

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D' INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Filière : ELECTRONIQUE

Spécialité : MICROELECTRONIQUE

Présenté par

Azibi Lilia

Aichoun Fateh

Thème

Controle et supervision d'une installation photovoltaïque par microcontrôleur

Mémoire soutenu publiquement le 24/ 09/ 2024 devant le jury composé de :

M Djohra Saheb Koussa

Directrice de recherche, CDER, Encadreur

M Djedjiga Hatem

Professeure, UMMTO, CO-Encadreur

M Farida Nemmar

Presidente du jury, UMMTO, MCB

M Faiza Bouaraba

Examinatrice, UMMTO, Examineur

REMERCIEMENT

On tient tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude à notre directrice de mémoire, le Docteur Djohra Saheb Koussa auprès de la Professeure Djedjiga Hatem, notre encadrante et co-encadrante pour leur guidance précieuse, leurs conseils avisés et leur soutien indéfectible tout au long de ce projet. Avec rigueur scientifique, expertise et bienveillance nous ont été des sources d'inspiration constantes et ont grandement contribué à la réalisation de ce travail.

Nous adressons nos remerciements :

Au membres du jury d'avoir fait l'honneur d'accepter de présider le jury.

On remercie également tous ceux qui nous ont aidés, nos enseignants, pour leurs suggestions pertinentes, leur disponibilité et leurs encouragements, qui nous ont poussés à surmonter les défis rencontrés.

On voudrait exprimer notre reconnaissance à UMMTO et au CDER pour leur accueil, en particulier à monsieur Fateh Mehareb, pour avoir mis à notre disposition les moyens techniques et les ressources nécessaires à la bonne réalisation de ce projet. Leur soutien logistique et matériel a été essentiel.

Un grand merci par ailleurs à nos collègues de tout notre parcours universitaire pour leur camaraderie et les discussions fructueuses qui ont enrichi cette aventure académique.

Enfin, je tiens à remercier ma famille et mes amis pour leur soutien moral, leur patience et leur encouragement tout au long de cette période de travail intense. Leur présence nous a permis de garder la motivation nécessaire pour mener à bien ce projet.

DEDICACE

*Ce mémoire est le fruit de nos efforts conjugués,
Une histoire d'amitié, de courage et de volonté,
Un hommage à ceux qui nous ont soutenus,
Et à la flamme qui en nous, n'a jamais cessé de brûler.
À nos familles, à nos amis sincères,
Vous étiez la force dans nos prières,
Vos sourires ont éclairé nos nuits,
Et fait fleurir l'envie d'aller jusqu'au bout.
Et si demain d'autres routes sont à arpenter,
Ces pages resteront l'empreinte de notre harmonie.*

Liste des figures

Fig I.1 : Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque raccordé au réseau

Fig. I.2 : schéma synoptique d'une installation photovoltaïque hybride

Fig I.3 : schéma synoptique d'une installation photovoltaïque autonome

FigI.4 : Schéma des ressources solaires dans le monde

FigI.5 : Perspective du marché des énergies renouvelables jusqu'à 2050

Fig I.6 : Impact environnemental de l'énergie solaire : Analyse à travers différents paramètres sous forme de camembert

FigII.1 : Les trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné

Fig II.2 : Schéma synoptique d'une cellule photovoltaïque

Fig II.3 : tracé des caractéristiques I-V d'une cellule solaire

Fig II.4 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

FigII.5 : Caractéristique résultant d'un regroupement de N_s cellules en série

Fig II.6: Caractéristique résultant d'un regroupement de N_s cellules en série

Fig II.7: Caractéristique résultant d'un regroupement mixte

Fig II.8: Schéma d'un MPPT en matlab Simulink

Fig II.9 : modèle électrochimique d'une batterie

Fig II.10 : Schéma synoptique d'une batterie

FigIII.1 : Caractéristique (I-V), (P-V) du module photovoltaïque dans les conditions standards

Fig III.2 Schéma de générateur PV en MATLAB_SIMULINK

Fig. III.3: Evolution de la caractéristique I(V) et P(V) en fonction de l'irradiation.

Fig. III.4: Evolution de la caractéristique I(V) et P(V) en fonction de la température.

Fig III.5: figure illustre l'état de décharge d'une batterie en matlab simulink

Fig III.6 : Schéma synoptique qui illustre les différentes parties de notre système

Fig III.7: Organigramme représentant la réalisation pratique de la supervision

Fig III.8: Schéma synoptique représentant des composants nécessaires pour la réalisation de la supervision

Fig III.9 : Image illustrant le pyranomètre utilisé dans l'installation

Fig III.10: Image illustrant le capteur de température et d'humidité relative

Fig III.11 : Image illustrant le module de conversion analogique-numérique ADS115

Fig IV.1 : Site d'implantation et Coordonnées Géographiques sur l'image Google (Earth).

Fig IV.2: éclairage nocturne

Fig IV.3 : système de monitoring

Fig IV.4 : l'évolution journalière de la température en présence de charge.

Fig IV.5 : l'évolution journalière de l'humidité en présence de charge

Fig IV.6 l'évolution journalière du rayonnement en présence de charge.

Fig IV.7 : variations journalières du courant PV ainsi que de la batterie avec charge.

Fig IV.8 : variations journalières de la tension PV ainsi que de la batterie avec charge

Fig IV.9: variations journalières de la puissance PV ainsi que de la batterie avec charge

Fig IV.10 : évolution journalière de l'état de charge en présence de charge.

Fig IV.11: Rayonnement solaire journaliers sans charge

Fig IV.12 : Températures journalières sans charge

Fig IV.13 : humidité journalières sans charge

Fig IV.14 Évolution journalière du courant PV et de la batterie sans charge

Fig IV.15 : Évolution journalière de la tension PV et de la batterie en absence de charge

Fig IV.16 : Évolution journalière de la puissance PV et de la batterie sans charge

Fig IV.17 : Evolution journalière de l'état de charge de la batterie sans charge.

Sommaire

Liste des figures

Résumé

Introduction.....	1
Chapitre I: état de l'art	
1.1 Introduction.....	2
1.2 Etat actuelle de l'énergie solaire	2
1.2.1 Système PV raccordé au réseau	2
1.2.2 Système hybride.....	3
1.2.3 Système autonome	4
1.3 Les batteries dans les systèmes autonomes.....	5
1.1.1 Types de batteries	6
1.1.2 Grandeurs caractéristiques des batteries	6
1.1 Marché de l'énergie solaire	8
1.1.1 Installations résidentielles et commerciales en Algérie	8
1.1.2 Projet à grande échelles.....	8
2. Recherches et développement dans l'énergie solaire	8
2.1 Amélioration de l'efficacité des cellules photovoltaïques	8
2.2 Matériaux de recherche pour les cellules solaires	9
2.3 Innovations dans le stockage de l'énergie	9
2.4 Financement gouvernementale et privé.....	10
3. Perspectives et défis de l'énergie solaire	11
3.1 Perspectives de croissance du marché	11
3.2 Impact environnemental	13
3.3 Barrières réglementaires et économiques.....	14
3.3.1 Mise en place d'un ensemble de textes législatifs et réglementaires encadrant le développement des énergies renouvelables en Algérie.....	14
3.3.2 Mesures d'incitations financières et fiscales	14
3.4 Défis techniques et économiques.....	15
2. Conclusion	15

Chapitre II : Modélisation du système photovoltaïque

1.Introduction.....	16
2. Modélisation du gisement solaire.....	16
2.1 Modèle du rayonnement solaire.....	16
1. Modélisation d'un générateur photovoltaïque	22
1.1 Définition d'une cellule photovoltaïque	22
3.2 Caractéristique électrique et paramètres de la cellule solaire	23
3.3 schéma électrique équivalent d'une cellule solaire	25
3.4 Modèle mathématique d'une cellule PV	25
3.5 Modélisation d'un module PV.....	26
3.5.1 Assemblage en série.....	26
3.5.2 Assemblage en parallèle	27
3.5.3 Assemblage mixte	28
3.6 Conditions environnementales.....	29
4. Modélisation d'un régulateur de charge.....	29
4.1 Modèle Mathématique du Régulateur de Charge	30
5. Modélisation de batterie.....	31
5.1 Modèle électrochimique d'une batterie	31
5.2 Modèle Mathématique de la Batterie GEL 200 Ah 12V	33
6. Modélisation d'un Onduleur DC/AC dans un Système Photovoltaïque (PV)	34
6.1 Principe de Fonctionnement de l'Onduleur	34
6.2 Modèle Mathématique de l'Onduleur	34
7. La charge	35
7.1 Charges en Courant Continu (DC).....	35
7.2 Charges en Courant Alternatif (AC)	36
7.3 Modèle de la Charge.....	36
8. Conclusion	36

Chapitre III : SIMULATION ET REALISATION PPRATIQUE

1. Introduction.....	37
2. Simulation du système PV autonome	37

2.1. Présentation des modèles mathématiques utilisés pour simuler le comportement de l'installation PV autonome.....	37
1.1.1 Influence de l'éclairement	40
1.1.2 Influence de la température	40
2.1.3 Résultats de simulation de la batterie	41
2.2 Supervision du système PV autonome	43
2.2.1 Description des éléments du système de supervision.....	43
2.2.2 Capteurs de mesure.....	44
3. Realisation pratique de la supervision.....	44
3.1 Organigramme	44
3.2 Présentation des composants nécessaires pour la réalisation de la supervision	46
3.2.1 Pyranomètre	46
3.2.2 Capteur de température et d'humidité relative	48
3.2.3 ADS1511	48
3.2.4 Capteurs de Tension.....	49
3.2.5 Capteurs de courant	50
3.2.6 Arduino.....	51
4. Conclusion	53
Chapitre IV : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS	
1. Introduction.....	54
2. Site d'implantation.....	54
2.1 Données météorologiques du site de Bouzaréah.....	55
2.2 Estimation des besoins en énergie électrique.....	56
3. Présentation du système de monitoring.....	57
3.1 Composition du Système de Monitoring.....	58
4. Résultats et interprétation de données obtenues	59
4.1 Avec charge.....	59
4.1.1 Données météorologiques	59
4.1.2 Courants	62
4.1.3 Tensions	64
4.1.4 Puissance.....	65

4.1.5 État de charge (SOC)	66
4.2 Sans charge	67
4.2.1 Données météorologiques	67
4.2.2 Courant	69
4.2.3 Tension	71
4.2.4 Puissance	72
5. Conclusion	74

Références Bibliographiques

Annexes

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous examinerons de manière globale les aspects les plus importants de l'énergie solaire, ainsi que l'importance que l'Algérie accorde à ce domaine et les avancées technologiques réalisées par la recherche dans ce domaine. Nous commencerons par présenter l'état actuel de l'énergie solaire, puis nous aborderons la recherche et le développement dans le secteur de l'énergie solaire ainsi que ses perspectives. Enfin, nous concluons par une brève synthèse.

1.2 Etat actuelle de l'énergie solaire

Aujourd'hui, l'énergie solaire traverse une étape cruciale dans son développement. Les avancées technologiques ne cessent d'étendre les frontières de l'efficacité des cellules solaires, ce qui les rend de plus en plus compétitives sur le marché mondial. Les installations solaires se multiplient à l'échelle mondiale grâce à une diminution importante des coûts de production, que ce soit à petite échelle pour les habitations individuelles ou à grande échelle pour les grands projets alimentant les réseaux électriques. En même temps, il est devenu courant d'intégrer l'énergie solaire dans les réseaux électriques, soutenue par le développement de systèmes de stockage d'énergie qui permettent une utilisation continue de l'électricité lorsque le soleil ne brille pas. Nous donnons dans ce qui suit un aperçu des principales technologies actuelles en matière d'énergie solaire et types de systèmes photovoltaïques (PV) qui contribuent à cette transition vers une économie solaire durable :

1.2.1 Système PV raccordé au réseau

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des « strings », eux-mêmes reliés à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings

Si la consommation locale est supérieure à la production de l'installation PV, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs. [1]

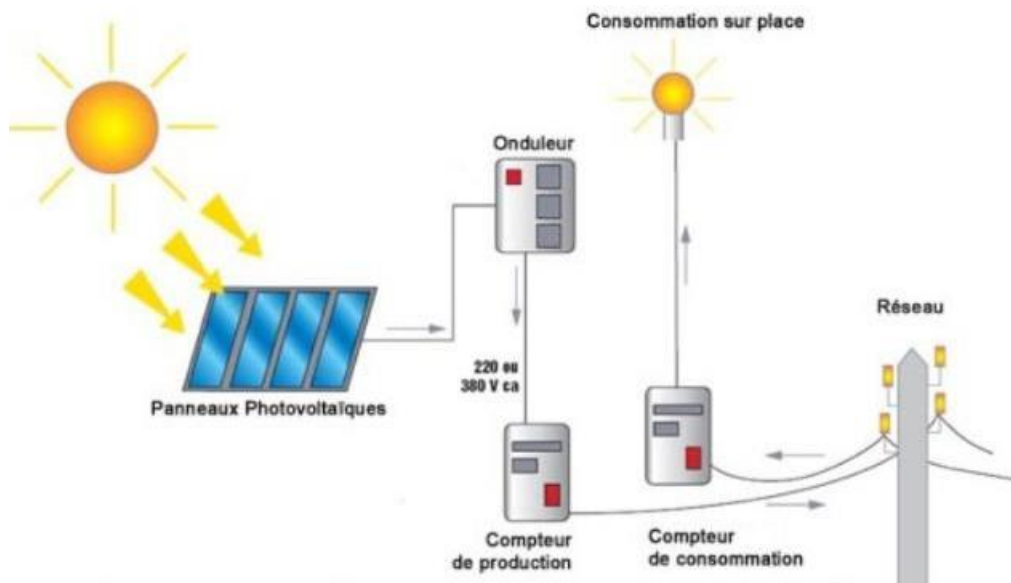


Fig I.1 : Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau

1.2.2 Système hybride

Le système de production d'énergie hybride (mixte) combine et exploite deux ou plusieurs sources d'énergies dans le but que l'une complète l'autre.

Les sources d'énergies renouvelables, telles que le photovoltaïque et l'éolien, ne produisent pas une puissance constante, donc l'utilisation d'un système de stockage est nécessaire.

Un système de production d'énergie mixte intègre un réseau de distribution à courant alternatif (AC), un système à courant continu (CC), un système de stockage, des convertisseurs de puissance, des charges et éventuellement une fonction de gestion de charge ou un système de supervision. La plupart des systèmes mixtes conventionnels contiennent deux bus distincts: un bus à courant continu CC pour les sources et les charges à courant continu et les batteries et un bus à courant alternatif pour les générateurs à courant alternatif et le réseau de distribution. [2] Notre système de production se compose des éléments suivants : des panneaux photovoltaïques connectés au bus CC via des convertisseurs DC/DC à pilotage MPPT. Chaque panneau est connecté au réseau au bus CC. Pour le stockage d'énergie, nous utilisons une batterie électrochimique que nous relierons au bus CC via un contrôleur de charge/décharge. De plus, le bus CC est connecté aux charges alternatives via un onduleur

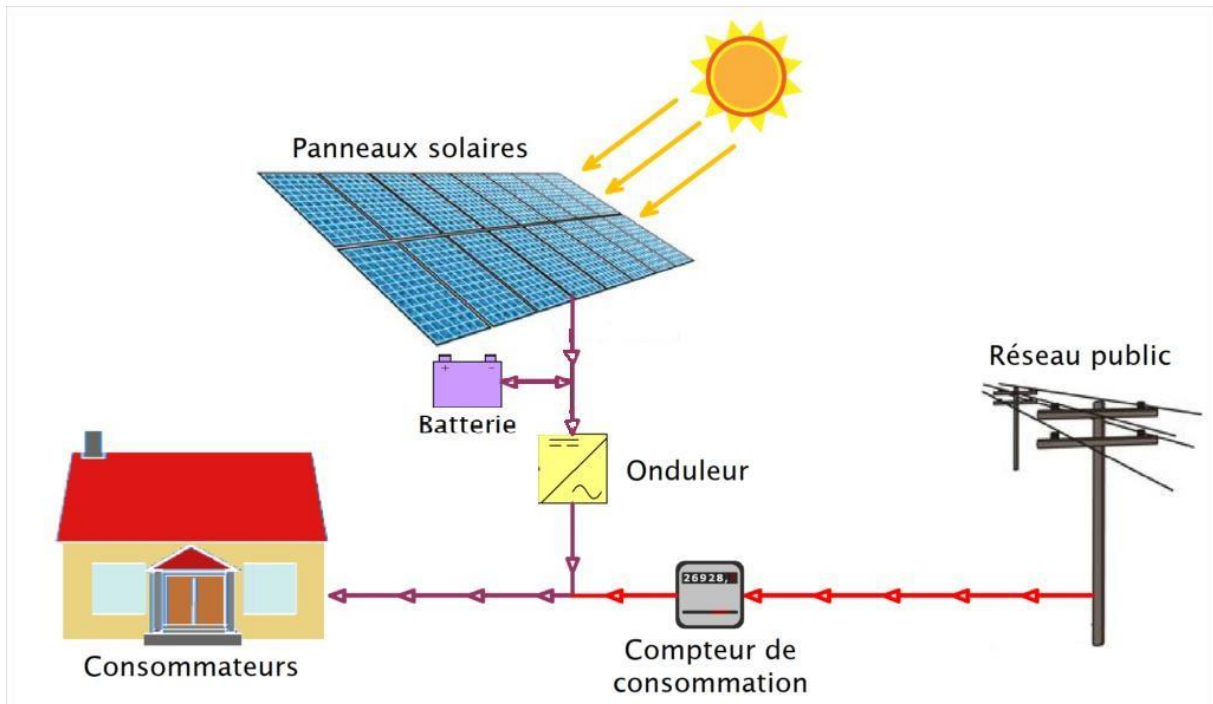


Fig. I.2: schéma synoptique d'une installation photovoltaïque hybride

1.2.3 Système autonome

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Comme le la figure suivante, qui représente l'exemple d'un système PV autonome :

- **Le générateur photovoltaïque** (ou champ PV) charge la batterie pendant les périodes d'ensoleillement et alimente en direct, si nécessaire, les récepteurs.
- **La batterie d'accumulateurs** assure le stockage de l'énergie électrique produite.
- **Le contrôleur de charge (type PWM ou MPPT)** protège la batterie contre la surcharge.
- **Le limiteur de décharge** protège la batterie contre d'éventuelles décharges profondes. Les utilisations, composées de récepteurs DC ou/et d'un onduleur, sont connectées sur la batterie via le limiteur de décharge.
- **Alimentation autonome de produits grand public** (lampes solaires, bornes de jardin, etc.) par énergie photovoltaïque de faible puissance : intégrée dans le produit.
- **Électrification de bâtiments** (quelques centaines de watts à quelques kW) : résidences secondaires, écoles et centres de santé dans les pays en développement, etc, par kits photovoltaïques (SHS en anglais : Solar Home Systems).
- **Alimentation pour des applications professionnelles** (de quelques dizaines de watts à quelques kW) : signalisation, protection cathodique, télécommunications, etc.

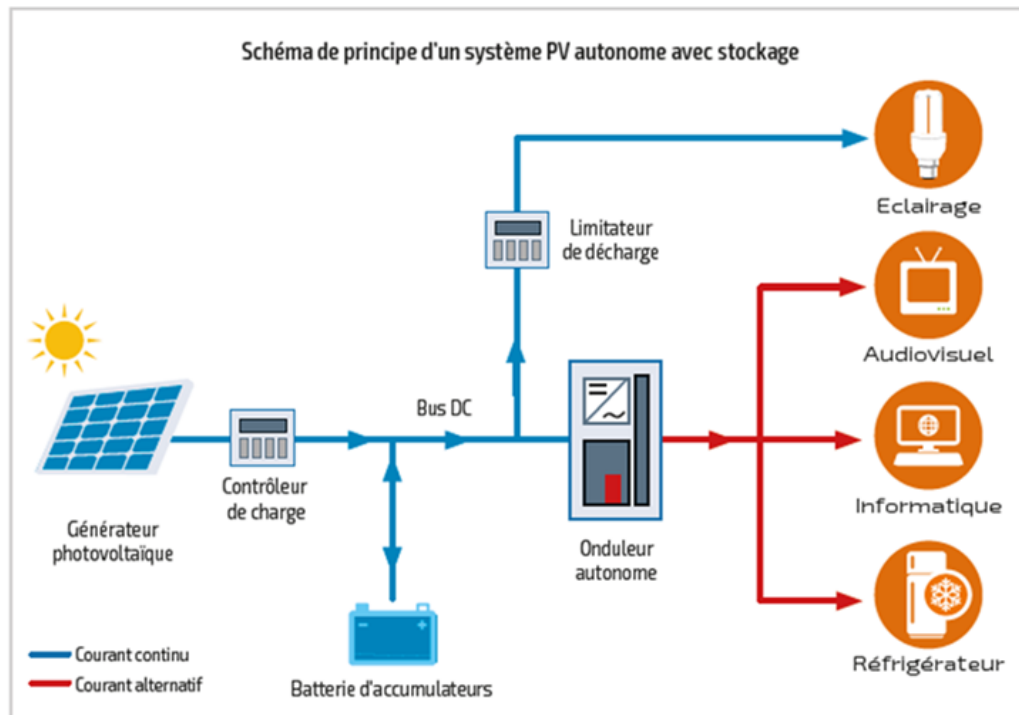


Fig I.3: schéma synoptique d'une installation photovoltaïque autonome

1.3 Les batteries dans les systèmes autonomes

Les batteries sont employées pour maximiser l'autoconsommation de l'énergie solaire, gérer l'énergie et diminuer la dépendance au réseau électrique public. Elles augmentent l'efficacité et l'indépendance des installations solaires jouant ainsi un rôle crucial dans la transition énergétique vers des sources d'énergie renouvelables. Le tableau ci-dessous présente une comparaison des avantages et des inconvénients de chaque type de batterie

1.3.1 Types de batteries

Tableau I. 1: Une comparaison des avantages et des inconvénients de chaque type de batterie

Le Type	Avantages	Inconvénients
Batteries à décharge lente	<ul style="list-style-type: none"> -Durée de vie (5 à 10 ans) - Prix correcte - Supportent bien les surchauffes, inertie thermique élevée - Nombreux cycle de charge (entre 500 et 1000 cycles) 	<ul style="list-style-type: none"> -Recharger régulièrement ces batteries en eau distillée - Lourdes (poids) - Sensibles au froid
Batteries Gel	<ul style="list-style-type: none"> - Durée de vie (8 à 12 ans) - Pas d'entretien - Bonne tolérance aux températures élevées - Nombreux charge de cycle (entre 500 et 1200 cycles) 	<ul style="list-style-type: none"> - Chères - Lourdes (poids) -Peu adaptée aux courants de charge/décharge élevés
Batteries Lithiumion	<ul style="list-style-type: none"> - Durée de vie (30 ans) - Légère - Pas d'entretien - Faible autodécharge - Bonne tolérance à la température basse est élevée. - cycle de charge très élevé (entre 2500 et 5000 cycles) 	<ul style="list-style-type: none"> - Très onéreuses

1.3.2 Grandeurs caractéristiques des batteries

✓ *Capacité*

La capacité d'une batterie est une mesure de la quantité d'électricité qu'elle peut stocker, exprimée en ampères-heures (Ah), pour un certain régime. Elle représente la totalité des Ah disponibles lorsque la batterie est déchargée à un régime spécifique (ou à un certain courant) depuis un état de charge de 100% jusqu'à la tension limite de fin de décharge.

La capacité est généralement calculée en multipliant le courant de décharge par le temps de décharge. Elle est influencée par la température ainsi que par le régime, et elle est maximale lorsque la batterie est neuve. Les fabricants de batteries fournissent souvent la capacité nominale, qui est obtenue à un courant de décharge nominal respectant les limites de tensions spécifiées et dans des conditions de température données [3]

✓ *Résistance interne*

La résistance interne de la batterie est étroitement liée aux matériaux qui composent la batterie ainsi qu'aux réactions qui se produisent à l'intérieur. Elle varie en fonction du régime de charge/décharge, de la température, de l'état de santé et de l'état de charge de la batterie. Cette résistance fournit une indication du rendement énergétique de la batterie. En effet, avec une résistance interne élevée, les pertes par effet Joule augmentent, ce qui diminue le rendement global de la batterie. Il est important de noter que la capacité et la résistance interne d'une batterie sont deux paramètres essentiels pour évaluer son état de santé. Elles sont également liées à l'état de fonction SOF (State Of Fonction) puisque la résistance interne est une indication de la puissance maximale disponible.[3]

Tension en circuit ouvert

La tension à vide, ou en circuit ouvert OCV (Open Circuit Voltage), d'une batterie correspond à son potentiel d'équilibre, c'est-à-dire la différence de potentiel entre les deux électrodes lorsque la batterie est au repos. Cette tension d'équilibre est directement influencée par les activités des espèces actives présentes dans la batterie, lesquelles varient en fonction de l'état de charge et de la température [3].

✓ *Etat de charge*

L'état de charge SOC (State Of Charge) est une mesure de la capacité disponible de la batterie à un instant donné, exprimée en un pourcentage de sa capacité maximale. Cette valeur est généralement calculée en intégrant le courant, permettant ainsi de suivre l'évolution de la quantité de charge tout au long de la sollicitation électrique de la batterie.

