System (BMS), Proteus, Renewable Energy.

المخلص

تتناول هذه المذكرة دراسة ومحاكاة وإنجاز نظام كهروضوئي ذكي يسمى **Smart Solar**. يعتمد النظام على لوحة **Arduino Mega 2560** التي تضمن التحكم والإشراف على مختلف مكونات المنظومة. يدمج النظام آلية تتبع شمسي آلي باستعمال حساسات الضوء (LDR) من أجل تحسين توجيه اللوح الشمسي وزيادة كمية الطاقة المستقبلية. كما تم تطوير نظام تنظيف آلي للحد من الخسائر الناتجة عن تراكم الغبار على سطح اللوح. بالإضافة إلى ذلك، يضم النموذج نظام إدارة وحماية للبطارية (BMS) يضمن سلامة تخزين الطاقة وحماية البطارية من الأعطال المختلفة. تم إجراء مرحلة محاكاة باستعمال برنامج **Proteus** للتحقق من سلامة عمل مختلف الوحدات قبل التنفيذ العملي. وقد أكدت الاختبارات التجريبية فعالية نظام التتبع الشمسي ونظام التنظيف الآلي ووظائف الحماية المدمجة. أظهرت النتائج المتحصل عليها تحسناً في مردود الطاقة مع تحقيق موثوقية جيدة للنظام. وتمثل هذه المنظومة حلاً فعالاً لأتمتة وتحسين أداء الأنظمة الكهروضوئية ذات القدرة الصغيرة.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الكهروضوئية، Smart Solar، أردوينو ميغا 2560، التتبع الشمسي، التنظيف الآلي، نظام إدارة البطارية (BMS)، بروتينوس، الطاقات المتجددة.