✓ *État de santé*

L'état de santé SOH (State Of Health) est une mesure qui évalue les pertes de performances dues à la dégradation de la batterie. Il peut être défini comme le rapport entre la capacité totale actuelle de la batterie et de sa capacité maximale obtenue lorsqu'elle était neuve. Cependant, pour une évaluation précise de l'état de santé de la batterie, il est important de prendre également en compte de l'augmentation de sa

résistance interne, en particulier dans le cas de régimes de décharge importants entraînant des échauffements significatifs. [3]

1.4 Marché de l'énergie solaire

1.4.1 Installations résidentielles et commerciales en Algérie

En Algérie, le développement des installations photovoltaïques résidentielles et commerciales est en plein essor, avec des projets à grande échelle visant à accroître la production d'énergie renouvelable. Les systèmes photovoltaïques utilisés dans la production décentralisée d'énergie électrique ont connu une croissance couvrant une gamme d'applications allant des installations solaires pour les bâtiments individuels aux installations industrielles et commerciales.

Les installations photovoltaïques résidentielles et commerciales en Algérie sont généralement connectées au réseau électrique public, ce qui permet de maximiser l'utilisation de l'énergie produite et de réduire la dépendance aux sources d'énergie fossiles. Les contrats d'achat d'énergie solaire photovoltaïque sont établis sur une durée de sont fixés à vingt (20) ans, à compter de la date de raccordement au réseau public. Le tarif d'achat garanti pour les cinq premières années est de 12,75 DA/kWh pour les installations de puissance supérieure à 5 MWc, et de 15,94 DA/kWh pour les installations de puissance inférieure ou égale à 5 MWc. [4]

1.4.2 Projet à grande échelles

Les projets à grande échelle en Algérie dans les systèmes photovoltaïques comprennent le projet TAFOUK1, qui vise à la construction de centrales photovoltaïques d'une capacité totale de 4000 Mégawatts. Il était prévu d'atteindre une capacité de 1000 mégawatts en 2021, et l'objectif est de monter à 15000 mégawatts d'ici 2035. Ce projet pourrait créer 56 000 emplois pendant sa phase de réalisation et 2000 emplois lors de l'exploitation. [5]

Pour garantir la réussite de ces installations photovoltaïques en Algérie, il est crucial de les concevoir et de les dimensionner de manière à maximiser leur efficacité et leur durabilité. Cela implique de prendre en compte les caractéristiques locales telles que la latitude, l'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires, ainsi que l'ensoleillement et les conditions atmosphériques spécifiques à la région. Il est également essentiel d'utiliser des composants électroniques appropriés pour assurer le bon fonctionnement des installations.

2. Recherches et développement dans l'énergie solaire

2.1 Amélioration de l'efficacité des cellules photovoltaïques

MacAlpine et al ont exploré de manière approfondie les photovoltaïques bifaciaux, une technologie émergente dans le domaine de l'énergie solaire. Les chercheurs examinent les différents aspects de cette technologie, avec les matériaux utilisés, les concepts de conception, les mécanismes de conversion de l'énergie solaire en électricité, ainsi que les

avantages et les défis associés à ces systèmes. Ils identifient également les différents types de cellules bifaciales, tels que les cellules à base de silicium, les cellules à pérovskite et les cellules organiques, en analysant leurs performances et leurs applications potentielles. L'étude approfondit les facteurs qui influencent le rendement des cellules bifaciales, comme l'albédo du sol, l'angle d'incidence solaire et la configuration du système. De plus, elle met en lumière les récentes avancées dans le domaine de l'optimisation des performances des installations bifaciales. Les résultats de cette étude offrent un aperçu complet des photovoltaïques bifaciaux, soulignant leur potentiel en tant que solution efficace pour la production d'énergie solaire dans une variété d'environnements et d'applications. [6]

2.2. Matériaux de recherche pour les cellules solaires

L'étude "Enhanced efficiency of perovskite solar cells based on TiO₂ nanorods with unique morphology" par Zhang et al. (2019) présente une avancée significative dans le domaine des cellules solaires à base de pérovskite. Les chercheurs ont utilisé une méthode de croissance assistée par surfactant pour synthétiser des nanotiges de TiO₂ avec une morphologie unique, contrôlant ainsi leur taille, leur forme et leur orientation. L'incorporation de ces nanotiges de TiO₂ dans la couche de transport d'électrons des cellules solaires, a conduit à une augmentation notable de leur rendement énergétique, passant de X% à Y%. Cette amélioration est attribuée à une meilleure séparation des charges et une réduction des pertes dues aux recombinaisons d'électrons et de trous. Ces résultats montrent que les nanotiges de TiO₂ à morphologie unique ont le potentiel d'améliorer les performances des cellules solaires à base de pérovskite, ce qui ouvre la voie à des progrès importants dans le domaine de l'énergie solaire renouvelable. [7]

L'étude "Recent Advances in Efficiency Improvement of Organic Solar Cells" par Qian et al. (2021) met en lumière les progrès récents dans l'amélioration de l'efficacité des cellules solaires organiques. Les chercheurs ont examiné diverses stratégies, notamment l'ingénierie de matériaux, l'optimisation des interfaces et l'amélioration de la stabilité pour augmenter le rendement des cellules solaires organiques. Ils ont identifiés des mécanismes sous-jacents tels que la séparation des charges, le transport des charges et la réduction des pertes dues aux recombinaisons. Parmi les avancées notables figurent l'utilisation de nouveaux matériaux organiques avec des propriétés de transport de charges améliorées, l'optimisation des couches d'électrodes pour réduire les pertes ohmiques et l'incorporation de nanostructures pour augmenter la surface de contact. Ces résultats ouvrent des perspectives prometteuses pour l'amélioration continue de l'efficacité des cellules solaires organiques et leur application dans le domaine de l'énergie renouvelable. [8]

2.3 Innovations dans le stockage de l'énergie

Les innovations dans le stockage d'énergie solaire sont essentielles pour favoriser le développement de l'énergie solaire et la transition énergétique. Ces technologies connaissent une évolution constante, proposant des solutions pour stocker l'énergie solaire produite et la mettre à disposition en fonction des besoins

Les technologies de stockage électrochimique sont largement adoptées pour le stockage de l'énergie solaire. Parmi celles-ci, on trouve les batteries lithium-ion ainsi que les systèmes de batterie rechargeable à flux redox.

Ces technologies sont réputées pour leur capacité de stockage importante et leur rendement élevé.

Le stockage thermique offre une solution prometteuse pour le stockage d'énergie solaire. Les réservoirs d'eau chaude et les sels fondus sont des technologies émergentes qui présentent une autonomie satisfaisante et une capacité de stockage intéressante.

Le stockage mécanique, tel que le volant d'inertie, offre une solution pour le stockage à long terme de l'énergie solaire. Il s'agit essentiellement d'un rotor qui tourne à une vitesse très élevée, dépassant souvent les 10 000 tours par minute, et qui peut être utilisé pour stocker l'énergie cinétique. Ce système présente l'avantage d'avoir un nombre de cycles de charge et de décharge très élevé, ce qui le rend adapté pour des applications où une longue durée de vie et une grande fiabilité sont essentielles. [9]

Les batteries à hydrogène représentent une nouvelle technologie de stockage de l'énergie solaire. Elles proposent un stockage d'hydrogène solide, fonctionnant avec une pile à combustible et sont réputées durables, écologiques et prometteuses pour l'avenir [9]

Les technologies de stockage à air liquide (LAES) visent à stocker l'énergie sous forme de froid. L'électricité est utilisée pour refroidir et liquéfier l'air, qui est ensuite stocké en grandes quantités dans un espace réduit. Ensuite, l'air peut ensuite être réchauffé pour produire de l'électricité. [10]

Enfin, des chercheurs ont développé des systèmes de stockage d'énergie solaire thermique moléculaire (MOST), qui permettent de stocker l'énergie pendant une durée de 18 ans [11].

Ces innovations dans le stockage d'énergie solaire sont cruciales pour l'équilibre entre la production et la consommation d'énergie, la réduction des pertes et l'optimisation des coûts. [12].

Elles contribuent à la transition énergétique et à l'utilisation d'énergies renouvelables pour réduire les émissions de gaz à effet de serre

2.4 Financement gouvernementale et privé

La mise en place d'une capacité de 15 000 MWe, à l'horizon 2035, comprendra 1 000 MWe qui seront installés en 2021. Ce dernier sera réalisé suite au lancement en 2021 d'un appel à investisseurs pour la construction de 1 000 MWe en photovoltaïque, conformément au décret exécutif n° 21-158 du 24 avril 2021 régissant les appels d'offres dans ce domaine. [13]

Concernant la production d'énergies renouvelables :

Il est prévu un développement et une intégration massive des productions décentralisées d'électricité solaire au niveau du réseau de distribution basse et moyenne tension. De plus, il y aura un encouragement à l'autoproduction et à l'autoconsommation dans les secteurs résidentiel et tertiaire.

Des énergies renouvelables seront produites pour des usages autonomes (hors-réseau), notamment dans les zones d'ombres où seront installés des systèmes solaires autonomes, des kits solaires individuels, et des systèmes de pompage de l'eau par énergie solaire. Un guide technique sera élaboré pour les installateurs.

Il sera également procédé au développement de l'infrastructure qualité dans le domaine de l'énergie solaire afin d'établir des normes de qualité pour les équipements, ainsi que des standards adaptés en matière de qualification des ressources humaines, installateurs, prestataires de services, et bureaux d'études. [13]

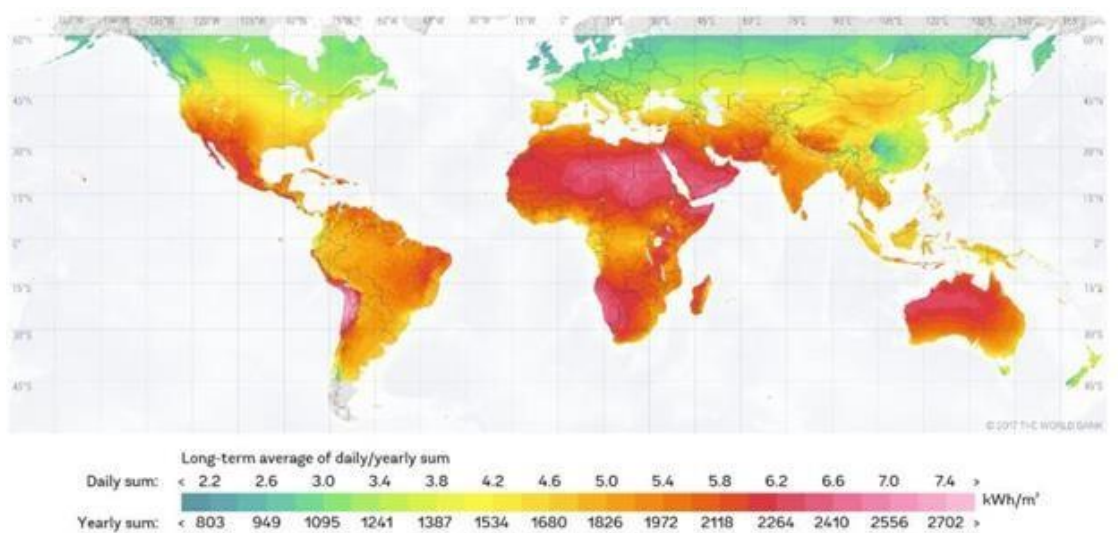
En matière du nouveau modèle énergétique

- l'optimisation technico-économique du mix énergétique sera réalisée en fonction des ressources disponibles;
- Un nouveau modèle de transition énergétique sera à élaborer dans un cadre multisectoriel ;
- Une évaluation détaillée et cartographiée des potentiels réalisables sera effectuée pour chaque filière : solaire, éolien, géothermie, valorisation énergétique des déchets, et à moyen terme, la filière nucléaire, en tant que source vierge de toute empreinte carbone, pourra être intégrée au mix énergétique à partir de 2035[13].

3. Perspectives et défis de l'énergie solaire

3.1. Perspectives de croissance du marché

En raison de sa situation géographique, l'Algérie est classée comme étant l'un des pays les mieux dotés en ressources solaires au monde et dans le bassin méditerranéen (Figure 3.1), avec une estimation de soit 169.000 TWh/an pour le solaire thermique et 13,9 TWh/an pour le solaire photovoltaïque [14].



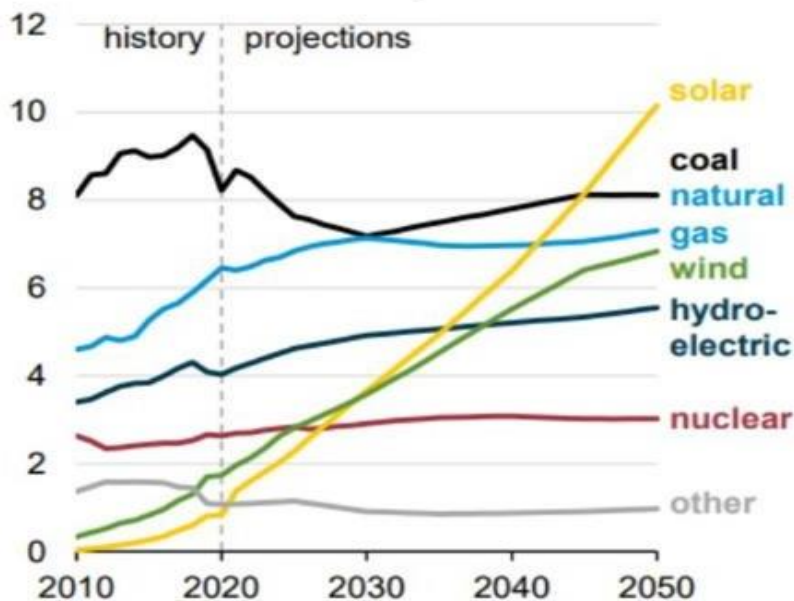
FigI.4 : Schéma des ressources solaires dans le monde

Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards GW/h par an, avec une durée d'insolation dépassant les 2000 heures annuellement sur la quasi-totalité du territoire national et peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et au Sahara [15]

L'énergie solaire reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est d'environ de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, atteignant près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au sud du pays [16].

Le potentiel solaire le plus important, couvrant 86 % de la superficie du territoire, se situe dans le sud du pays. Des études antérieures ont déjà confirmé la grande capacité du désert à recevoir de l'énergie. Par exemple, une étude menée par le physicien allemand Gérard Knies démontre que six heures d'ensoleillement du Sahara pourraient permettre de stocker suffisamment d'électricité pour l'ensemble de l'humanité pendant une année entière. Par ailleurs, une autre étude citée par un économiste algérien, Bachir Messaitfa, dans son livre *Algérie 2030-Vision prospective*, assure que le Sud algérien est capable de à satisfaire la demande mondiale en énergie électrique à une moyenne de quatre fois la consommation mondiale annuelle moyenne pendant l'année pour l'ensemble de l'humanité, tout en respectant les normes de la sécurité énergétique.

Ce vaste gisement solaire a permis à l'Algérie de prendre une avance significative dans sa transition énergétique. A long terme, cette transition entraînera une transformation profonde de la consommation énergétique du pays, le rendant de moins en moins dépendant des énergies fossiles. Cette évolution est motivée par le contexte international qui pousse les pays à renforcer leurs politiques environnementales et à lutter contre le réchauffement climatique. Et aussi pour faire face à la demande énergétique croissante du pays, ainsi que par la nécessité de répondre à la demande énergétique croissante du pays.



FigI.5 : Perspective du marché des énergies renouvelables jusqu'à 2050

3.2. Impact environnemental

Même si l'Algérie est un faible émetteur de gaz à effet de serre [17], le pays a déjà consenti à d'importants investissements pour s'adapter aux effets des changements climatiques et pour atténuer les émissions de gaz à effet de serre.

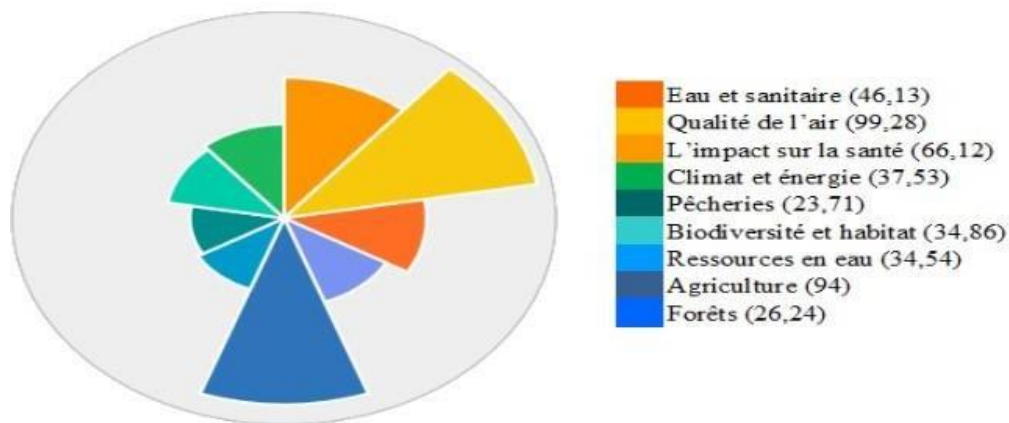
Ainsi, le pays entend poursuivre ses efforts dans ce sens, notamment après la ratification de l'Accord de Paris sur le climat adopté fin 2015 lors de la COP21. Par cet accord, l'Algérie a renouvelé sa détermination à travailler, avec l'ensemble des parties contractantes pour réaliser les objectifs de son nouveau plan climat déjà soumis, auparavant à la Convention-Cadre des Nations Unies sur le changement climatique.

Par ce nouveau plan l'Algérie s'est engagée à réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 7 % d'ici 2030. Avec le soutien extérieur, notamment en matière de financement, de transfert technologique et de renforcement des capacités, ce pourcentage pourrait atteindre 22 %. [17]

Pour atteindre cet objectif y parvenir, le pays mise principalement sur le secteur de l'énergie, responsable de 74 % de l'ensemble des émissions sectorielles selon SYMBIOSE 2017. Cette réalité constitue une motivation supplémentaire pour promouvoir les énergies renouvelables en Algérie.

À cet égard, l'Algérie s'appuie fortement sur ses réalisations dans le domaine de l'énergie solaire pour atteindre ses ambitions, grâce à son gisement solaire, parmi les plus élevés au monde.

Jusqu'à présent, les réalisations en énergie solaire ont permis de réduire les émissions de gaz à effet de serre d'environ 0.6 Mt CO₂ [18]. Cette diminution est relativement modeste par rapport aux résultats obtenus dans des expériences similaires à travers le monde. Par exemple le cas de l'Afrique du Sud qui a réussi à réduire ses émissions à hauteur de 7.884 Mt CO₂ [19] (Source : IRENA, 2019).



Source : <http://epi.yale.edu/epi/country-profile/algeria>, consulté le 21/03/2015

Fig I.6: Impact environnemental de l'énergie solaire : Analyse à travers différents paramètres sous forme de camembert

3.3 Barrières réglementaires et économiques

Afin d'atteindre les objectifs, notamment en ce qui concerne le développement de l'énergie solaire, des structures de soutien et des dispositifs d'accompagnement ont été mis en place, ainsi qu'un cadre juridique favorable, comme suit :

3.3.1 Mise en place d'un ensemble de textes législatifs et réglementaires encadrant le développement des énergies renouvelables en Algérie.

➤ Mise en place des Structures d'appui

- Création des centres de recherche affiliés aux entreprises, tels que le CREDEG, filiale du Groupe Sonelgaz, l'Agence de Promotion et de Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE) et une société filiale de Sonelgaz spécialisée dans la réalisation des projets d'énergies renouvelables (SKTM).
- Création de centres de recherche spécialisés dans le domaine des énergies renouvelables, tels que le CDER et ses filiales, CRTSE, CREDEC, et l'URMER.
- Création du ministère de l'Environnement et des Énergies renouvelables en 2017.

Il est donc important de veiller à la coopération entre ces différents acteurs en vue de développer les technologies et les procédés innovants en matière d'énergies renouvelables.

3.3.2 Mesures d'incitations financières et fiscales

- Mise en place d'avantages financiers, fiscaux et de droits de douane pour les actions et projets visant à promouvoir les énergies renouvelables. Par exemple : réduction des droits de douane, réduction de la TVA, système de soutien des prix aux investissements.

- Création du Fonds National pour la Maîtrise de l'Energie, des Energies Renouvelables et la Cogénération (FNMEERC), alimenté annuellement de 1 % de la redevance pétrolière et du produit de certaines taxes [20].

Les avancées technologiques dans le domaine des batteries solaires comprennent les batteries à flux redox, des batteries à base de sel et des batteries nickel-métal hydrure. Cependant, ces types de batteries sont moins courants dans les systèmes solaires commerciaux.

3.4 Défis techniques et économiques

Les défis techniques et économiques de l'énergie solaire en Algérie sont nombreux, malgré les efforts déployés pour promouvoir cette source d'énergie renouvelable.

Sur le plan technique, l'un des principaux défis réside dans la nécessité de garantir la qualité et la durabilité des installations photovoltaïques. Cela implique de veiller à ce qu'elles soient correctement conçues, installées et entretenues pour assurer une production d'électricité fiable et efficace. De plus, l'intégration des systèmes solaires dans le réseau électrique existant peut poser des défis en termes de gestion de la production intermittente et de la stabilité du réseau. D'un point de vue économique, bien que les coûts de la technologie photovoltaïque aient considérablement diminué ces dernières années, il reste essentiel de garantir la rentabilité des investissements dans ce secteur, notamment en optimisant les coûts d'installation et de maintenance des installations solaires [21].

De plus, la transition vers une économie basée sur les énergies renouvelables nécessite des investissements importants en infrastructures et en capacités de production, ce qui peut représenter un défi financier pour le pays. En outre, la dépendance historique de l'Algérie aux énergies fossiles, en particulier le gaz naturel, constitue un défi majeur pour la transition vers une plus grande utilisation de l'énergie solaire. La diversification du mix énergétique et la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles nécessitent une planification stratégique à long terme et des politiques cohérentes pour encourager l'adoption de l'énergie solaire à grande échelle.

En somme, bien que l'Algérie ait un potentiel solaire considérable et des initiatives prometteuses en matière d'énergie solaire, relever les défis techniques et économiques associés à cette transition énergétique reste essentiel pour maximiser les avantages de cette source d'énergie propre et renouvelable.

4. Conclusion

Dans ce premier chapitre, des généralités sur l'énergie solaire ont été données, une description de l'état actuel de l'énergie solaire, recherche et développement dans ce domaine ainsi que les perspectives et les défis du future.

1. Introduction

Le système photovoltaïque repose sur l'effet photovoltaïque, par lequel les photons de la lumière solaire stimulent les électrons dans les semi-conducteurs, générant ainsi un courant électrique. Les panneaux solaires sont constitués de cellules solaires qui transforment la lumière du soleil en électricité. Afin de comprendre et optimiser le comportement des panneaux solaires nous allons modéliser le système PV. Ce chapitre vise à présenter les principes de base de la modélisation des systèmes photovoltaïques, ainsi que les approches et les modèles utilisés pour comprendre et optimiser leur fonctionnement.

2. Modélisation du gisement solaire

Le gisement solaire représente la quantité d'énergie solaire disponible pour être captée par des systèmes photovoltaïques ou solaires thermiques, Il est influencé par la position géographique, l'inclinaison et l'orientation des panneaux solaires, ainsi que les conditions météorologiques locales. Selon une étude de l'International Renewable Energy Agency (IRENA), la Terre reçoit en continu environ 173 000 térawatts (TW) d'énergie solaire, ce qui est largement supérieur aux besoins énergétiques mondiaux actuels. Le potentiel solaire varie selon la localisation :

- **Zones équatoriales** : reçoivent une irradiation solaire élevée toute l'année.
- **Régions tempérées** : bénéficient d'un bon potentiel solaire.
- **Régions polaires** : reçoivent le moins de rayonnement solaire.

Les facteurs influençant le gisement solaire incluent la latitude, l'altitude, le climat et les saisons. Les technologies de capture de l'énergie solaire comprennent les panneaux photovoltaïques (PV), qui convertissent directement la lumière du soleil en électricité, et les systèmes solaires thermiques, qui utilisent la chaleur du soleil. Par exemple, selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE), l'Espagne a un potentiel solaire de 1 500 à 2 000 kWh/m² par an, tandis que les Émirats Arabes Unis bénéficient de plus de 2 200 kWh/m² par an.

2.1. Modèle du rayonnement solaire :

A. Rayonnement solaire sur un plan horizontal

Après son passage à travers l'atmosphère, le rayonnement solaire subit plusieurs phénomènes d'atténuation, notamment l'absorption, la diffusion, et la multi-réflexion par les différents constituants de l'atmosphère. Par conséquent, le rayonnement solaire atteint la surface de la Terre sous diverses formes :

- **La composante directe** : Le rayonnement solaire qui atteint directement la surface sans déviation.
- **La composante diffuse** : le rayonnement solaire dispersé dans l'atmosphère avant d'atteindre la surface.
- **La composante globale** : Pour un plan horizontal situé en un point de la surface de la Terre, il s'agit de la somme des composantes directe et diffuse.
- **La composante réfléchie** : Pour une surface inclinée, aux composantes diffuse et directe s'ajoute le rayonnement réfléchi par le sol.

❖ **Rayonnement direct B_h**

L'éclairement dû au rayonnement direct est la composante provenant directement du disque solaire, avec des rayons parallèles entre eux, formant ainsi un flux. Ce rayonnement constitue la part la plus importante de l'éclairement solaire en condition de ciel clair et s'atténue considérablement sous un ciel couvert. L'éclairement direct reçu par un plan horizontal se calcule selon l'équation (II.1).

$$B_h = B_n \cdot \sin h \quad (\text{II.1})$$

Avec :

B_n : Eclairement dû au rayonnement direct reçu par une surface normale au faisceau du rayonnement solaire.

h : Hauteur du soleil

❖ **Rayonnement diffus D_h**

Lors de sa traversée des différentes couches de l'atmosphère, le rayonnement solaire subit plusieurs phénomènes d'atténuation, notamment :

- **Absorption par les principaux constituants de l'atmosphère :**
 - Vapeur d'eau,
 - Ozone,
 - Oxygène.

- **Diffusion par les différents constituants de l'atmosphère :**
 - Diffusion moléculaire, impliquant les molécules telles que l'oxygène et l'azote,
 - Diffusion par les particules solides en suspension dans l'atmosphère, telles que les grains de poussière, les particules de sable, les gaz d'échappement des usines industrielles, ainsi que les poussières dégagées par les concasseurs de carrière.
- **Phénomène de multi-réflexion terre – atmosphère :**
 - Une partie du rayonnement solaire arrivant au sol est réfléchi vers l'atmosphère. Une partie de ce rayonnement réfléchi subit à nouveau les différents phénomènes d'atténuation, tandis qu'une autre partie est réfléchi par la pellicule gazeuse de l'atmosphère et atteint la surface de la Terre. Ce processus de multi-réflexion se poursuit jusqu'à l'atténuation totale de l'onde électromagnétique.

Ces phénomènes donnent naissance à la composante diffuse du rayonnement solaire. Pour modéliser cette composante diffuse sur un plan horizontal, plusieurs modèles solaires sont proposés. À titre d'exemple, nous mentionnons le modèle proposé par [22], dont l'équation est la suivante :

$$D_h = \{0.775 + 0.00606(W + 90^\circ) - [0.505 + 0.00455(W + 90^\circ)] \cos(115KT - 10III)\} G \quad (\text{II.2})$$

Avec :

D : Le rayonnement solaire diffus, exprimé en W/m^2 . W : L'angle horaire, exprimé en degrés.

KT : Indice de clarté, défini comme le rapport de l'irradiation globale mesurée sur un plan horizontal à l'irradiation globale calculée sur le même plan.

G : L'irradiation globale mesurée sur un plan horizontal, exprimée en W/m^2 .

$$G = G_0 [0.29 \cos(L) + 0.52\sigma] \quad (\text{II.3})$$

Où :

- L : Représente la latitude du lieu considéré, exprimée en degrés.
- σ : La fraction d'insolation, définie comme le rapport entre la durée d'insolation mesurée au sol (par la BOULE sphérique de Campbell Stocks) et la durée théorique du jour.

Avec :

- G_0 : L'irradiation journalière sur un plan horizontal placé au-dessus de l'atmosphère, exprimée en W/m^2 .

❖ Rayonnement réfléchi R_h

Une fois arrivé sur la surface de la Terre, une partie du rayonnement solaire est absorbée tandis qu'une seconde partie est réfléchie dans toutes les directions. Ainsi, la quantité de rayonnement solaire réfléchi par le sol dépend principalement de sa capacité de réflexion, laquelle est influencée par les constituants du sol et son état de surface. Cette capacité est caractérisée par un paramètre appelé albédo.

L'albédo est défini par l'équation suivante :

$$\text{albédo} = \frac{\text{rayonnement solaire réfléchi par le sol}}{\text{rayonnement solaire incident sur le sol}} \quad (II. 4)$$

Sur le tableau (II.1), sont présentées quelques valeurs d'albédo pour différents types de surface du sol :

Tableau (II.1) : valeurs d'albédo pour quelques constituants de la couverture du sol. [23]

Type de surface	Albédo
Neige fraîche	0,80 - 0,90
Glace	0,50 - 0,70
Sable sec	0,40 - 0,45
Herbe	0,20 - 0,25
Forêt dense	0,10 - 0,15
Océan (surface calme)	0,06 - 0,10
Asphalte	0,04 - 0,05

Ces valeurs d'albédo illustrent comment différents matériaux réfléchissent différemment le rayonnement solaire incident. L'albédo est un facteur crucial dans la détermination de la quantité de chaleur absorbée par le sol et dans les études climatiques.

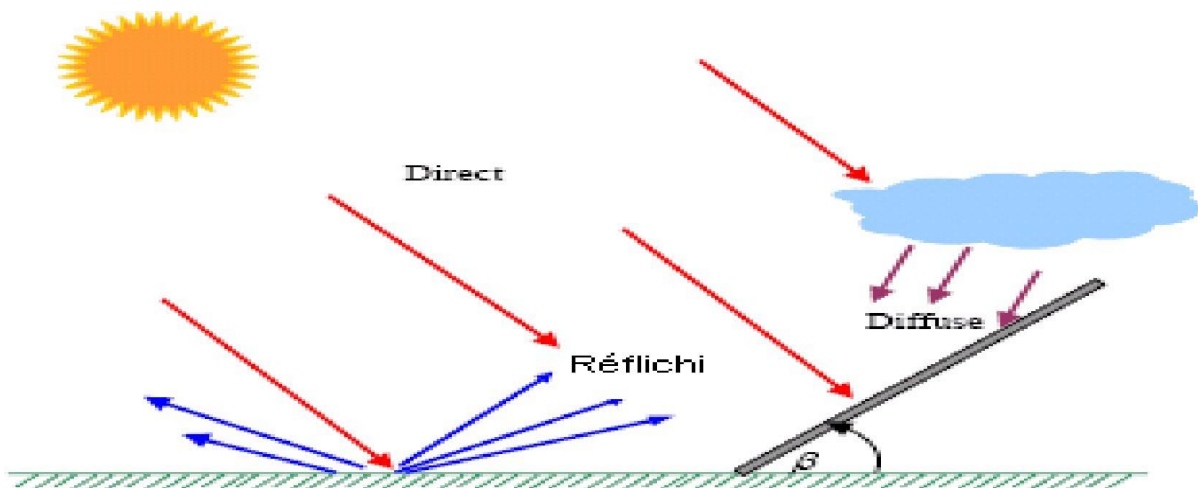
❖ Rayonnement global Gh

Le rayonnement solaire global sur une surface horizontale est la somme des composantes directes et diffuse du rayonnement solaire provenant du soleil. Cela inclut la composante verticale du rayonnement solaire direct ainsi que le rayonnement solaire diffus [24].

$$G_h = D_h + B_h \quad (II.5)$$

A. Rayonnement solaire sur un plan incliné

Par rapport à l'horizontale avec un angle β , une surface inclinée reçoit non seulement les composantes du rayonnement direct et diffus, mais également une partie de la puissance énergétique réfléchie par le sol. Cette quantité dépend principalement de l'albédo du sol et de l'inclinaison du plan de la surface considérée [25].



FigII.1 : Les trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné

❖ Eclairement du Rayonnement direct B_{in}

Dans le cas de la disponibilité de l'éclairement dû au rayonnement direct, il suffit de multiplier l'éclairement du rayonnement direct sur un plan normal par le cosinus de l'angle d'incidence sur plan considéré. C'est ce qui se traduit par la relation suivante :

$$B_{in} = B_n \cdot (\theta_i) \quad (II.6)$$

Où :

θ_i : angle d'incidence, défini comme l'angle formé par la normale sortante du plan de la surface considérée et le vecteur directionnel du flux solaire direct.

B_n : composante du rayonnement solaire incident sur le plan normal au faisceau solaire. Dans le cas où seuls l'éclairement global et diffus sont disponibles, cette composante peut être calculée comme suit :

$$B_{in} = R_b \cdot (G_h - D_h) \quad (II.7)$$

R_b est appelé facteur de forme, défini à son tour par la relation suivante :

$$R_b = \frac{\cos \cos(\theta_i)}{\sin(h)} = \frac{\cos \cos(\varphi - \beta) \cos \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin \sin(\varphi - \beta) \sin(\delta)}{\cos \cos(\varphi) \cos \cos(\delta) \cos(\omega) + \sin \sin(\varphi) \sin(\delta)} \quad (II.8)$$

❖ **Eclairement dû au Rayonnement diffus D_{in}**

L'éclairement diffus sur un plan incliné est évalué par la relation suivante :

$$D_{in} = D_h \left(\frac{1 + c(\beta)}{2} \right) \quad (II.9)$$

Avec :

D_h : la composante de l'éclairement dû au rayonnement diffus incident sur un plan horizontal
 β : l'inclinaison de la surface du capteur par rapport à l'horizontal.

❖ **Rayonnement réfléchi R_{in}**

L'éclairement dû au rayonnement réfléchi par le sol et incident sur une surface inclinée est exprimé par la relation suivante :

$$R_{in} = \rho \frac{G_h(1 - c(\beta))}{2} \quad (II.10)$$

Avec :

ρ : est l'albédo du sol ;

G_h : est l'éclairement dû au rayonnement global incident sur une surface horizontale ; β : est l'inclinaison de la surface du capteur ;

❖ **Rayonnement global sur un plan incliné G_{in}**

L'éclairement dû au rayonnement global incident sur un plan incliné constitue la somme des trois composantes du rayonnement solaire, et il est quantifié par la relation suivante :

$$G_{in} = B_{in} + D_{in} + R_{in} \quad (II.11)$$

C'est ce que reçoit effectivement un panneau photovoltaïque installé en un point quelconque de la surface de la Terre, et nous allons maintenant présenter sa modélisation dans ce qui suit.

3. Modélisation d'un générateur photovoltaïque

La modélisation d'un générateur photovoltaïque consiste à représenter mathématiquement le comportement d'un ensemble de cellules photovoltaïques (PV) pour prédire leur performance sous différentes conditions. Cette modélisation est essentielle pour concevoir, optimiser et analyser les systèmes solaires.

3.1. Définition d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque, également appelée cellule solaire, est un composant électronique qui produit de l'électricité lorsqu'elle est exposée à la lumière, grâce à l'effet photovoltaïque. Cet effet, au cœur du fonctionnement d'une cellule solaire, permet de capter l'énergie lumineuse sous forme de photons et de la convertir en énergie électrique par le déplacement de charges positives et négatives. Une fois transféré dans un circuit électrique externe, ce déplacement de charges se manifeste sous forme de courant électrique continu.

La figure (II.2) donne un aperçu d'une cellule photovoltaïque :

- Elle se présente généralement sous forme d'une fine plaque d'environ dix centimètres de côté.
- Composée de couches minces de silicium superposées, d'une épaisseur de l'ordre du millimètre.
- Elle est équipée d'une couche antireflet en surface.
- Sous un éclairage donné, elle est caractérisée par une courbe courant-tension (I-V) qui définit ses grandeurs physiques : tension à vide (V_{oc}), courant de court-circuit (I_{sc}) et point de puissance maximale (MPPT).

Les cellules sont fréquemment assemblées en modules photovoltaïques ou panneaux solaires, en fonction de la puissance électrique désirée.

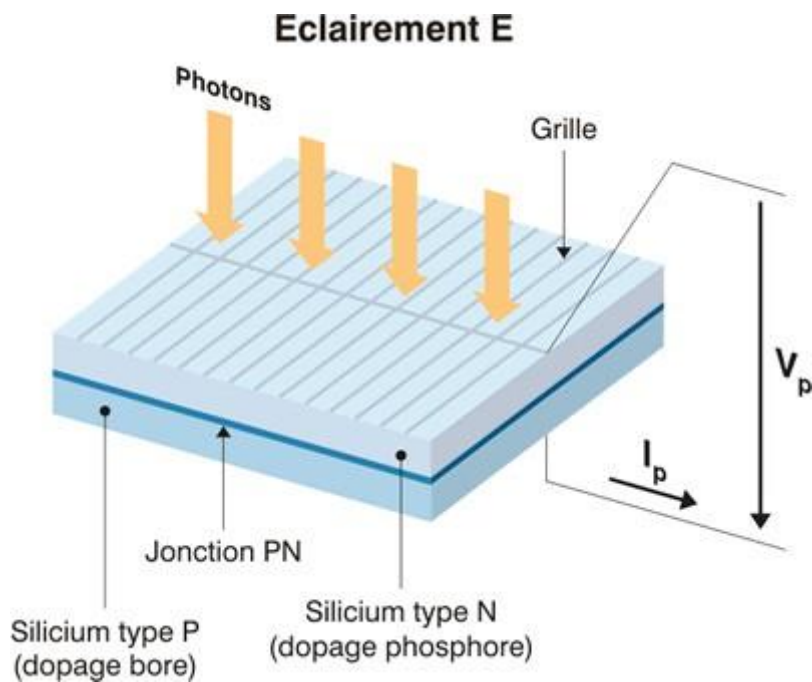


Fig II.2 : Schéma synoptique d'une cellule photovoltaïque

3.2. Caractéristique électrique et paramètres de la cellule solaire

Le tracé des caractéristiques I(V) d'une cellule solaire est représenté sous éclairage et dans l'obscurité.

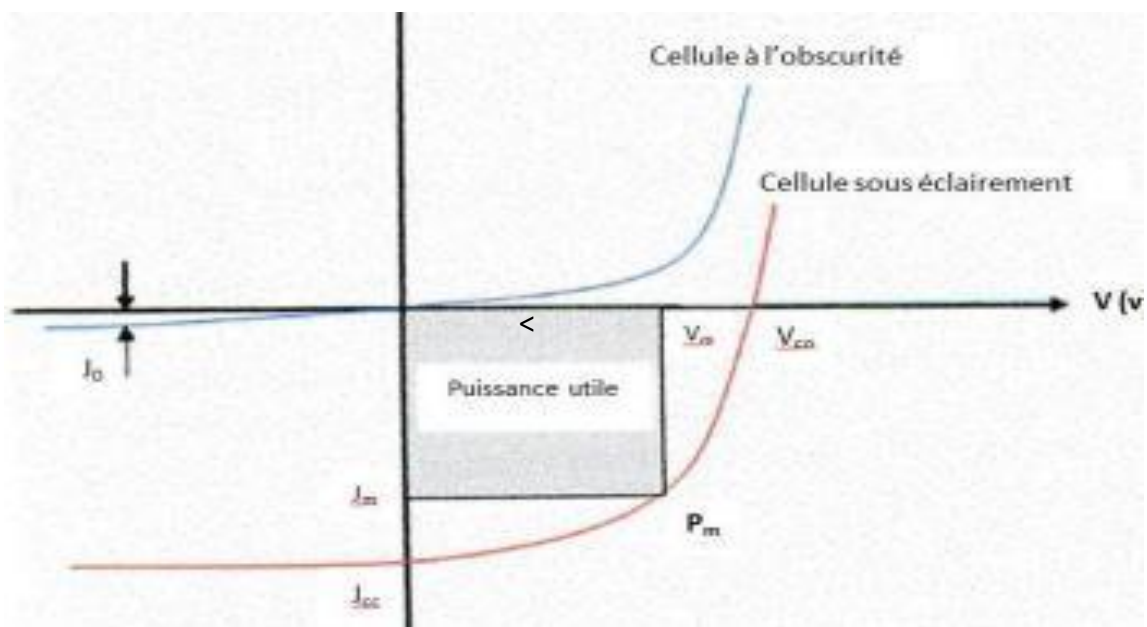


Fig II.3: tracé des caractéristiques I-V d'une cellule solaire

A partir de la caractéristique I(V) de la cellule solaire, on déduit les paramètres photovoltaïques propres à la cellule et notamment :

✓ Rendement de conversion d'énergie (η):

La relation entre la puissance produite et la puissance du rayonnement solaire incident P_{inc} est représentée. Le rapport entre la puissance maximale fournie (P_{max}) et la puissance du rayonnement solaire incident (P_{inc}) est appelé rendement. [26]

$$n = \frac{P_{max}}{P_{in}} \quad (II.12)$$

Facteur de forme F_f

Le rapport entre la puissance maximale fournie par la cellule P_{max} et le produit du courant de court-circuit I_{cc} par la tension de circuit ouvert V_{oc} , également connu sous le nom de facteur de remplissage (fill factor), correspond à la puissance maximale d'une cellule solaire idéale. Ce facteur témoigne de la qualité de la cellule ; il est généralement autour de 0,7 pour les cellules performantes, et diminue avec l'augmentation de la température. Il illustre comment les pertes sont influencées par les résistances parasites R_s et R_{sh} [27].

✓ La tension en circuit ouvert (V_{co})

La tension de circuit ouvert d'une cellule solaire représente la tension maximale qu'elle peut fournir lorsqu'elle est éclairée mais non connectée à un circuit électrique. Cette tension V_{CO} est donnée par la relation :

$$F_F = \frac{P_{max}}{V_{CO} \times I_{CC}} = \frac{V_{max} \times I_{max}}{V_{CO} \times I_{CC}} \quad (II.13)$$

✓ La tension en circuit ouvert (V_{co})

La tension de circuit ouvert d'une cellule solaire représente la tension maximale qu'elle peut fournir lorsqu'elle est éclairée mais non connectée à un circuit électrique. Cette tension V_{oc} est donnée par la relation

$$V_{CO} = \frac{Kt}{a} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) \quad (II.14)$$

Pour un fort éclairement

$$\frac{I_{ph}}{I_{cc}} \gg 1 \Rightarrow V_{CO} = \frac{Kt}{a} \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s}\right) \quad (II.15)$$

✓ Le courant du court-circuit (I_{CC})

Le courant de court-circuit d'une cellule solaire correspond au courant qui la traverse lorsqu'elle est exposée à un flux de photons sans qu'une tension ne soit appliquée ($V=0$). Ce courant

I_{CC} augmente en fonction de l'intensité de l'éclairage de la cellule et est influencé par la surface éclairée, la longueur d'onde du rayonnement, la mobilité des porteurs et la température [28].

Le courant de court-circuit I_{CC} est utilisé pour évaluer le rendement d'une cellule photovoltaïque. Il est également crucial pour déterminer la puissance maximale que peut produire la cellule, ce qui est essentiel pour optimiser son fonctionnement.

3.3. Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire

L'éclairage d'une cellule solaire provoque l'apparition d'un courant photogénéré I_{ph} . Par conséquent, le modèle électrique d'une cellule solaire optimale comprendra un générateur de courant d'une valeur I_{ph} , qui permet la circulation de l'énergie, ainsi qu'une diode en parallèle qui assure la jonction PN (voir figure II.4) [29].

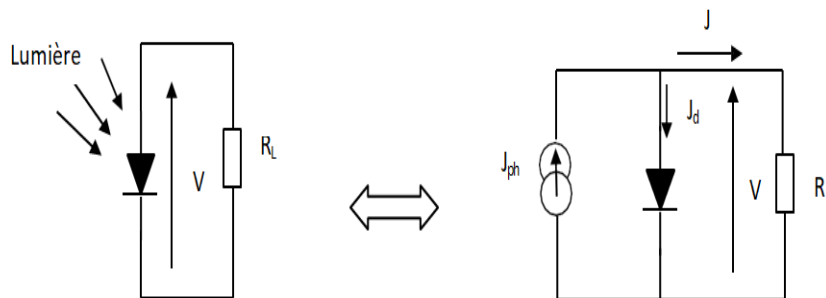


Fig II.4: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque

3.4 Modèle mathématique d'une cellule PV

L'équation principale qui décrit le courant généré par la cellule photovoltaïque en fonction de la tension à ses bornes (V) est donnée par :

Equation de courant :

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V + I \cdot R_{sn}}{n \cdot V_T}\right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \quad (II.16)$$

où :

- I : Courant généré par la cellule.
- n : Facteur d'idéalité de la diode (généralement proche de 1).
- V_T : Tension thermique ($V_T = kT/q$, où k est la constante de Boltzmann, T la température absolue, et q la charge de l'électron).
- I_{ph} : Courant généré par la lumière (fonction de l'irradiance solaire)
- I_0 : Courant de saturation de la diode
- R_s : Résistance série du module
- R_p : Résistance parallèle (ou de shunt)

3.5 Modélisation d'un module PV

Un module photovoltaïque est constitué de plusieurs cellules connectées en série et/ou en parallèle.

- **Connexions en série** : Augmente la tension totale du module.

$$V_{\text{module}} = N_s \cdot V_{\text{cellule}} \quad (II.17)$$

où N_s est le nombre de cellules en série.

- **Connexions en parallèle** : Augmentent le courant total du module.

$$I_{\text{module}} = N_p \cdot I_{\text{cellule}} \quad (II.18)$$

Où N_p est le nombre de cellules en parallèle.

3.5.1. Assemblage en série

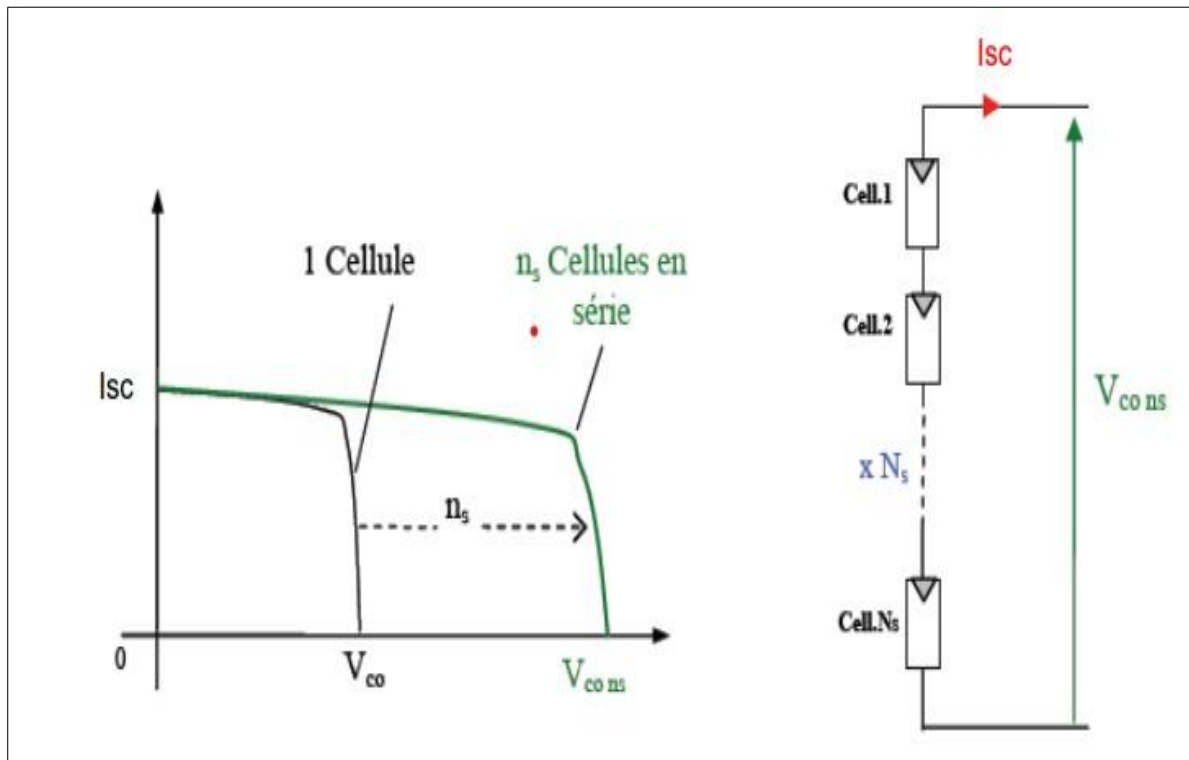
Une série de N_s cellules permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque, ce qui entraîne une augmentation de la puissance électrique du panneau. Ainsi, les cellules sont parcourues par le même courant.

L'équation (II.19) [30] définit les caractéristiques électriques d'une association de N_s cellules en série :

$$V'_{co} = N_s \times V_{co} \quad (II.19)$$

Le terme " V_{co} ", dans le contexte des cellules solaires photovoltaïques, désigne la tension du circuit ouvert.

En général, ce système d'association est le plus couramment employé pour les modules photovoltaïques commercialisés. Avec l'avancée technologique, la surface des cellules augmente, ce qui entraîne généralement une augmentation du courant généré par une seule cellule. [31]



FigII.5: Caractéristique résultant d'un regroupement de N_s cellules en série

3.5.2. Assemblage en parallèle

D'une autre part, il est envisageable d'associer simultanément des cellules photovoltaïques NP, ce qui permet d'augmenter le courant de sortie produit par le générateur photovoltaïque. Au sein d'un ensemble de cellules identiques reliées simultanément. La soumission des cellules à la même tension. En outre, la particularité obtenue par le groupement est généralement obtenue en additionnant tous les courants des cellules qui composent le générateur photovoltaïque. [32]

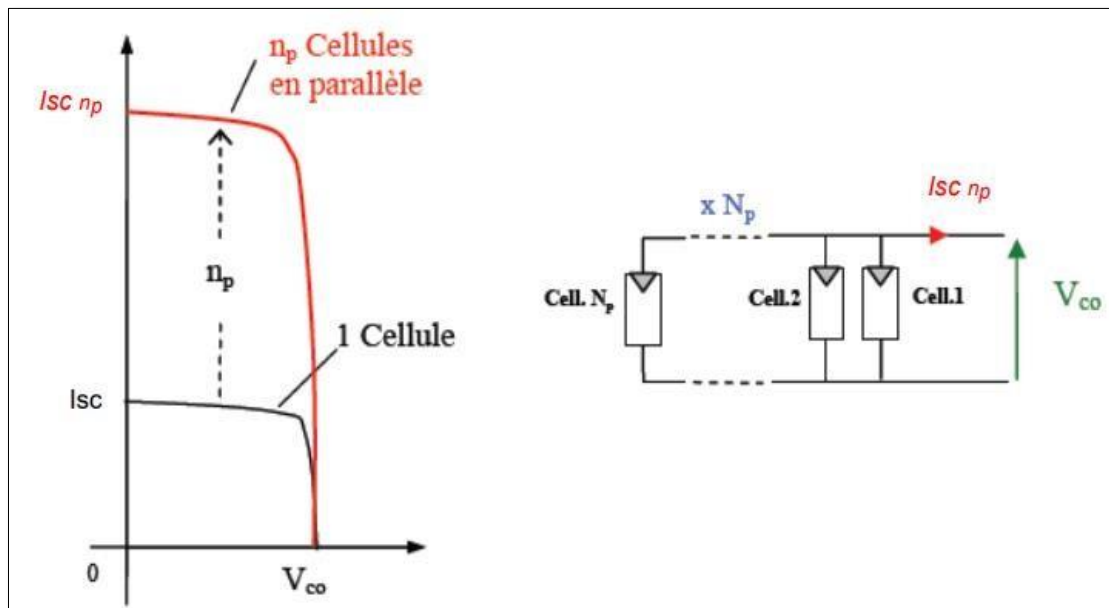


Fig II.6: Caractéristique résultant d'un regroupement de N_s cellules en série

3.5.3. Assemblage mixte

Le montage mixte en série/parallèle des panneaux solaires est une approche efficace pour maximiser la production d'énergie solaire tout en assurant la fiabilité et la sécurité du système. Il permet de combiner les avantages de la haute tension des montages en série avec la capacité de courant accrue des montages en parallèle, tout en minimisant les effets néfastes des défauts individuels des cellules grâce à l'utilisation de diodes bypass. [33]

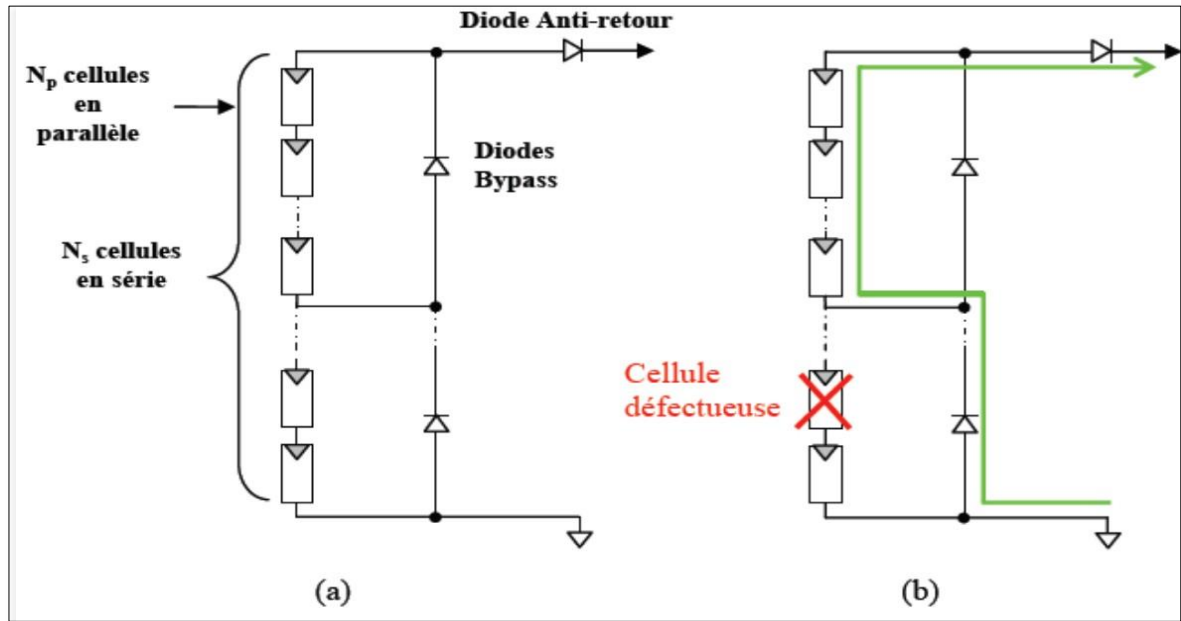


Fig II.7: Caractéristique résultant d'un regroupement mixte

3.6. Conditions environnementales

La performance d'un générateur PV dépend fortement des conditions environnementales :

- **Irradiance solaire (G)** : Plus l'irradiance est élevée, plus le courant généré ($I_{ph} I_{ph}$) est important.
- **Température (T)** : L'augmentation de la température réduit la tension de sortie (V_{oc}) du module.

La relation entre l'irradiance et le courant photogénéré est linéaire :

$$I_{ph} = G G_{ref} \cdot I_{phref}$$

où G_{ref} et I_{phref} sont respectivement l'irradiance et le courant photogénéré de référence.

4 Modélisation d'un régulateur de charge

La modélisation d'un régulateur dans un système photovoltaïque (PV) autonome est cruciale pour comprendre et optimiser son fonctionnement. Cette modélisation permet de simuler le comportement du régulateur sous différentes conditions et de prévoir les performances du système. Voici une approche détaillée pour modéliser un régulateur de charge, en se concentrant sur les aspects clés tels que les caractéristiques électriques, les algorithmes de régulation, et les interactions avec les autres composants du système PV.

4.1 Modèle Mathématique du Régulateur de Charge

a. Modèle de Base pour PWM

1. Tension de Sortie du Panneau V_{pv}
2. Courant de Sortie du Panneau I_{pv}
3. Tension de la Batterie V_{bat}
4. Courant de la Batterie I_{bat}
5. Rapport Cyclique D

Équations Fondamentales

- **Énergie Entrante** (du panneau vers le régulateur):

$$P_{in} = V_{pv} \times I_{pv} \quad (II.20)$$

- **Énergie Sortante** (du régulateur vers la batterie):

$$P_{out} = V_{bat} \times I_{bat} \quad (II.21)$$

- **Régulation par PWM**

$$V_{bat} = D \times V_{pv} \quad (II.22)$$

b. Modèle de Base pour MPPT

1. Tension à la Puissance Maximale V_{mppt}
2. Courant à la Puissance Maximale I_{mppt}
3. Tension Instantanée V_{inst}
4. Courant Instantané I_{inst}

Équations Fondamentales

- **Suivi de la Puissance Maximale** : $P_{max} = V_{mppt} \times I_{mppt}$
- **Conditions** : $dP/dV = \text{Condition de point de puissance maximale}$
- **Algorithme de Perturbation et Observation (P&O)** :
 - Perturber la tension et observer la variation de puissance.
 - Ajuster la tension pour maximiser la puissance.

Pourquoi utiliser un convertisseur MPPT ?

Dans notre projet, nous avons utilisé un convertisseur MPPT. La figure ci-dessous le présente. En raison des fluctuations régulières de la température et de l'irradiation, la puissance maximale d'un système photovoltaïque varie proportionnellement. Afin d'optimiser le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque, il est essentiel d'extraire en permanence la puissance maximale

avant de la transférer vers un optimiseur dynamique, également connu sous le nom de convertisseur DC-DC. Comme son nom l'indique, le MPPT surveille continuellement le point de puissance maximale et intègre un algorithme qui ajuste constamment la tension aux bornes du générateur photovoltaïque pour se rapprocher de ce point, sans toutefois l'atteindre précisément. La gestion et le contrôle du suivi sont assurés par le rapport cyclique D du convertisseur DC-DC.

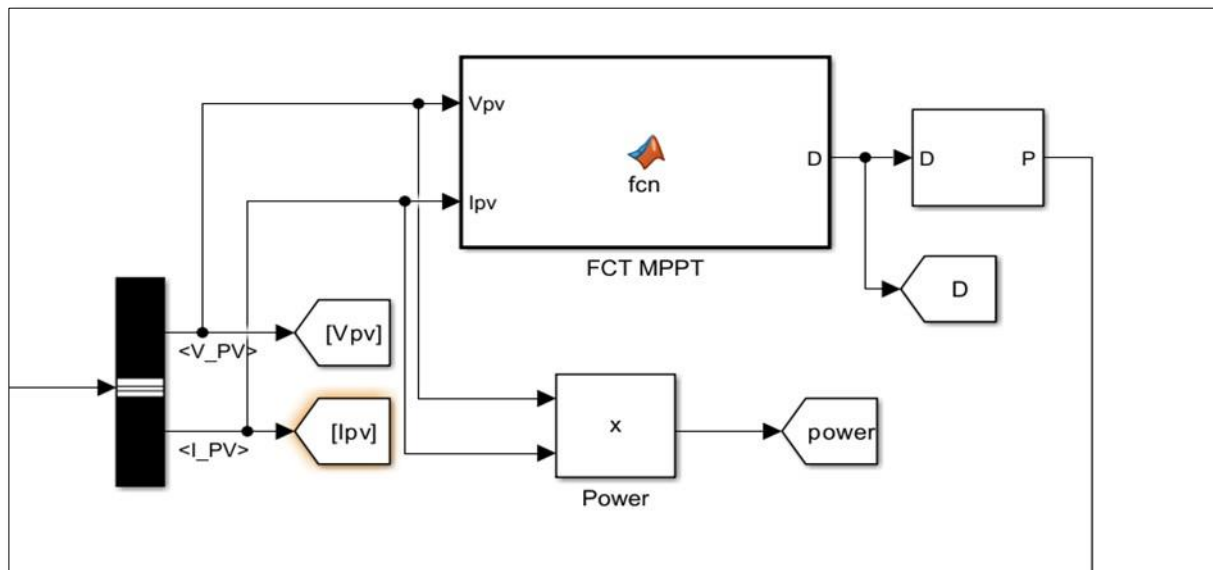


Fig II.8: Schéma d'un MPPT en matlab simulink

5. Modélisation de batterie

5.1. Modèle électrochimique d'une batterie

Les batteries solaires reposent sur un principe électrochimique qui consiste à inverser les charges entre une électrode positive (la cathode) et une électrode négative (l'anode).

En général, la cathode est constituée de lithium et d'oxyde de cobalt, tandis que l'anode est constituée de carbone ou de graphite.

Pendant la production d'énergie par les panneaux solaires, les électrons sont conservés dans les batteries solaires.

Le lithium sert à conserver l'énergie électrique en raison de sa densité énergétique élevée et de son potentiel électrochimique considérable.

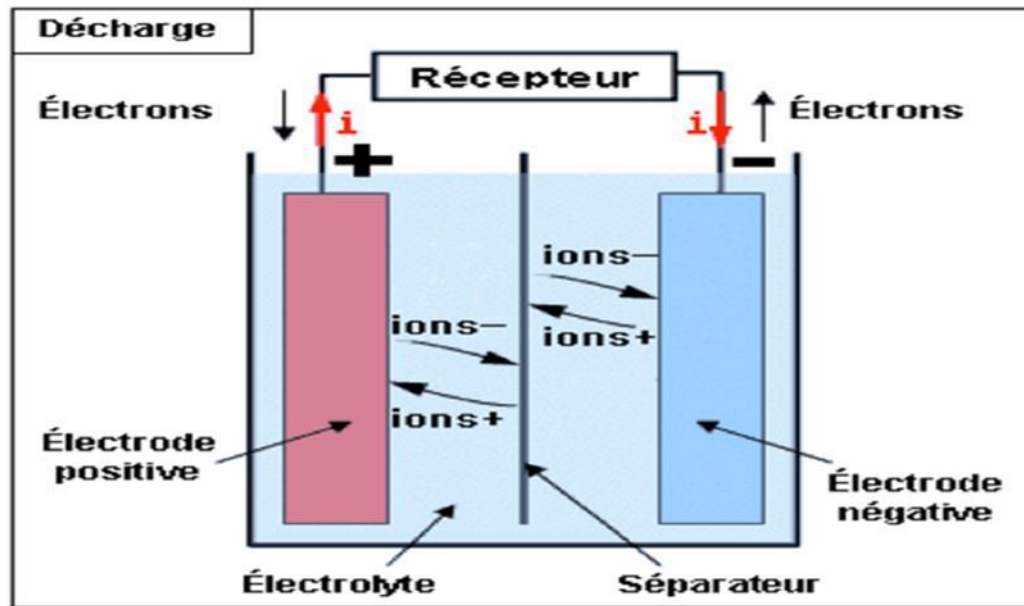


Fig II.9 : modèle électrochimique d'une batterie

Il est essentiel de contrôler la charge des batteries solaires afin d'éviter les surcharges et les décharges excessives.

Les dispositifs de régulation de charge servent à réguler la charge et la décharge des batteries, assurant ainsi leur longévité et leur sécurité.

Les batteries solaires ont une durée de vie plus courte que les panneaux photovoltaïques, mais leur durée de vie augmente avec les avancées technologiques.

La stabilité des batteries lithium-ion est supérieure à celle des batteries ioniques, mais il est essentiel de réguler la charge afin d'éviter les décharges excessives.

Étant donné la grande variété de types d'éléments de batterie et le nombre très variable de paramètres qui y sont impliqués, il est possible d'établir une représentation très empirique du comportement de la batterie

Dans cette étude, nous avons utilisé un modèle de batterie GEL de 200 Ah et 12V, typiquement employé dans les installations photovoltaïques pour le stockage de l'énergie. La figure ci-dessous illustre le schéma synoptique d'une telle batterie intégrée dans un système photovoltaïque.

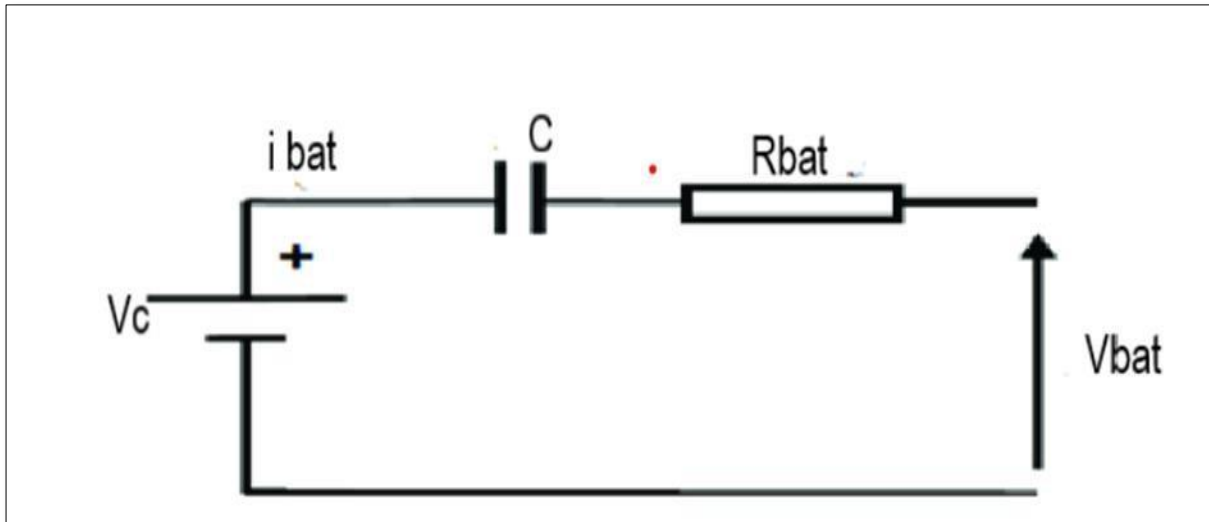


Fig II.10 : Schéma synoptique d'une batterie V_c : source de tension idéale d'entrée ;

V_{bat} : tension aux bornes de la batterie ; I_{bat} : courant développé par la batterie ;

R_{bat} : résistance interne variable de la batterie ;

C : Capacité nominale de la batterie en ampères-heures (Ah).

5.2 Modèle Mathématique de la Batterie GEL 200 Ah 12V

Pour modéliser une batterie GEL de 200 Ah 12V dans une installation photovoltaïque, nous nous basons sur des équations électriques standard qui décrivent le comportement dynamique de la batterie en fonction des états de charge (SoC), des courants de charge/décharge, et de la température. Les paramètres du modèle incluent la capacité de la batterie, la résistance interne, et la tension aux bornes.

a. Équations et Paramètres du Modèle

1. **Tension de Batterie** : La tension aux bornes de la batterie V_{bat} est influencée par la tension à circuit ouvert V_{oc} , la résistance interne R_{bat} et le courant de charge ou de décharge I_{bat} .

$$V_{bat} = V_{oc} - I_{bat} \cdot R_{bat} \quad (II.23)$$

2. **Tension à Circuit Ouvert V_{oc}** : Cette tension dépend de l'état de charge (SoC) de la batterie et de la température T . Elle peut être modélisée par une équation empirique ou obtenue à partir de données expérimentales spécifiques à la batterie.

$$V_{oc} = f(\text{SoC}, T) \quad (II.24)$$

$$\text{Une formule simplifiée peut prendre la forme : } V_{oc} = V_{nom} + k \cdot (1 - \text{SoC}) \quad (II.25)$$

Où V_{nom} est la tension nominale de la batterie, et k est un coefficient de pente qui dépend des caractéristiques de la batterie.

3. **État de Charge (SoC)** : Le SoC est calculé en intégrant le courant de la batterie au cours du temps :

$$\text{SoC}(t) = \text{SoC}(0) - (1/C) \int I_{\text{bat}}(\tau) dt \quad (\text{II.26})$$

4. **Résistance Interne Rbat** : La résistance interne de la batterie peut varier en fonction de la SoC et de la température T. Pour simplification, elle est souvent considérée constante dans les modèles de base :

$$R_{\text{bat}} = R_0 \quad (\text{II.27})$$

Où R_0 est la résistance interne nominale.

5. **Effet de la Température** : La température affecte la performance de la batterie. Une relation empirique est souvent utilisée pour ajuster la tension à circuit ouvert en fonction de la température.

$$V_{\text{oc}}(T) = V_{\text{oc,ref}} \cdot [1 + \beta (T - T_{\text{ref}})] \quad (\text{II.28})$$

Où β est le coefficient de température de la batterie, T_{ref} est la température de référence, et $V_{\text{oc,ref}}$ est la tension à circuit ouvert à la température de référence.

6. Modélisation d'un Onduleur DC/AC dans un Système Photovoltaïque (PV)

Un onduleur DC/AC est crucial dans un système PV pour convertir le courant continu (DC) produit par les panneaux solaires et stocké dans les batteries en courant alternatif (AC) utilisable par la plupart des appareils électriques. Voici une description détaillée de la modélisation d'un onduleur DC/AC pour un système PV autonome.

6.1. Principe de Fonctionnement de l'Onduleur

a. Conversion DC/AC

- **Entrée DC** : Provenant des panneaux solaires ou de la batterie.
- **Sortie AC** : Fournie aux appareils en respectant la fréquence et la tension standard (par exemple, 230V à 50Hz en Europe).

b. Types d'Onduleurs

1. **Onduleur à Onde Sinusoïdale Pure** : Fournit une onde sinusoïdale lisse, idéale pour les appareils sensibles.
2. **Onduleur à Onde Sinusoïdale Modifiée** : Fournit une onde approximative, généralement suffisante pour les appareils simples.
3. **Onduleur à Onde Carrée** : Utilisé dans les applications moins sensibles, mais moins efficace pour les appareils électroniques.

6.2. Modèle Mathématique de l'Onduleur

a. Modèle de l'Étage (DC/DC)

1. **Entrée** : Vdc, tension d'entrée.
2. **Sortie** : Vboost, tension boostée.

Équations Fondamentales

- **Tension de Sortie** : $V_{boost} = V_{dc} / (1-D)$ (II.29) où D est le rapport cyclique de la PWM.

b. Modèle de l'Étage d'Inversion (DC/AC)

1. **Entrée** : Vboost
2. **Sortie** : Vac, tension alternative.

Équations Fondamentales

- **Sortie Sinusoïdale** : $V_{ac}(t) = V_{peak} \cdot \sin(\omega t)$

où Vpeak est la tension de crête et ω est la fréquence angulaire.

- **Filtrage LC** :

$$L(di/dt) = V_{boost} - V_{ac} \quad (II.30)$$

$$C(dV_{ac}/dt) = i - i_{load} \quad (II.31)$$

c. Contrôle par PWM

- **Commande de Tension** : $V_{ref} = V_{peak} \cdot \sin(\omega t)$ (II.32)

● **Génération de PWM** : Comparaison de Vref avec une onde triangulaire pour générer le signal de commande.

7. La charge

Dans un système PV autonome, la charge représente la demande énergétique des utilisateurs, composée de la consommation quotidienne moyenne et des pics de demande. Une gestion efficace de la charge est essentielle pour assurer un approvisionnement continu et fiable en électricité

Dans les systèmes PV autonomes, les charges électriques peuvent être classées en deux grandes catégories : **Charges en Courant Continu (DC)** et **Charges en Courant Alternatif (AC)**. Chaque type a des caractéristiques spécifiques et des implications pour la conception et la gestion du système.

7.1 Charges en Courant Continu (DC)

Les charges en courant continu (DC) fonctionnent avec un flux d'électricité unidirectionnel et sont couramment utilisées à des tensions de 12V, 24V, ou 48V, bien que certaines applications

puissent atteindre plusieurs centaines de volts. Elles sont directement compatibles avec les systèmes photovoltaïques (PV) et les batteries qui génèrent et stockent l'énergie sous forme de courant continu. Pour répondre aux exigences spécifiques des charges, ces systèmes nécessitent souvent des régulateurs de tension ou des convertisseurs DC-DC afin d'ajuster la tension en fonction des besoins précis de l'application.

7.2 Charges en Courant Alternatif (AC)

Les charges en courant alternatif (AC) utilisent un flux d'électricité bidirectionnel, généralement sinusoïdal, avec des changements de polarité à une fréquence standard de 50 Hz (ou 60 Hz selon la région). Elles sont couramment utilisées à des tensions de 220V ou 380V, en fonction des normes régionales. Compatibles directement avec le réseau électrique, elles alimentent la plupart des appareils domestiques et industriels. Pour les systèmes solaires, qui génèrent du courant continu (DC), des onduleurs sont nécessaires pour convertir ce courant continu en courant alternatif afin d'alimenter ces charges.

7.3 Modèle de la Charge

La puissance consommée par une charge électrique est donnée par la formule :

$$P_{load} = V_{load} \times I_{load} \quad (II.33)$$

Avec

P_{load} : **Puissance (W)** I_{load} : **Courant (A)** V_{load} : **Tension (V)**

8. Conclusion

En conclusion, la modélisation des cellules, des panneaux PV et de leurs composants est un outil essentiel pour comprendre et optimiser leur fonctionnement. Elle permet de simuler et d'analyser leur comportement électrique, d'optimiser leur rendement et d'améliorer leur efficacité globale.

1. Introduction

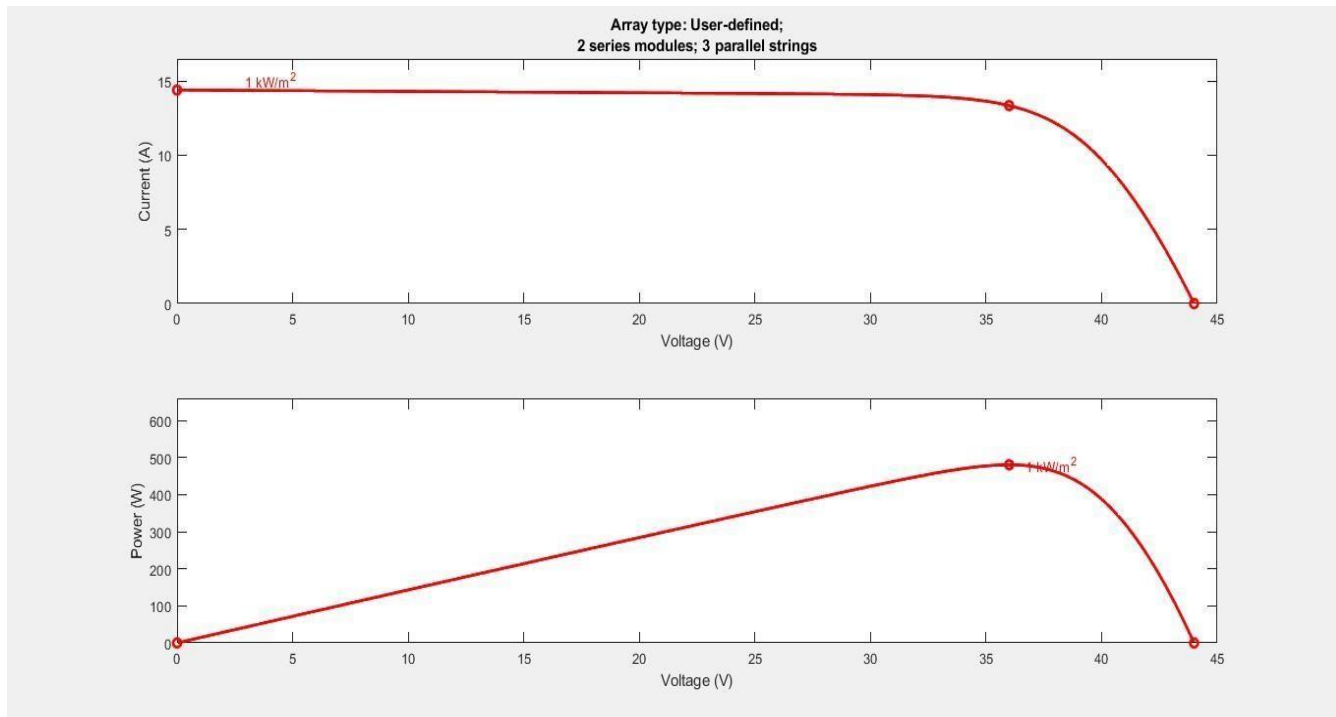
L'énergie solaire photovoltaïque joue un rôle clé dans la transition énergétique et la décarbonisation du secteur électrique. Pour optimiser le fonctionnement et la performance des installations photovoltaïques, il est essentiel de mettre en place un système de supervision efficace. Ce chapitre aborde la simulation et la mise en œuvre pratique de la supervision d'une installation photovoltaïque autonome à l'aide d'Arduino. Nous commencerons par présenter les modèles mathématiques utilisés pour simuler le fonctionnement de l'installation photovoltaïque avec MATLAB. Ensuite, nous examinerons les éléments clés de la supervision. Enfin, nous passerons à la mise en œuvre pratique en fournissant des exemples de code Arduino, avant de conclure le chapitre.

2. Simulation du système PV autonome

2.1. Présentation des modèles mathématiques utilisés pour simuler le comportement de l'installation PV autonome

Pour simuler le comportement de notre installation photovoltaïque, nous utilisons des modèles mathématiques détaillés (voir le chapitre 2). Ces modèles permettent de représenter avec précision les caractéristiques électriques du système PV. Le programme MATLAB, avec son environnement de simulation Simulink, est particulièrement adapté pour créer ces modèles. En effet, MATLAB offre des fonctionnalités puissantes pour le calcul numérique et la visualisation des résultats, facilitant ainsi la modélisation et l'analyse du système photovoltaïque.

Les caractéristiques $I=f(V)$ et $P=f(V)$ sont fondamentales pour définir le module solaire en tant que générateur. La caractéristique $I=f(V)$ est comparable à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais elle est décalée le long de l'axe des courants d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Cette caractéristique est tracée sous un éclairement fixe et une température constante.



FigIII.1 : Caractéristique (I-V), (P-V) du module photovoltaïque dans les conditions standards

La figure (III.1) montre les caractéristiques I-V et P-V du module photovoltaïque dans des conditions standards d'irradiation et de température. La réponse des modules photovoltaïques est évaluée en utilisant une intensité d'irradiation de 1000 W/m² et une température de 25°C.

Ces caractéristiques ont été obtenues grâce au bloc réalisé avec l'environnement MATLAB/Simulink, comme illustré sur la **figure III.2** ci-dessous. Les caractéristiques données par le concepteur du module photovoltaïque Geonica modèle 80S5 utilisé dans notre étude sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.1 : Caractéristiques du panneau utilisé GEONICA module :80S5

Puissance max	80 W
Tension à vide	22.0V
Courant du court-circuit	4.80A

Tension a puissance max	18.0V
Courant a puissance max	4.45A
Tolérance	0~3%
NOCT	47 ± 2°C
Maximum système voltage	1000V DC
Température de fonctionnement	-40°C to +85°C
Dimensionnement	1195*541*30
Cell technologie	Mono-si
Poids	8 kg

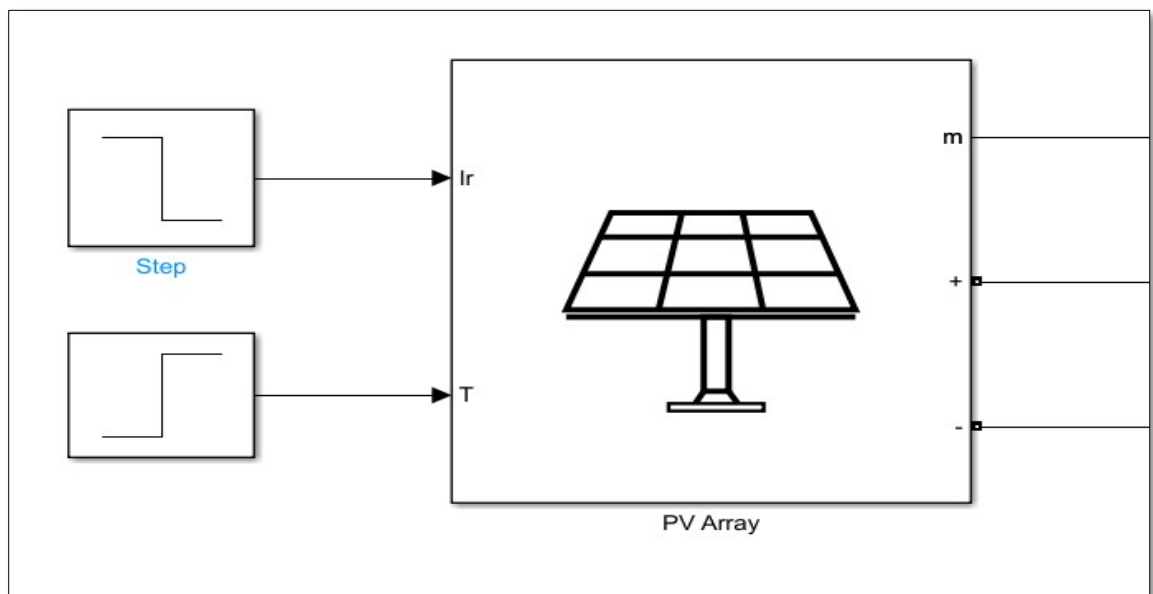


Fig III.2 Schéma de générateur PV en MATLAB_SIMULINK

2.1.1 Influence de l'éclairement :

La caractéristique d'une cellule PV (ou d'un générateur PV) dépend directement de l'éclairement et de la température. La figure ci-dessous (Fig III.2) illustre les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairement, à température constante de 25°C. On observe que l'augmentation de l'éclairement entraîne une hausse quasi-linéaire du courant de court-circuit (I_{cc}). La tension en circuit ouvert (V_{co}) augmente légèrement avec l'éclairement, mais cette variation est moins prononcée que celle du courant. La puissance maximale (P_{max}) délivrée par le panneau PV augmente presque proportionnellement avec l'éclairement, ce qui se traduit par un déplacement du point de puissance maximale (MPP) sur la courbe I-V.

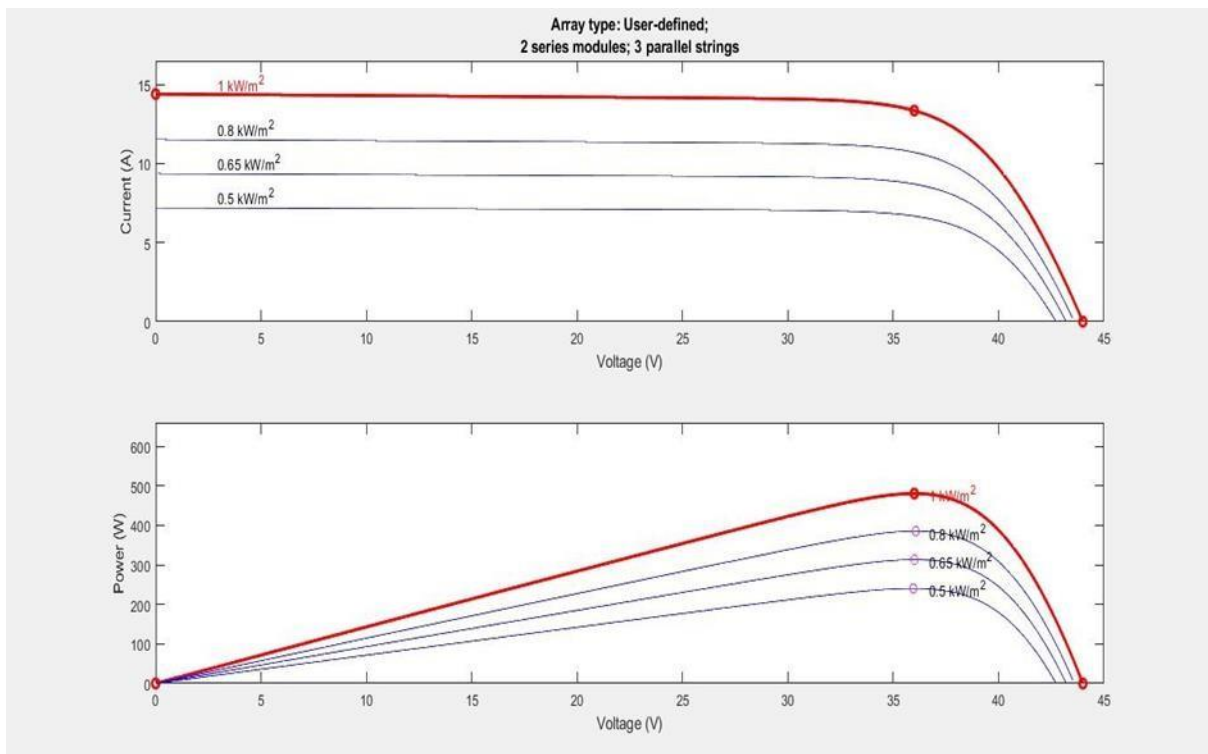


Fig. III.3: Evolution de la caractéristique I(V) et P(V) en fonction de l'irradiation.

2.1.2 Influence de la température

La figure III.4 illustre la variation des caractéristiques d'une cellule PV en fonction de la température, à un éclairement fixe de 1000 W/m². On observe qu'une augmentation de la température entraîne une diminution quasi-linéaire de la tension en circuit ouvert (V_{co}). Le courant de court-circuit (I_{cc}) augmente légèrement avec la température, mais cette augmentation est moins marquée que la baisse de la tension. La puissance maximale

(Pmax) délivrée par le panneau PV diminue lorsque la température augmente, ce qui se traduit par un déplacement du point de puissance maximale (MPP) sur la courbe I-V. La température et l'éclairement sont donc les deux principaux paramètres influençant la caractéristique d'un générateur PV, et doivent être étudiés avec soin lors de la mise en place d'une installation photovoltaïque.

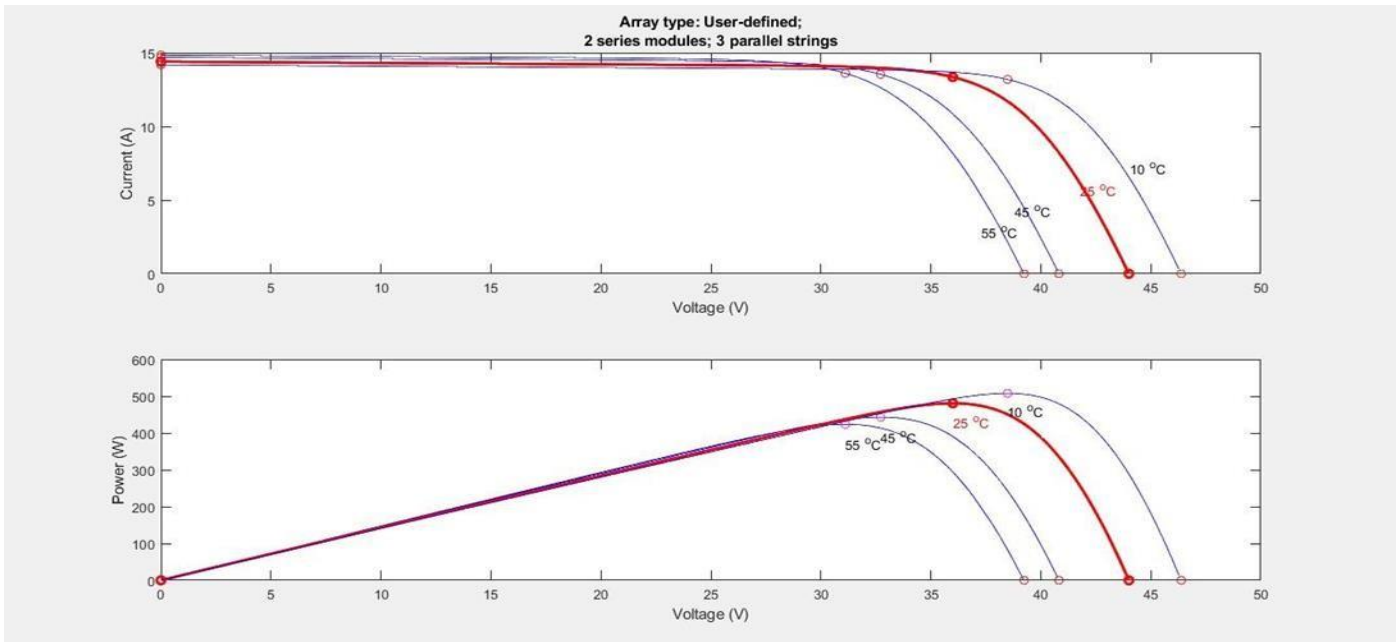


Fig. III.4: Evolution de la caractéristique I(V) et P(V) en fonction de la température.

2.1.3 Résultats de simulation de la batterie

La figure III.4 ci-dessous présente le comportement d'une batterie lors de sa décharge simulée à l'aide de Matlab Simulink.

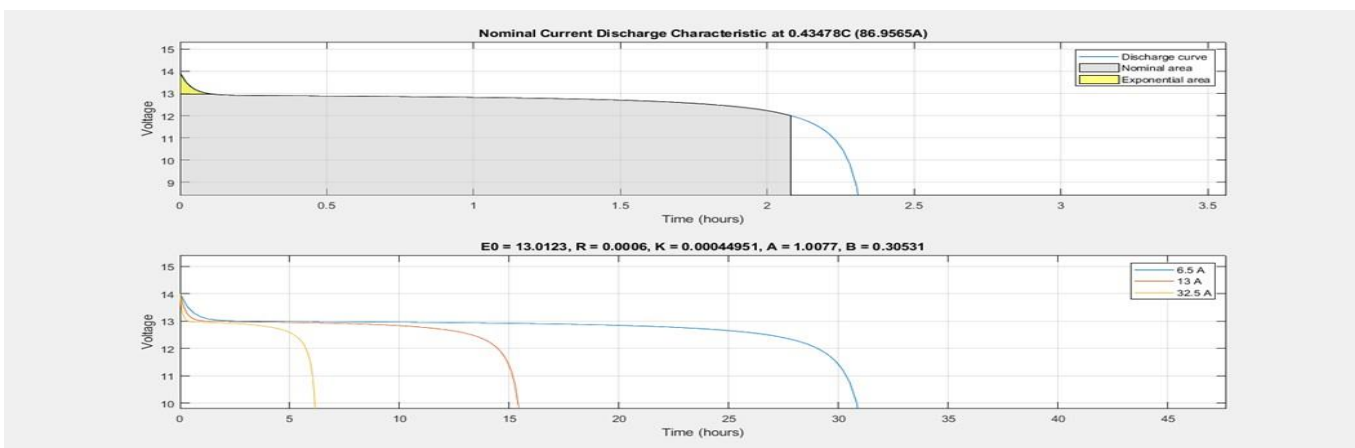


Fig III.5: figure illustre l'état de décharge d'une batterie en matlab simulink

a. Graphique 1 (en haut) : Caractéristique de décharge nominale à 0.43478C

- La courbe commence avec une tension de batterie initiale autour de 13.5-14V.
- Zone exponentielle : La partie en jaune au début représente une zone exponentielle où la tension de la batterie chute rapidement au début de la décharge.
- Zone nominale : En noir, la majeure partie du graphique correspond à la zone nominale, où la tension reste relativement stable. Cela reflète un comportement typique des batteries qui, après une chute initiale, fournissent une tension stable pendant une grande partie du processus de décharge.
- Fin de décharge : Une fois que la batterie atteint environ 2 heures de fonctionnement à ce courant élevé, la courbe plonge brusquement. Cette chute rapide signale la fin de la capacité disponible, où la batterie n'est plus en mesure de maintenir une tension suffisante.

Discussion

Ce graphique montre que la batterie peut maintenir une tension quasi constante (12-13 V) pendant approximativement 2 heures à une intensité de décharge élevée (~87 A). Cependant, une fois qu'elle atteint sa limite, la tension chute brutalement, indiquant que la batterie est presque vide. La capacité utile de la batterie à ce taux de décharge semble durer environ deux heures.

b. Graphique 2 (en bas) : Courbes de décharge à différents courants (6.5 A, 13 A, 32.5A)

- Courant de 6.5 A (bleu) :

Cette courbe montre une décharge plus lente. La batterie peut maintenir une tension quasi stable (entre 12 et 13 V) pendant près de 30 à 35 heures avant de chuter brutalement.

- Courant de 13 A (orange) :

Avec un courant de 13 A, la batterie se décharge plus rapidement, et sa tension reste stable durant environ 20 heures avant de commencer à chuter.

- Courant de 32.5 A (jaune) :

À 32.5 A, la batterie se décharge encore plus vite, et la chute de tension commence autour de 5 à 10 heures de décharge.

Discussion

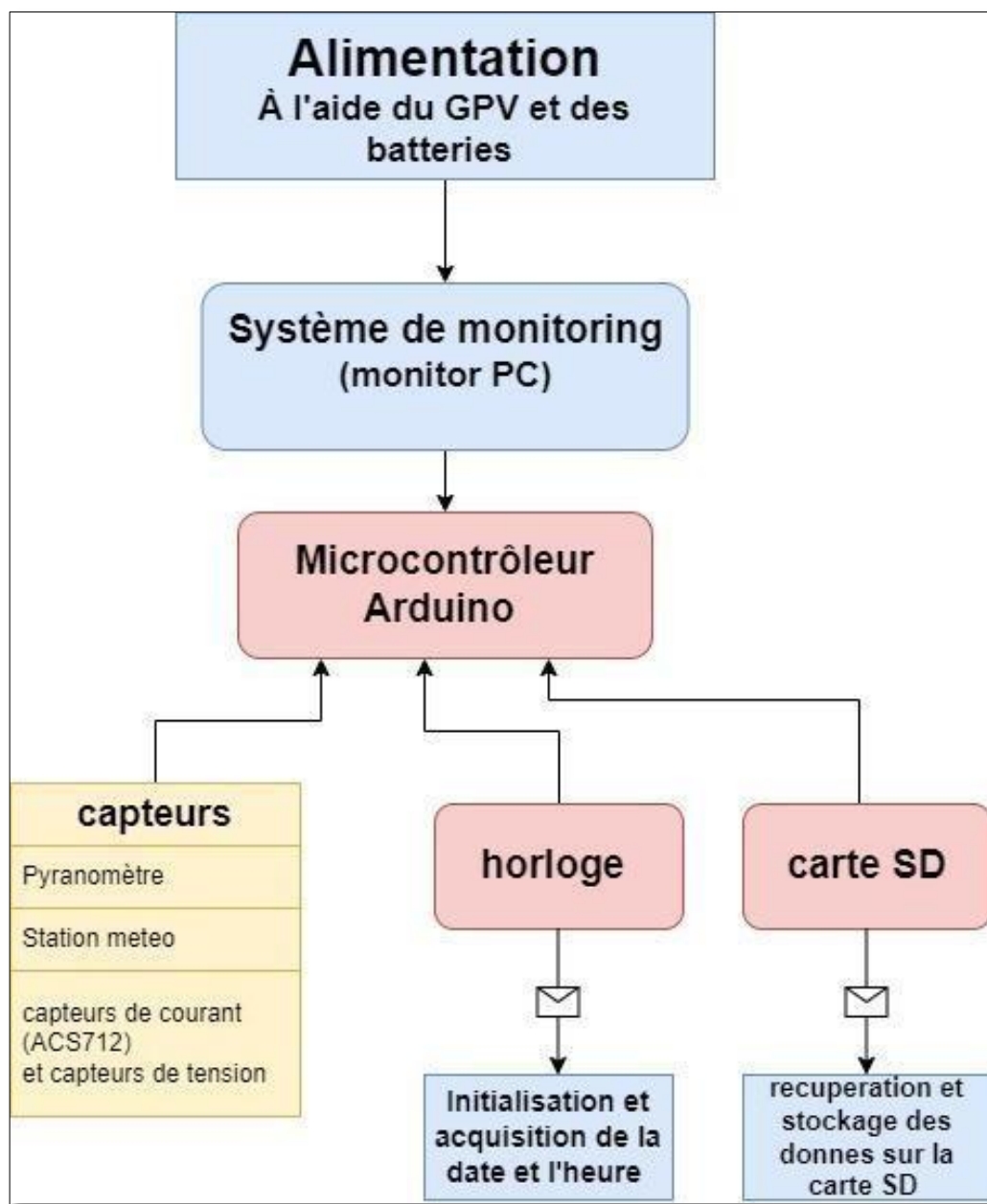
On observe clairement que plus le courant de décharge est élevé, plus la durée de décharge est courte. Cela est conforme au comportement des batteries à des intensités plus élevées,

les réactions chimiques à l'intérieur de la batterie sont plus sollicitées, ce qui réduit le temps pendant lequel la batterie peut fournir de l'énergie.

À faible courant (6.5 A), la batterie peut durer plus de 30 heures, tandis qu'à un courant beaucoup plus élevé (32.5 A), elle ne dure qu'environ 5 -10 heures. Cela montre l'importance de la gestion de la consommation pour prolonger la durée de vie de la batterie dans une application réelle.

2.2 Supervision du système PV autonome

2.2.1 Description des éléments du système de supervision



FigIII.6 : Schéma synoptique qui illustre les différentes parties de note système

Le principe de fonctionnement de la station de mesure à réaliser est basé sur un microcontrôleur qui traite les informations provenant des différents capteurs. Ce microcontrôleur envoie les données des capteurs vers une base de données et les stocke en temps réel sur une carte SD, grâce à une horloge. La visualisation des différents paramètres captés est réalisée à l'aide d'un afficheur LCD 20x4. Le schéma synoptique ci-dessous illustre les différentes parties du système à réaliser (voir Figure 4).

2.2.2. Capteurs de Mesure

Dans cette supervision, nous démontrerons l'utilisation de capteurs connectés à un Arduino pour mesurer divers paramètres essentiels d'une installation photovoltaïque autonome : l'irradiance solaire, la température, l'humidité, la tension et le courant de la batterie, ainsi que la tension et le courant du panneau photovoltaïque, et la puissance électrique globale.

a. Système d'acquisition de données

- **Enregistreur de données (data logger)** : Collecte et stocke les données des capteurs de mesure
- **Interfaces de communication** : Permettent de transférer les données vers un système de supervision

b. Système de Supervision et d'Analyse

- **Logiciel de supervision** : Permet de visualiser en temps réel les données de production, de consommation et de performance
- **Outils d'analyse des performances** : Analysent les données historiques pour évaluer l'efficacité de l'installation PV

3. Réalisation pratique de la supervision

3.1. Organigramme

Les informations reçues par l'Arduino sont traitées suivant un programme bien déterminé, dont l'organigramme est donné par la Fig III.7 ci-dessous et composé de neuf processus :

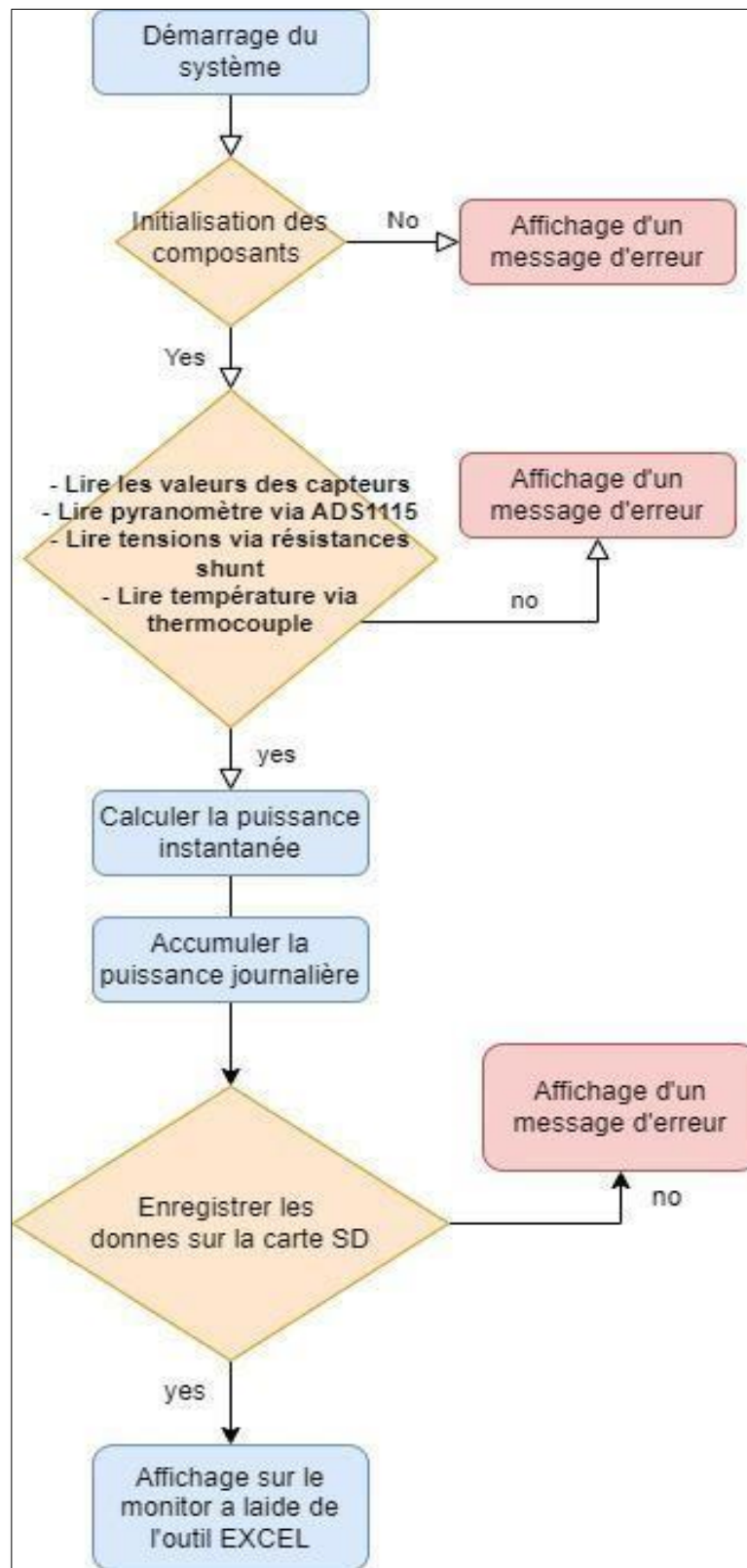


Fig III.7: Organigramme représentant la réalisation pratique de la supervision

3.2. Présentation des composants nécessaires pour la réalisation de la supervision

La Figure III.8 présente les résultats de l'évolution journalière de l'humidité en présence de charge.

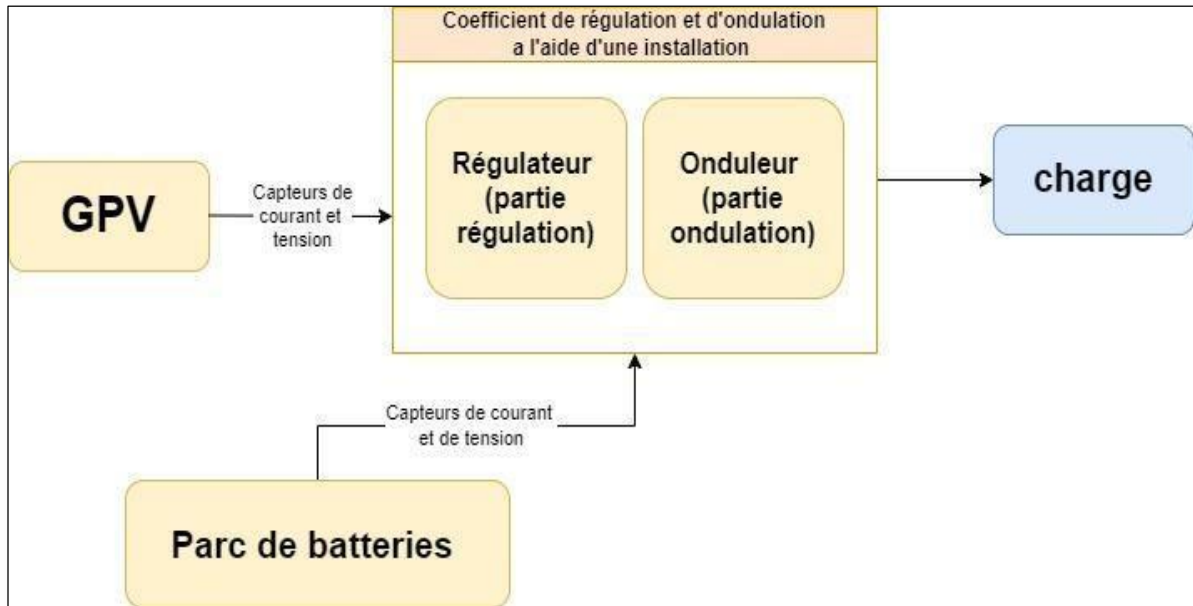


Fig III.8: Schéma synoptique représentant des composants nécessaires pour la réalisation de la supervision

Pour mettre en place un système de supervision de notre installation PV les composants requis sont :

3.2.1. Pyranomètre

Le pyranomètre SR20-T2 mesure le rayonnement solaire hémisphérique reçu par une surface plane, en W/m^2 , à partir d'un champ de vision de 180° . Il peut être utilisé à l'intérieur avec des simulateurs solaires à lampe ou plus fréquemment à l'extérieur sous le soleil. Son orientation dépend de l'application : il peut être installé horizontalement, incliné pour un éclairage énergétique plan ou en matrice, monté sur un suivi du soleil avec un anneau d'ombre pour des mesures de rayonnement diffus, ou encore inversé pour mesurer le rayonnement réfléchi. La faible dépendance à la température du SR20-T2 en fait un choix idéal pour des conditions climatiques très froides ou très chaudes. La dépendance à la température de chaque instrument est testée et exprimée sous forme de polynôme du second degré. Ces informations permettent de réduire davantage l'impact de la température lors du post-traitement.



Fig III.9 : Image illustrant le pyranomètre utilisé dans l'installation

Le SR20 est équipé d'un capteur de température interne. La version T2, fournie par Campbell Scientific, est équipée d'une thermistance de 10 k Ω . En revanche, la version T1 utilise une sonde PT100 et est disponible sur demande. Le chauffage intégré du SR20 réduit les erreurs de mesure causées par le dépôt de rosée tôt le matin. Campbell Scientific recommande d'utiliser l'instrument conformément aux pratiques établies par l'ISO, l'OMM et l'ASTM.

La sortie du SR20-T2 est analogique. Le modèle SR20-D2-L, quant à lui, propose deux autres types de sorties de rayonnement : une sortie numérique via Modbus RTU sur RS-485 à 2 fils et une sortie analogique 4-20 mA (boucle de courant).

3.2.2. Capteur de température et d'humidité relative



Fig III.10: Image illustrant le capteur de température et d'humidité relative

Applications

Utilisé dans les systèmes de surveillance des installations photovoltaïques, ce capteur aide à évaluer l'impact de la température et de l'humidité sur les performances des panneaux solaires. Il peut également être employé dans d'autres domaines, tels que la domotique, les stations météorologiques et les systèmes de contrôle climatique.

3.2.3. ADS1511

L'ADS115 est un module de conversion analogique-numérique qui convertit les signaux analogiques en données numériques avec une résolution de 16 bits.

Caractéristiques de l'ADS115 :

- **Conversion Analogique-Numérique** : L'ADS115 transforme les tensions analogiques en valeurs numériques, facilitant ainsi l'interfaçage avec des microcontrôleurs comme Arduino.
- **Plage de Tension** : Il mesure des tensions dans une plage allant de -4,096 V à +4,096 V, ce qui le rend adapté à divers capteurs et applications.
- **Amplificateur de Gain Programmable (PGA)** : L'ADS115 intègre un amplificateur de gain programmable, permettant d'ajuster la sensibilité des mesures en fonction des signaux à traiter.

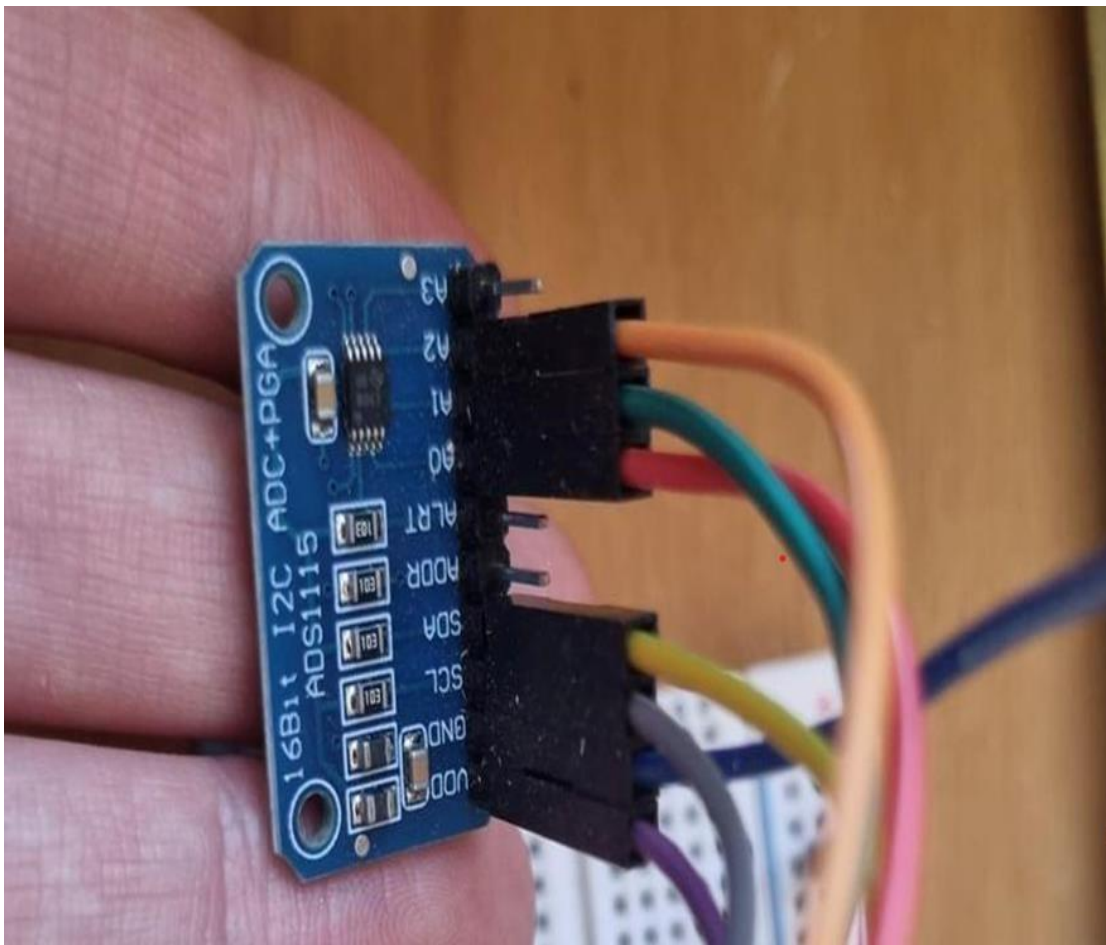


Fig III.11 : Image illustrant le module de conversion analogique-numérique ADS115

3.2.4. Capteurs de Tension

Dans une installation photovoltaïque (PV), les capteurs de tension jouent un rôle crucial en surveillant à la fois la tension des panneaux solaires et celle des batteries. Ils garantissent ainsi le bon fonctionnement et la sécurité du système.

Capteurs de Tension des Panneaux Solaires

- **Fonction :** Mesurent la tension en sortie des panneaux photovoltaïques, y compris la tension en circuit ouvert (Voc) et la tension de fonctionnement.
- **Importance :** Une mesure précise de la tension permet d'évaluer la performance des panneaux solaires et d'optimiser leur fonctionnement en fonction des conditions d'ensoleillement. Elle aide également à détecter des problèmes potentiels, tels que des courts-circuits ou des défaillances dans les modules.

Capteurs de Tension des Batteries

- **Fonction :** Mesurent la tension des batteries utilisées pour stocker l'énergie produite par les panneaux solaires.
- **Importance :** La surveillance de la tension des batteries est essentielle pour éviter les décharges profondes et prolonger leur durée de vie. Elle permet également de suivre l'état de charge (SOC) et d'optimiser la gestion de l'énergie dans le système.

3.2.5. Capteurs de courant

Les capteurs à effet Hall sont les plus utilisés pour la mesure du courant dans les installations PV de taille moyenne, grâce à leur bon rapport précision/coût et leur facilité d'intégration avec des systèmes de monitoring basés sur des microcontrôleurs comme Arduino

ACS712

ACS712 doit être inséré en série avec le circuit dont vous souhaitez mesurer le courant avec une sortie analogique et une alimentation à 5V. La piste de mesure doit être connectée à l'entrée et à la sortie du circuit de puissance.

Le capteur ACS712 est un capteur de courant basé sur l'effet Hall, utilisé pour mesurer le courant alternatif (AC) et continu (DC) dans un circuit. Voici un aperçu de son principe de fonctionnement

- **Principe de l'effet Hall :** Le capteur ACS712 utilise l'effet Hall pour détecter le champ magnétique généré par le courant qui passe à travers une piste conductrice intégrée. L'effet Hall génère une tension proportionnelle à la densité du flux magnétique.

Intégration dans le Système de Supervision

Les capteurs de tension des panneaux solaires et des batteries sont souvent intégrés dans un système de supervision plus large, permettant :

- **Visualisation en Temps Réel** : Affichage des données de tension sur un écran ou une interface utilisateur.
- **Alertes et Notifications** : Envoi d'alertes en cas de tensions anormales, permettant une intervention rapide.
- **Analyse des Performances** : Collecte de données historiques pour analyser les performances de l'installation PV et identifier les tendances.

3.2.6. Arduino

L'utilisation d'Arduino dans une installation photovoltaïque (PV) permet d'optimiser la gestion, la surveillance et le contrôle des systèmes solaires. Voici un aperçu des applications et des avantages de l'intégration d'Arduino dans les installations photovoltaïques

Applications d'Arduino dans une Installation PV

- **Surveillance de la Production Énergétique** :
 - **Mesure des Paramètres Électriques** : Arduino peut mesurer la tension, le courant et la puissance générée par les panneaux solaires à l'aide de capteurs tels que l'ACS712 pour le courant et des capteurs de tension.
 - **Affichage des Données** : Les données mesurées peuvent être affichées en temps réel sur un écran LCD ou envoyées à un serveur pour une visualisation à distance.
- **Gestion de l'Énergie** :
 - **Contrôle de Charge** : Arduino peut gérer la charge des batteries en fonction de la production d'énergie, en utilisant des relais pour connecter ou déconnecter les charges.
 - **Optimisation de l'Autoconsommation** : En surveillant la production et la consommation d'énergie, Arduino peut aider à maximiser l'utilisation de l'énergie produite localement.
- **Alertes et Notifications** :
 - **Système d'Alerte** : En cas de dysfonctionnement ou de conditions anormales (comme une tension trop élevée ou un courant anormal), Arduino peut envoyer des alertes par SMS ou par email pour informer l'utilisateur.

- **Intégration avec des Capteurs Environnementaux :**

- **Surveillance des Conditions Météorologiques :** Des capteurs de température et d'humidité peuvent être intégrés pour évaluer l'impact des conditions environnementales sur la performance des panneaux solaires.

- **Automatisation et Contrôle à Distance :**

- **Contrôle à Distance :** Grâce à des modules de communication comme le Wi- Fi (ESP8266) ou le GSM, Arduino permet un contrôle et une surveillance à distance de l'installation PV.

Avantages de l'Utilisation d'Arduino :

- **Coût Efficace :** Arduino est une solution économique pour les projets de surveillance et de contrôle.

- **Flexibilité :** La plateforme Arduino est adaptable et peut être facilement modifiée pour répondre aux besoins spécifiques de l'installation PV.

- **Communauté Active :** Une vaste communauté d'utilisateurs et de développeurs offre des ressources, des bibliothèques et des exemples de code, facilitant ainsi le développement.

➤ **Présentation de Quelques Exemples de Code Arduino pour la Supervision de l'Installation PV Autonome**

Ces exemples montrent comment utiliser des capteurs connectés à un Arduino pour mesurer l'irradiance solaire, la température, la tension de la batterie, la tension des panneaux photovoltaïques, le courant de la batterie, le courant des panneaux photovoltaïques, et la puissance électrique d'une installation photovoltaïque. Les données peuvent ensuite être affichées sur un écran pour une supervision locale.

- **Initialisation :**

- Le programme initialise le port série pour la communication et la carte SD pour le stockage des données.

- Il configure le convertisseur analogique-numérique ADS1115 avec un gain spécifique pour mesurer les signaux analogiques.

- Il crée un fichier data.txt sur la carte SD pour stocker les données.

- **Acquisition des Données :**

- Dans la boucle principale (loop()), il lit les valeurs de plusieurs capteurs : courant de

la batterie (IB), courant photovoltaïque (IP), tension de la batterie (Vb), tension photovoltaïque (Vp), température (T), humidité (H), et irradiance du pyranomètre (G).

- Pour chaque paramètre, il effectue une moyenne sur 30 échantillons pour obtenir une valeur plus précise.

- **Calculs :**

- Il calcule la puissance de la batterie (Pb) et la puissance photovoltaïque (Pp) à partir des courants et tensions mesurés.

- Il détermine l'état de charge (SOC) de la batterie en fonction de la tension mesurée.

- **Affichage et Enregistrement des Données :**

- Il affiche les données collectées sur le moniteur série et les enregistre dans un fichier Excel.

- Il ouvre le fichier data.txt sur la carte SD et enregistre les données mesurées ainsi que les valeurs calculées.

- **Délai :**

- Le programme attend une minute avant de réaliser une nouvelle série de mesures et de les enregistrer comme indiqué ci-dessus.

- Il est conçu pour surveiller et enregistrer régulièrement l'état et les performances d'un système photovoltaïque, en stockant les données pour une analyse ultérieure.

4. Conclusion

Il est essentiel de superviser une installation photovoltaïque (PV) pour garantir une gestion efficace, permettant ainsi de surveiller en temps réel la production d'électricité, d'évaluer l'efficacité du système et de repérer rapidement tout problème. Cette supervision optimise la production d'énergie renouvelable, maximise l'autoconsommation et contribue à réduire les dépenses d'entretien.

1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons d'abord les différentes étapes de la conception et de la mise en œuvre du système de monitoring, en détaillant les choix techniques réalisés. Ensuite, nous discuterons des résultats obtenus, en mettant en lumière l'impact de ce système sur l'optimisation de la production énergétique et la gestion des ressources. Enfin, nous analyserons les implications de ces résultats pour l'avenir des systèmes de monitoring dans le domaine des énergies renouvelables, en soulignant les perspectives d'amélioration et d'extension de cette approche.

2. Site d'implantation



Fig IV.1 : Site d'implantation et Coordonnées Géographiques sur l'image Google (Earth).

Le Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) est situé à Bouzaréah, dans la ville d'Alger, en Algérie, est situé à une latitude de $36,4740^\circ$ Nord et une longitude de 3.0137° Est, à une altitude de 345 mètres. Ce centre est une institution publique scientifique et technologique chargée de la recherche et du développement dans le domaine des énergies renouvelables. Il joue un rôle clé dans la promotion et l'implémentation des technologies liées aux énergies renouvelables en Algérie, notamment le solaire et l'éolien. La figure ci-dessous illustre ce site d'implantation issue de Google Earth .

2.1. Données météorologiques du site de Bouzaréah

Le Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) dispose d'une station météorologique qui collecte des données importantes sur les conditions climatiques. Voici un résumé des données météorologiques disponibles pour le site de Bouzaréah :

a. Paramètres mesurés :

- **Température** : Mesurée à l'aide de capteurs spécifiques.
- **Humidité** : Taux d'humidité relative dans l'air.
- **Pluviométrie** : Mesure des précipitations.
- **Pression atmosphérique** : Mesurée pour évaluer les conditions climatiques.
- **Rayonnement solaire** : Mesuré à l'aide de pyranomètres et de pyrhéliomètres pour capter le rayonnement global et direct.
- **Vitesse et direction du vent** : Mesurées par un capteur à ultrasons.

b. Technologie utilisée : La station est équipée de divers instruments, tels que des pyranomètres, un pyrhéliomètre, un sun tracker, ainsi qu'un enregistreur de données (data logger) pour collecter et stocker les informations.

c. Accès aux données : Les données mesurées sont intégrées et diffusées en temps réel sur le site web du CDER, permettant aux utilisateurs d'accéder aux informations météorologiques actuelles et historiques.

d. Localisation et altitude : La station est située à une altitude de 345 mètres, avec des coordonnées géographiques de 36,8° de latitude et 3° de longitude.

e. Utilisation des données : Les données collectées sont utilisées pour la recherche et le développement dans le domaine des énergies renouvelables, notamment pour la conception de systèmes solaires et l'évaluation de leur performance.

Les données météorologiques et radiométriques fournies par la station du CDER sont essentielles pour évaluer les conditions climatiques et optimiser les systèmes énergétiques. Ainsi, nous avons conçu un système d'imitation pour reproduire le comportement d'un

système existant. Ce système que nous avons réalisé imite le système existant en se limitant à trois paramètres : la température, l'irradiation et l'humidité.

2.3. Estimation des besoins en énergie électrique

Comme le montre la figure ci-dessous (**figure IV.2**) la charge externe s'agit d'un éclairage nocturne.



Fig IV.2: éclairage nocturne

La consommation nocturne dans un système PV autonome nécessite une gestion optimisée de la batterie. Il faut s'assurer que la production d'énergie solaire pendant la journée soit suffisante pour recharger la batterie et anticiper les besoins de la charge nocturne.

La charge consomme 100 W et fonctionne uniquement la nuit. Elle représente un appareil de faible consommation, l'éclairage nocturne.

La nuit, lorsque le panneau photovoltaïque ne produit pas d'énergie (tension PV à 0 V), la

batterie sera sollicitée pour alimenter la charge. On observe une baisse progressive de la tension de la batterie au fur et à mesure que la charge consomme de l'énergie. Cela entraînera un cycle de décharge nocturne suivi d'une recharge le jour.

3. Présentation du système de monitoring

Comme cela a été défini dans le chapitre précédent, les systèmes de monitoring jouent un rôle essentiel dans la surveillance des installations photovoltaïques. Ils permettent de mesurer en temps réel les paramètres météorologiques ainsi que l'énergie produite par les panneaux solaires. Ces systèmes fournissent des données cruciales pour évaluer la performance du système photovoltaïque, détecter rapidement les anomalies et optimiser la gestion de l'énergie.

La figure ci-dessous présente **le système de monitoring que nous avons réalisé**. Elle illustre les différents composants du système, y compris les entrées des capteurs météorologiques, les unités de mesure de la production d'énergie, et les interfaces de collecte et d'analyse des données. Ce système permet non seulement de suivre la production d'électricité des panneaux solaires, mais aussi d'intégrer des informations sur les conditions environnementales, telles que la température et l'irradiation solaire. Grâce à cette surveillance détaillée, il est possible d'optimiser les performances du système et de garantir une gestion efficace de l'énergie produite et stockée.

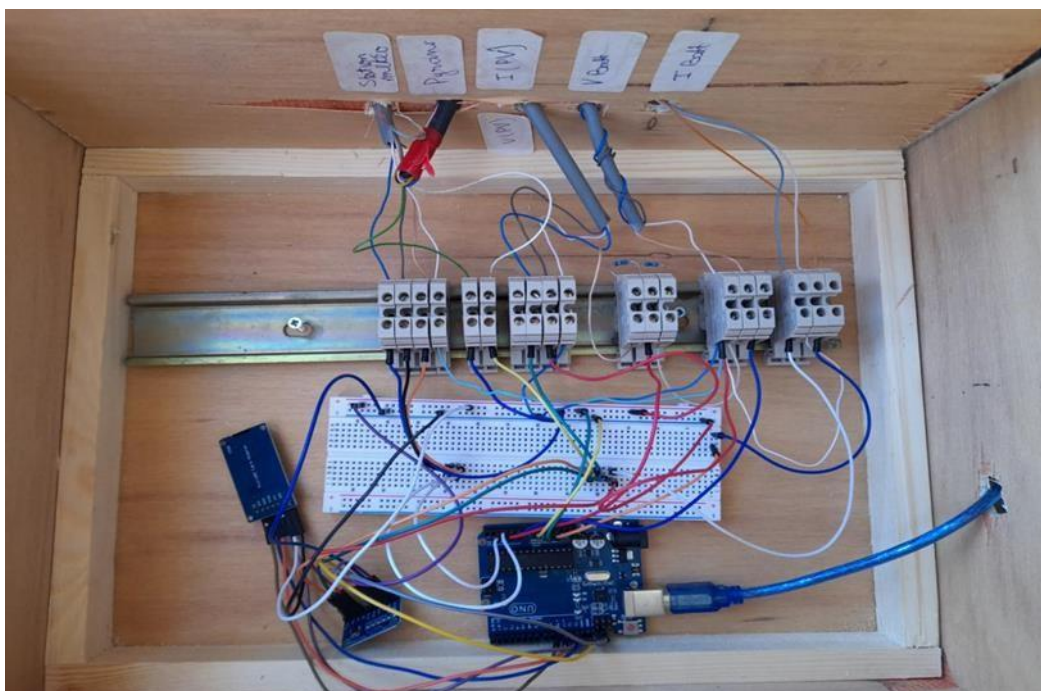


Fig IV.3 : système de monitoring

3.1. Composition du Système de Monitoring :

- **Carte Arduino :**

Sur le côté gauche de l'image, on peut voir une carte Arduino connectée par un câble USB. Cette carte est le cœur du système de monitoring. Elle est utilisée pour collecter les données des capteurs, traiter les informations et, le cas échéant, envoyer les résultats à un ordinateur, où ils peuvent être enregistrés dans un fichier Excel. De plus, la carte Arduino est équipée d'une carte mémoire pour assurer une sauvegarde des données en cas de problème, afin que les informations ne soient pas perdues si elles ne sont pas transmises à l'ordinateur.

- **Breadboard**

Juste à côté de la carte Arduino, on trouve une plaque de montage sans soudure (breadboard). Cette plaque est utilisée pour connecter divers composants électroniques, tels que des résistances, des capteurs, ou des fils de connexion, sans avoir besoin de souder. Dans notre cas, les capteurs connectés à cette plaque sont les suivant :

Acs 117 pour le courant

Diviseurs de tensions

On a utilisé des diviseurs de tension pour rabaisser les tensions du PV vers des tensions captables par l'arduino

On a utilisé le pyranomètre pour le flux du rayonnement

On s'utilisé la station météo pour l'humidité et la température

- **Support domino**

Sur la droite de l'image, on voit un support domino. Cette barre est utilisée pour organiser et connecter les différents fils provenant des composants du système, tels que les panneaux solaires, la batterie, les capteurs, etc. Les fils sont solidement fixés aux bornes à l'aide de vis, ce qui assure une bonne connexion électrique et maintient l'organisation du câblage.

- **Organisation du câblage**

Le câblage est organisé pour relier tous les composants du système de manière structurée, minimisant ainsi le désordre et facilitant la maintenance. Les fils sont regroupés avec du

ruban isolant noir pour maintenir l'ordre et éviter les interférences.

- **Support et boîtier**

L'ensemble du système est installé dans un boîtier en bois, lequel les composants électroniques de l'environnement extérieur tout en permettant un accès facile pour la maintenance ou les modifications.

4. Résultats et interprétation de données obtenues

Dans cette section, nous allons détailler les résultats obtenus dans deux cas distincts : avec charge et sans charge. L'analyse des données dans ces deux situations permet de mieux comprendre le comportement du système photovoltaïque contrôlé par microcontrôleur, ainsi que son efficacité dans différentes conditions d'utilisation.

4.1. Avec charge

4.1.1. Données météorologiques

Ces données sont prises du 09 au 10 septembre 2024

a. Température

La **Figure IV.4** présente les résultats de l'évolution journalière de la température en présence de charge. Pris le jour 09/09/2024 au 10/09/2024

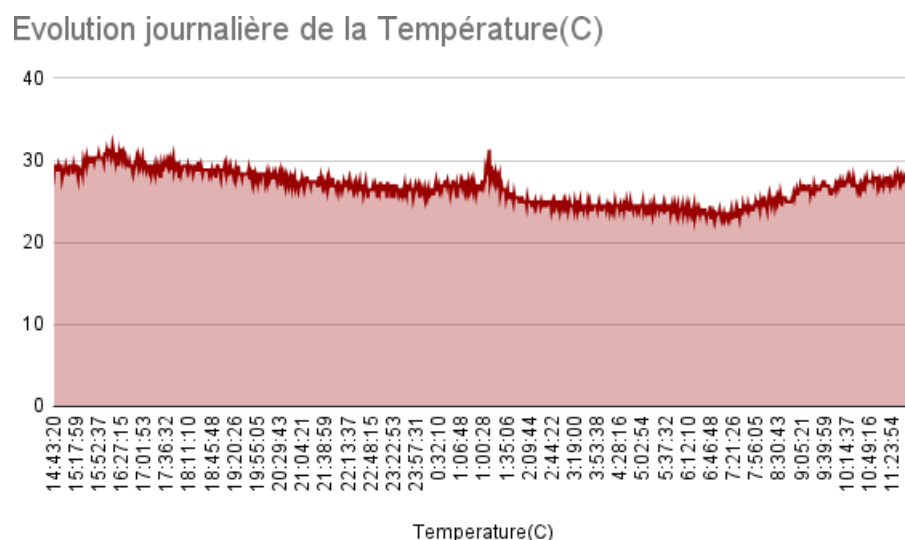


Fig IV.4 : l'évolution journalière de la température en présence de charge.

La température commence relativement élevée (autour de 30°C), reste stable avec de légères fluctuations, puis diminue lentement au fil de la journée, suggérant un refroidissement progressif. Un pic au milieu du graphique indique une augmentation soudaine de la température, probablement causée par une exposition directe au soleil ou un changement dans les conditions environnementales. Cela est suivi d'une baisse significative, autour de 25°C, avec une stabilisation. Vers la fin, la température augmente à nouveau, ce qui pourrait correspondre à un réchauffement dû au soleil de l'après-midi.

b. Humidité

La **Figure IV.5** présente les résultats de l'évolution journalière de l'humidité en présence de charge. Pris le jour 09/09/2024 au 10/09/2024

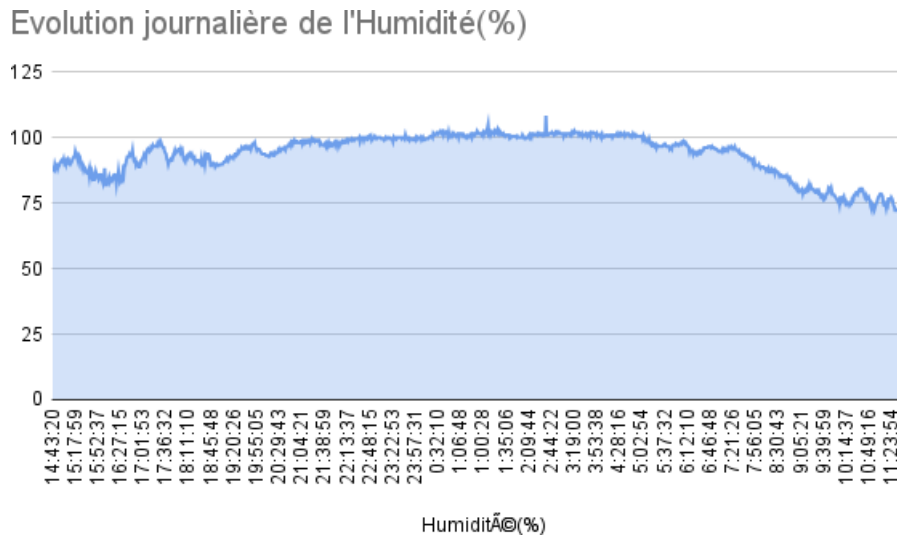


Fig IV.5 : l'évolution journalière de l'humidité en présence de charge

Les valeurs d'humidité restent relativement élevées (près de 100%) durant une grande partie de la journée, ce qui suggère des conditions très humides. Il y a une légère diminution de l'humidité vers la fin de la période, probablement due aux variations de température ou à d'autres facteurs environnementaux, comme le vent. Un pic en milieu de graphique peut être dû à un changement soudain des conditions météorologiques ou à une interférence des capteurs. La baisse progressive de l'humidité vers la fin pourrait correspondre à la nuit, moment où l'air se refroidit et retient moins d'humidité.

c. Rayonnement

La **Figure IV.6** présente les résultats de l'évolution journalière du rayonnement en présence de charge. Pris le jour 09/09/2024 au 10/09/2024

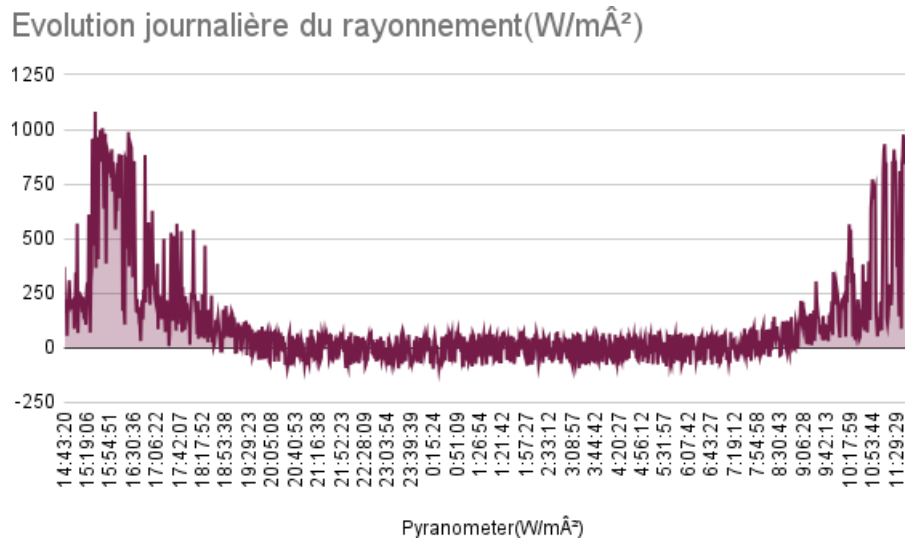


Fig IV.6 l'évolution journalière du rayonnement en présence de charge.

Le rayonnement solaire commence à un niveau élevé, atteint un pic tôt dans la journée, puis diminue considérablement avant de se stabiliser à un niveau bas en milieu de journée. On observe un autre pic vers la fin de la journée, ce qui indique que le rayonnement solaire est plus intense en début et fin de journée, probablement dû à l'angle d'incidence du soleil. Les valeurs de rayonnement pendant la nuit devraient être proches de zéro, ce qui est logique (ou légèrement négatives en raison de la calibration du capteur ou de la lumière ambiante). Cela montre des variations dans la disponibilité de l'énergie solaire, avec des pics de production d'énergie le matin et l'après-midi.

L'influence des données météorologiques sur la charge

✓ **Température**

Avec une charge externe la température élevée peut entraîner une diminution de la production PV, ce qui oblige la batterie à compenser cette baisse, et dans ces circonstances se décharge plus rapidement en raison de la chaleur, cela peut réduire l'autonomie du système pour alimenter la charge.

✓ Humidité

L'humidité peut influencer indirectement le fonctionnement du système PV en perturbant l'électronique qui gère l'énergie. Cela pourrait affecter la capacité du système à répondre aux besoins de la charge de manière efficace.

✓ Rayonnement solaire

Lorsque le rayonnement solaire est élevé, le module PV peut produire suffisamment d'énergie pour alimenter la charge directement et recharger la batterie simultanément.

Par contre, lorsque le rayonnement solaire diminue (en soirée ou par temps nuageux), la batterie doit prendre le relais pour alimenter la charge, ce qui entraîne une décharge rapide, surtout si la demande de la charge est importante.

4.1.2. Courants

Les données représentées dans la **figure IV.7** ci-dessous illustrent les variations journalières du courant PV ainsi que de la batterie avec charge Pris le jour 09/09/2024 au 10/09/2024

Evolution journalières du courant PV ainsi que de la batterie avec charge

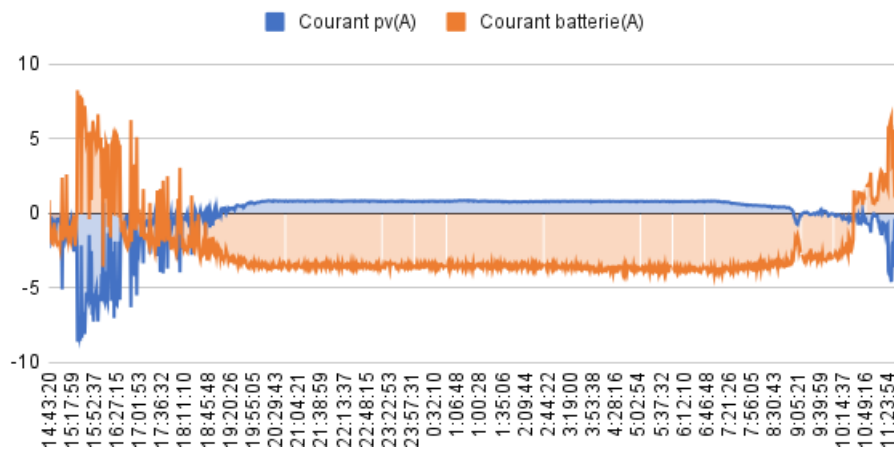


Fig IV.7 : variations journalières du courant PV ainsi que de la batterie avec charge

Les données présentées dans la figure IV.7 ci-dessus montrent les variations journalières du courant photovoltaïque (PV) ainsi que celui de la batterie, en présence de charge, pour la période allant du 09/09/2024 à 14h50 au 10/09/2024 à 11h45. Ces variations illustrent l'évolution de la production photovoltaïque en fonction de l'ensoleillement, ainsi que les cycles de charge et de décharge des batteries.

Durant la journée, le courant PV fluctue en fonction de la disponibilité solaire, tandis que les batteries se rechargent. La nuit, lorsque la production solaire cesse, les batteries prennent le relais, déchargeant l'énergie stockée pour alimenter la charge.

Le graphique du 09/09/2024 reflète précisément le fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome. Comme le montre la figure IV.6, les panneaux solaires produisent de l'énergie grâce à l'ensoleillement diurne, ce qui est visible à travers les variations du courant PV (bleue). Lorsque l'ensoleillement est suffisant, l'énergie produite alimente la charge en priorité, et l'excédent est stocké dans les batteries. Ce processus de charge est représenté par un courant de batterie (orange) positif, signifiant que l'énergie excédentaire est stockée pour une utilisation ultérieure.

À la tombée de la nuit ou en cas de faible ensoleillement, la production solaire diminue progressivement jusqu'à devenir quasi nulle. C'est alors que les batteries assurent l'alimentation de la charge, leur courant devenant négatif, indiquant une décharge de l'énergie précédemment stockée. Cela garantit une alimentation continue, même en l'absence de production solaire, assurant ainsi la stabilité du système.

Au lever du soleil, le 10/09/2024, les variations du courant PV reprennent, atteignant un pic autour de midi. À ce moment-là, l'énergie solaire est à nouveau utilisée pour alimenter directement la charge tout en rechargeant les batteries, préparant ainsi le système à répondre aux besoins énergétiques des prochaines périodes nocturnes.

4.1.3. Tensions

Evolution journalières de la tension PV ainsi que de la batterie avec charge

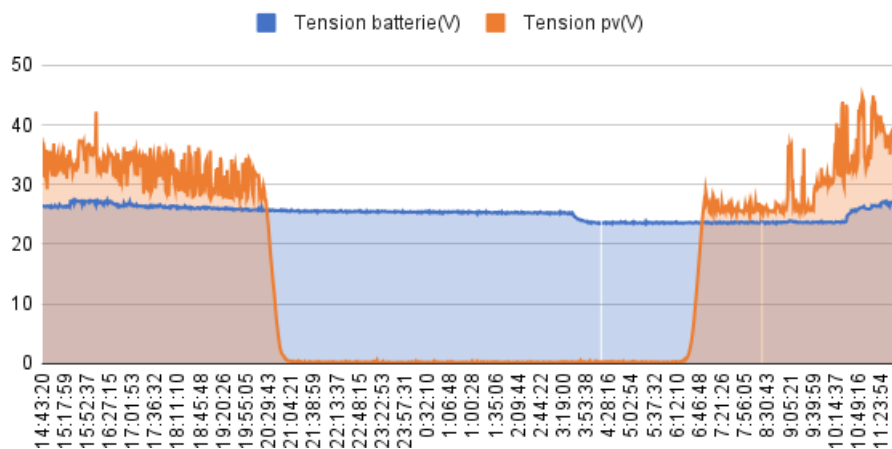


Fig IV.8 : variations journalières de la tension PV ainsi que de la batterie avec charge

Les données représentées dans la **figure IV.8** ci-dessus illustrent les variations journalières des tensions du système photovoltaïque (PV) ainsi que des batteries en présence de charge, pour la période allant du 09/09/2024 à 14h50 au 10/09/2024 à 11h45. Ces variations montrent l'évolution des tensions en fonction de l'ensoleillement, et des cycles de charge et de décharge des batteries.

Pendant la journée, la tension PV fluctue en fonction de l'intensité de l'ensoleillement. Lorsque le soleil est à son zénith, la tension PV atteint son maximum, permettant une alimentation directe de la charge et une recharge efficace des batteries. La tension des batteries reste relativement stable durant cette période, se maintenant à un niveau élevé grâce à l'apport continu d'énergie.

Lorsque l'ensoleillement diminue, notamment en fin de journée, la tension PV commence à chuter, atteignant des niveaux très bas à la tombée de la nuit. En réponse, la tension des batteries commence à décroître progressivement, indiquant que l'énergie stockée est utilisée pour maintenir l'alimentation des charges. Ce phénomène reflète la phase de décharge des batteries.

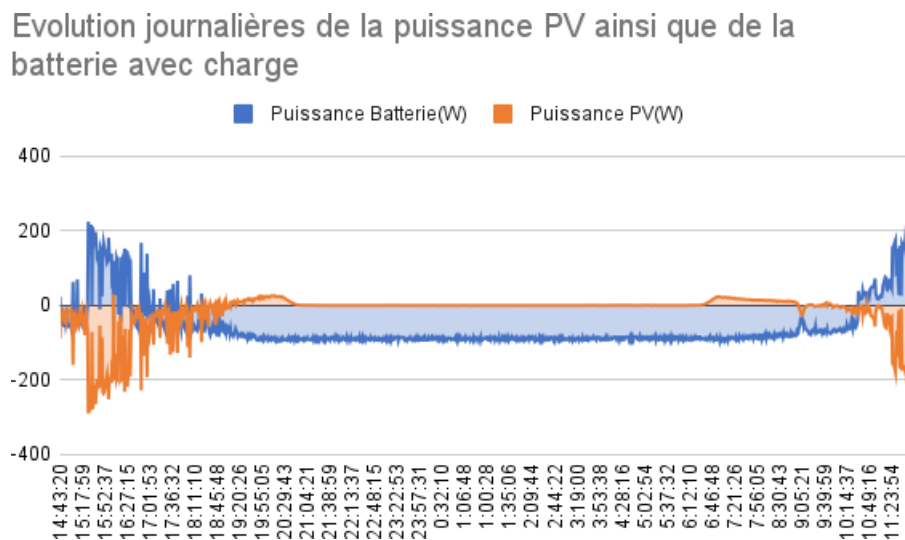
Le graphique du 09/09/2024 illustre clairement ce processus. Comme montré dans la figure IV.6, lorsque la tension PV est suffisante, elle est prioritairement utilisée pour alimenter la charge et recharger les batteries. La tension des batteries reste alors stable ou augmente légèrement, suivant l'intensité de la charge et la capacité de stockage du système.

Cependant, lorsque la production photovoltaïque s'arrête à la tombée de la nuit, la tension des batteries prend le relais pour maintenir une alimentation continue. Cela entraîne une baisse progressive de la tension des batteries, signe que l'énergie stockée est consommée. Ce cycle de variation des tensions assure un équilibre entre la production et la consommation d'énergie, garantissant la stabilité du système pendant toute la durée du cycle jour-nuit.

Au lever du soleil, le 10/09/2024, la tension PV commence à remonter, atteignant un pic autour de midi, tandis que la tension des batteries augmente à nouveau grâce à la recharge effectuée par les panneaux solaires. Cela prépare le système à fournir une alimentation continue pour la prochaine nuit, en optimisant à la fois la production photovoltaïque et la gestion du stockage d'énergie.

4.1.4. Puissance

La Figure IV.9 présente les résultats de l'évolution journalière variations journalières de la puissance PV ainsi que de la batterie avec charge



a. Puissance PV

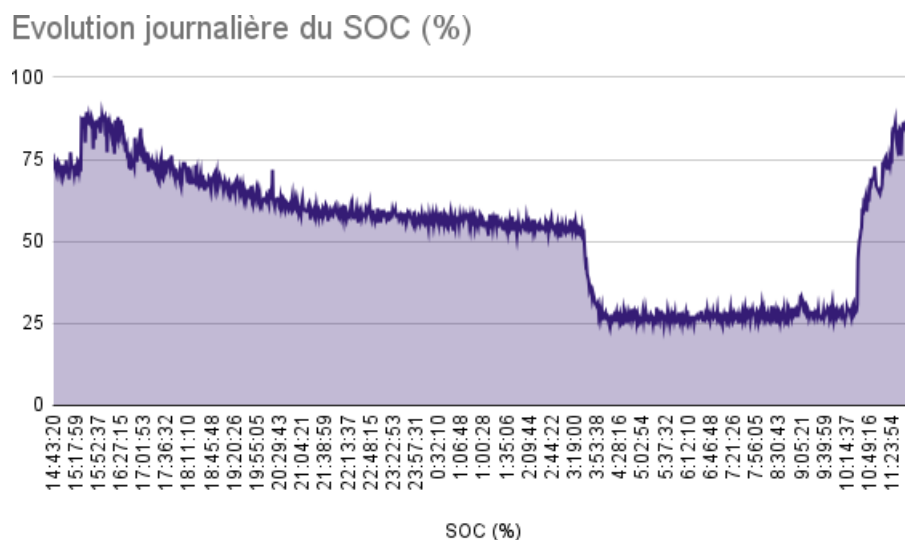
La puissance du module PV est fluctuante. Ces fluctuations correspondent probablement à la variation de l'ensoleillement tout au long de la journée. On remarque des pics élevés en début et fin de période, ce sont les moments où le soleil est plus intense (matin et soir). Entre ces moments, la production est relativement plus stable mais fluctuante autour d'une certaine valeur entre 20h30 et 6h10.

b. Puissance batterie (orange) :

La puissance liée à la batterie présente des phases plus stables. On observe une tendance où la batterie semble se décharger (puissance négative), puis elle se recharge (puissance positive). Le comportement stable au centre indique une faible demande de charge ou une phase où la batterie n'est pas sollicitée.

4.1.5. État de charge (SOC)

Les données représentées dans la figure IV.10 sont l'évolution journalière de l'état de charge de la batterie (charge active)



On observe une chute rapide du SOC qui atteint un niveau d'environ 60 %. Cela peut indiquer une période de forte décharge, où la batterie alimente une charge importante ou où la production PV est insuffisante pour la recharger.

Le SOC remonte rapidement vers la fin, atteignant à nouveau un niveau proche de 90 %. Cela pourrait correspondre à une période où la production PV est plus élevée, rechargeant efficacement la batterie.

4.2. Sans charge

4.2.1. Données météorologiques

- Le rayonnement solaire

Comme le montre la figure ci-dessous (figure IV.11) :

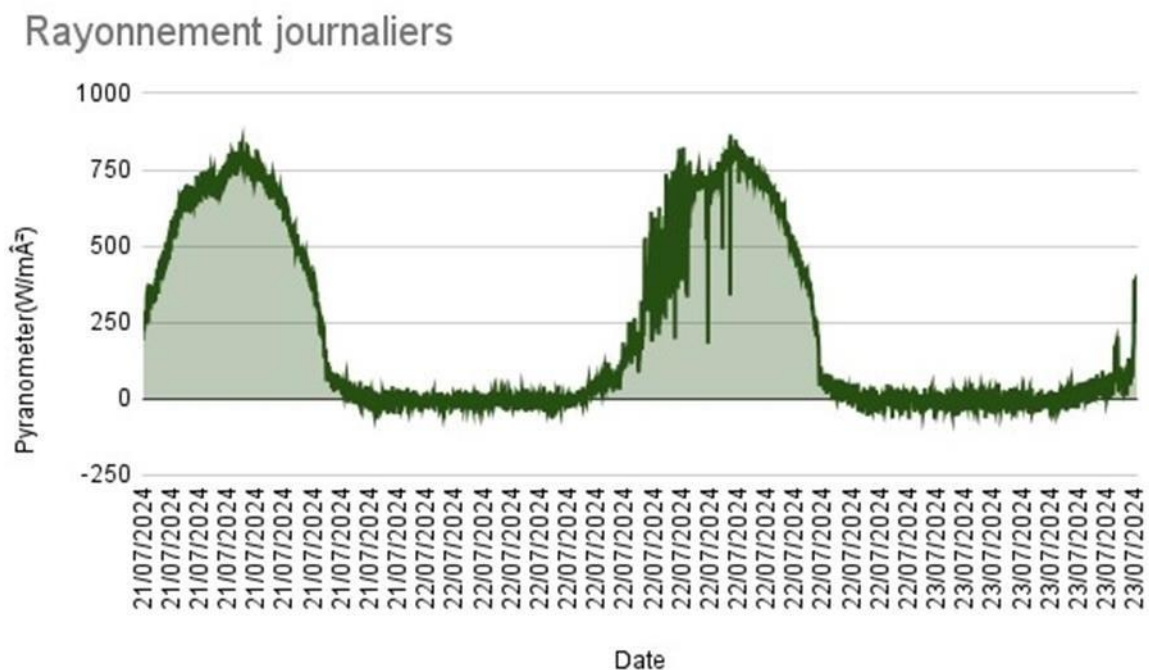


Fig IV.11: Rayonnement solaire journaliers sans charge

L'analyse des données révèle trois pics journaliers réguliers, qui coïncident avec les moments de forte intensité solaire, principalement autour de midi. Le pyranomètre enregistre alors des niveaux de rayonnement solaire atteignant environ 750 W/m², un phénomène courant pour une journée estivale typique de juillet. Pendant la nuit et les périodes de faible ensoleillement (à l'aube et au crépuscule), le rayonnement solaire diminue, se rapprochant de zéro ou affichant même de légères valeurs négatives.

matin, suivie d'une diminution au cours de la journée. L'humidité tend à augmenter lorsque la température baisse, particulièrement la nuit, et à diminuer lorsque la température augmente, principalement en milieu de journée.

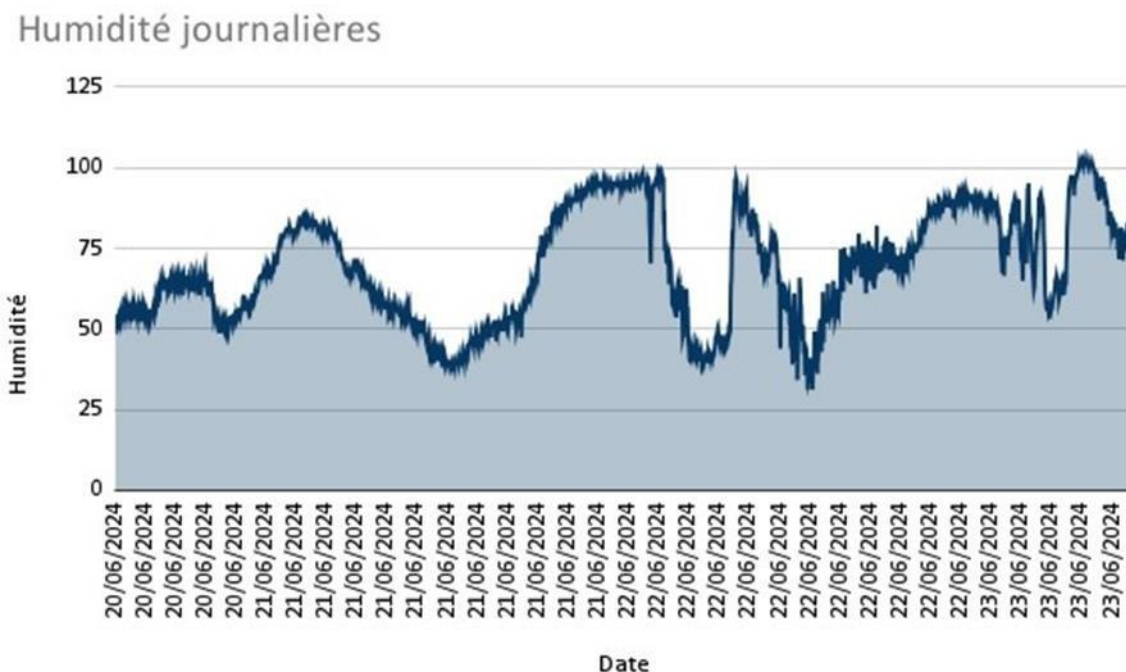


Fig IV.13 : humidité journalières sans charge

Relation entre les trois paramètres

Une baisse de l'humidité peut coïncider avec une augmentation de la température et du rayonnement solaire en journée. La production d'énergie est maximale pendant les périodes de fort ensoleillement, mais il est important de surveiller l'impact de la chaleur sur les performances des panneaux solaires. Les périodes de fort rayonnement solaire (mesuré par le pyranomètre) et de températures élevées (mesurées par des capteurs de température) sont celles où le système photovoltaïque génère le plus d'énergie. Cependant, des températures trop élevées peuvent réduire l'efficacité des panneaux solaires.

La corrélation directe entre les pics du rayonnement solaire et de la température montre que l'ensoleillement intense entraîne un échauffement des panneaux, ce qui peut affecter les performances globales du système s'il n'est pas correctement géré.

4.2.2. Courant

La (Figure IV.14) présente les résultats de l'évolution journalière du courant des panneaux photovoltaïques (PV) ainsi que du courant de la batterie en l'absence de charge.

Evolution journalière du courant batterie et du courant pv sans charge

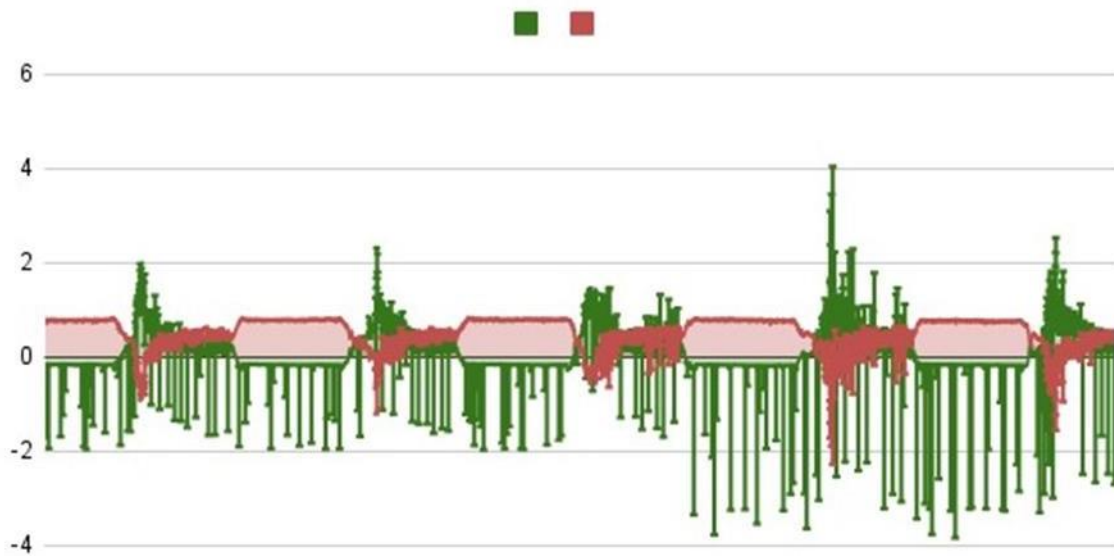


Fig IV.14 Évolution journalière du courant PV et de la batterie sans charge

a. Courant PV

Pendant la journée, on observe des pics de courant atteignant environ 2 à 4 A. Cela représente la quantité d'énergie produite par les panneaux photovoltaïques et envoyée vers la batterie. Les périodes où le courant est nul ou proche de zéro, comme la nuit ou par mauvais temps, sont également bien visibles. Les niveaux de courant pendant la journée semblent relativement constants, ce qui indique un ensoleillement stable durant la période étudiée.

b. Courant batterie

Les décharges soudaines et profondes (jusqu'à -4 A) indiquent que la batterie se décharge régulièrement, ce qui peut être dû à la consommation interne du système ou à des fuites d'énergie. En parallèle, on observe que la batterie se recharge légèrement pendant les périodes où les panneaux photovoltaïques produisent de l'énergie, comme le montre la courbe verte. Cela indique que la batterie est capable de stocker l'excès d'énergie solaire généré.

Même en l'absence de charge externe, la batterie continue de se décharger de manière régulière. Cette décharge résiduelle peut être attribuée à des pertes énergétiques intrinsèques au système, telles que la consommation des équipements de monitoring ou des pertes thermiques. Ces pertes doivent être prises en compte pour évaluer l'efficacité globale du système.

4.2.3. Tension

Les données représentées dans la figure IV.15 sont l'évolution journalière des tensions PV et de la batterie sur une période de temps, en absence de charge

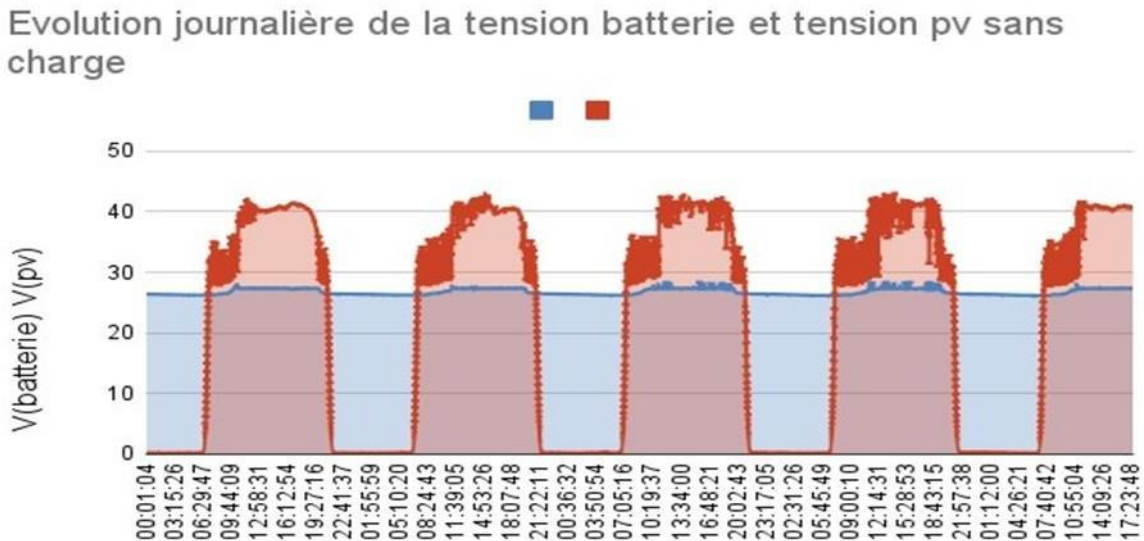


Fig IV.15 : Évolution journalière de la tension PV et de la batterie en absence de charge

a. Tension PV

La tension des panneaux photovoltaïques (PV) suit un cycle quotidien régulier. Pendant la journée, elle augmente progressivement, atteignant un pic généralement autour de 40-45 V. Cette tension reste relativement stable à son maximum, ce qui indique que les panneaux fonctionnent de manière optimale lorsque le rayonnement solaire est maximal. En l'absence de lumière, durant la nuit, la tension chute brusquement à zéro, ce qui est normal puisque la production d'électricité cesse sans ensoleillement.

La stabilisation de la tension à son maximum pendant la journée est généralement associée à l'atteinte de la tension de circuit ouvert (V_{oc}) des panneaux solaires, ce qui est le cas lorsque les panneaux ne sont pas soumis à une charge. Cependant, dans un système réel, cette stabilité peut également être influencée par le fait que les batteries ont atteint leur capacité de charge maximale. Lorsque les batteries sont complètement chargées, le régulateur de charge ou le contrôleur de charge ajuste la tension fournie pour éviter la surcharge. En conséquence, même si les panneaux solaires continuent de produire une tension élevée en fonction de l'ensoleillement, la tension mesurée aux bornes de la batterie reste stable à son niveau maximum

sans consommer d'énergie supplémentaire. Cela confirme que les panneaux fonctionnent de manière optimale en termes de production de tension, tout en montrant qu'il n'y a pas de consommation significative d'énergie à ce moment-là.

b. Tension de la batterie

La tension de la batterie reste relativement stable, oscillant entre 24 et 28 V. Cette stabilité montre que la batterie se recharge efficacement pendant la journée et se décharge très lentement pendant la nuit. En effet, pendant la journée, on observe une légère augmentation de la tension de la batterie, ce qui indique qu'elle est en train de se recharger grâce à l'énergie excédentaire produite par les panneaux photovoltaïques (PV). Cette légère augmentation est un signe que la batterie reçoit une charge suffisante sans atteindre une surcharge.

La batterie maintient un niveau de charge optimal, avec des variations de tension relativement modérées, ce qui indique qu'elle n'est ni surchargée ni sous-alimentée. Pendant la nuit, en l'absence de charge significative, la batterie conserve une tension stable autour de 24 V. Cela suggère que la consommation d'énergie est très faible, probablement limitée au fonctionnement minimal du système de monitoring. Cette faible consommation nocturne permet à la batterie de maintenir sa charge sans décharge marquée, ce qui témoigne de l'efficacité du système de stockage et de gestion de l'énergie.

4.2.4. Puissance

La figure ci-dessous (Figure IV.16) illustre l'évolution journalière de la puissance PV et de la batterie sans charge

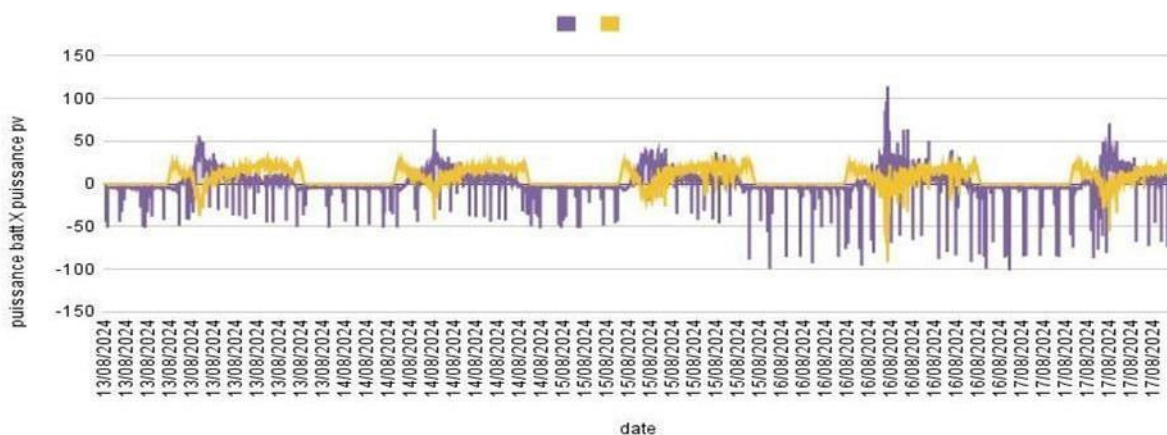


Fig IV.16 : Évolution journalière de la puissance PV et de la batterie sans charge

a. Puissance PV :

Pendant les heures d'ensoleillement, la puissance des panneaux photovoltaïques augmente régulièrement et dépasse souvent 50 W. Cette montée constante de la puissance est cohérente avec une production d'énergie solaire efficace. La courbe montre que les panneaux PV fonctionnent à leur capacité maximale pendant les heures de plein soleil. En revanche, pendant la nuit, la puissance des panneaux chute rapidement et se stabilise à des valeurs proches de zéro. Ce phénomène reflète l'absence de production électrique lorsque le soleil se couche, ce qui est attendu dans un système photovoltaïque.

b. Puissance de la Batterie :

Pendant la journée, la puissance de la batterie augmente légèrement en réponse à l'excédent d'énergie produit par les panneaux PV, indiquant que la batterie se recharge efficacement. Pendant la nuit, la courbe montre que la puissance de la batterie devient légèrement positive. Cela suggère que la batterie alimente probablement le système de monitoring, comprenant le microcontrôleur Arduino, les capteurs, et d'autres composants internes. Cependant, cette consommation est minimale et ne provoque pas de décharge significative de la batterie. La stabilité de la tension de la batterie pendant la nuit confirme que la consommation d'énergie est très faible, assurant ainsi que la batterie maintient une charge optimale même en l'absence de production d'énergie solaire.

Etat de charge (SOC)

Sans charge, la batterie est principalement dans un état de recharge continue pendant les périodes de production photovoltaïque, et une légère autodécharge pendant les périodes sans production. Comme l'illustre la figure ci-dessous (figure IV.17).

Le SOC augmentera au fur et à mesure que le module PV recharge la batterie pendant la journée. S'il y a suffisamment de production PV, le SOC pourrait atteindre 100 % à la fin de la journée.

Le SOC restera stable à 100 % ou légèrement en dessous si la production PV compense l'autodécharge. La nuit ou par temps nuageux, le SOC pourrait légèrement diminuer, mais la baisse sera marginale en raison de l'absence de charge. Comme le montre la figure ci-dessous

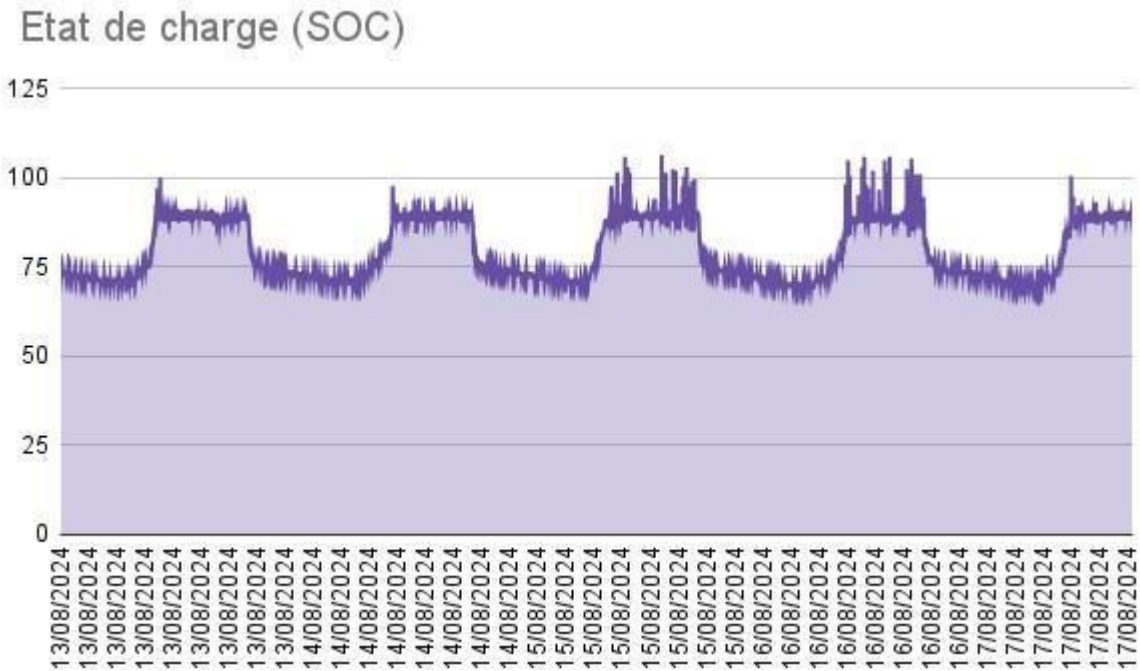


Fig IV.17 : Evolution journalière de l'état de charge de la batterie sans charge.

Le SOC augmente au fur et à mesure que le module PV recharge la batterie pendant la journée. Comme dans notre cas il y a suffisamment de production PV, c'est pour cela que le SOC pourrait atteindre 100 % à la fin de la journée comme le montre les pics sur la figure

Le SOC reste stable à 100 % ou légèrement en dessous car la production PV compense l'autodécharge. La nuit ou par temps nuageux, le SOC est légèrement diminué, mais elle reste marginale en raison de l'absence de charge.

5. Conclusion

Les résultats obtenus démontrent que le système de monitoring a non seulement permis une évaluation précise des performances des composants individuels, mais a également contribué à une gestion plus efficace de l'énergie produite et stockée. Grâce à la surveillance en temps réel des paramètres clés, il est possible d'identifier rapidement les anomalies, d'optimiser la production d'énergie et de prolonger la durée de vie des équipements. Cette approche proactive permet d'ajuster les opérations du système pour maximiser son efficacité et éviter les pannes potentielles.

De plus, l'intégration des données météorologiques a enrichi notre compréhension des facteurs

externes influençant la performance des systèmes photovoltaïques (PV). En intégrant ces informations, nous pouvons anticiper les variations de production en fonction des conditions environnementales, telles que les changements de rayonnement solaire et les fluctuations de température. Cela permet une meilleure planification et une optimisation continue des performances du système, en tenant compte des conditions climatiques variées.

Conclusion

Conclusion :

Le projet intitulé « Contrôle et Supervision d'un système photovoltaïque d'un microcontrôleur » s'inscrit dans la dynamique actuelle de la transition énergétique, où l'efficacité et l'optimisation de la production d'énergie renouvelable deviennent des enjeux cruciaux. L'objectif principal de ce travail a été de développer un système de surveillance et de contrôle pour le système photovoltaïque situé au CDER Bouzareah, en Algérie, en s'appuyant sur un ensemble de capteurs permettant de mesurer la production d'énergie solaire ainsi que la consommation.

Tout au long de ce projet, nous avons réussi à mettre en œuvre un système de monitoring d'une installation PV autonome en temps réel, reposant sur des capteurs de courant, de tension, de température et de lumière, ainsi que sur un microcontrôleur Arduino pour le traitement des données. Les informations ainsi collectées ont été stockées sur une carte SD, facilitant l'analyse a posteriori des performances du système. Ce contrôle automatisé apporte une contribution significative en termes de gestion de la production et de consommation d'énergie dans un cadre de petite échelle et de son étude paramétrique, tout en étant adaptable à des installations plus importantes.

La modélisation du système photovoltaïque, couplée à une simulation réalisée dans un environnement comme MATLAB/Simulink, nous a permis de valider les performances théoriques avant de passer à la phase de réalisation pratique. Les simulations ont non seulement fourni des données sur le comportement du système dans différentes conditions, mais elles ont également offert une vue d'ensemble des dynamiques entre production et consommation.

Les résultats obtenus au cours des expérimentations pratiques sont en accord avec les attentes, ce qui témoigne de la robustesse du système de contrôle mis en place. La capacité à surveiller en temps réel la production d'énergie a ouvert la voie à une meilleure gestion de la consommation, garantissant ainsi une exploitation plus optimisée du système.

Cependant, il est important de noter certaines limitations. En premier lieu, les conditions météorologiques variant de manière imprévisible, certaines variations de production n'ont pas été anticipées de manière précise dans les simulations. Par ailleurs, l'équipement utilisé, bien qu'efficace, pourrait être optimisé pour une meilleure précision et une plus grande résilience dans des environnements extrêmes.

Conclusion

À l'avenir, plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagés. Parmi ceux-ci, l'utilisation de techniques d'intelligence artificielle (IA), telles que l'apprentissage machine, pourrait permettre de mieux prévoir la production d'énergie solaire et d'adapter le comportement du système en fonction des données historiques et en temps réel. Par exemple, un modèle prédictif pourrait optimiser la gestion de l'énergie en fonction des prévisions météorologiques ou des habitudes de consommation. En ce qui concerne notre cas, on a intégré un algorithme de Maximum PowerPoint Tracking (MPPT) nous a permis d'améliorer encore davantage la performance du système en ajustant en permanence les conditions de fonctionnement des panneaux photovoltaïques pour maximiser la production d'énergie et aussi d'un système de data acquisition (PLX-DAQ) pour améliorer le traitement de données. En outre, la mise en réseau de plusieurs systèmes de surveillance permettrait de centraliser les données et d'en tirer des enseignements globaux pour des installations plus larges.

En conclusion, ce projet a permis de poser les bases d'un système de contrôle et de supervision simple, mais efficace, ouvrant ainsi des perspectives prometteuses pour l'optimisation des systèmes photovoltaïques dans des contextes de petite et moyenne envergure. Les travaux futurs pourront approfondir l'aspect de l'intégration des énergies renouvelables dans des systèmes plus complexes, tout en visant une meilleure efficacité énergétique.

**Références
bibliographiques**

- [1] <https://biblus.accasoftware.com/fr/les-differents-types-de-systemes-photovoltaiques-caracteristiques-et-avantages/> consulté le 8 juin 2024
- [2] M. T. Boukadoum, A. Hamidat et N. Ourabia << Le Pompage Photovoltaïque >> rapport du Centre De Développement. des Energies Renouvelables, Rev. Energ. Ren. : Zones Arides (2002) 69-7
- [3] "Bifacial Photovoltaics: A Technology Review" par MacAlpine et al. (2020)
- [4] "Recent Advances in Efficiency Improvement of Organic Solar Cells" par Qian et al. (2021)
- [5] (<https://www.rexel.com/>) (visité le 8 juin 2024)
- [6] (<https://www.theagilityeffect.com/fr/article/quelles-solutions-innovantes-et-robustes-pour-le-stockage-de-lelectricite/>) (visité le 8 juin 2024)
- [7] (<https://www.sirenergies.com/>) (02 mai 2024)
- [8] (ENGIE septembre 2020) dossier de presse
- [9] <https://azaneo.com/les-technologies-de-stockage-de-lenergie-pour-les-panneaux-solaires-photovoltaiques-batteries-hydrogene-etc/> Ecrit par Alexandre Dubois Publié le 20/10/2023 17:18, Fonctionnement des panneaux solaires (visité 15 avril 2024)
- [10] <https://www.sirenergies.com/article/innovations-stockage-electricite/>
- [11] <https://fr.euronews.com/green/2022/05/25/des-scientifiques-affirment-que-l-energie-solaire-peut-etre-stockee-pendant-18-ans> (visité le 16 avril 2024)
- [12] <https://www.sirenergies.com/> (visité le 02 mai 2024)
- [13] décret exécutif n° 21-158 du 24 avril 2021 du PLAN D'ACTION DU GOUVERNEMENT POUR LA MISE EN ŒUVRE DU PROGRAMME DU PRESIDENT DE LA REPUBLIQUE
- [14] Mefti A, Bouroubi M.Y, & Mimouni H, (2002), «Évaluation du Potentiel énergétique Solaire », Bulletin des Énergies Renouvelables(2) 02, décembre 2002
- [15] Lahmar F, Rahmouni S, & Chitour C.E, (2007), « Le Potentiel énergétique actuel de l'Algérie », École Nationale Polytechnique
- [16] (Ministère de l'Énergie, 2018b). Source : Banque Mondiale, disponible sur : <http://www.banquemondiale.org/>, (consulté le 24 avril 2024)
- [17] (Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques, 2015).
- [18] (SKTM, 2018)
- [19] (IRENA, 2019).
- [20] (Journal officiel, 2016). Textes Législatifs et Réglementaires Relatifs Aux Energies Renouvelables et à l'Efficacité Énergétique

- [21] “L’ÉNERGIE SOLAIRE: UN MOTEUR DU DÉVELOPPEMENT DURABLE EN ALGÉRIE “ Sara Cherifi Mohamed Haddad Oct 30, 2020
- [22] M.Koussa. Détermination du gisement solaire Alger- Bouzaréah. Thèse de magister .Alger.Mars1990
- [23] L.Kemmouche :Modèle de fonctionnement d’une station solaire PV en prévision de pannes ;Thèse de magistère .Constantine,2002.
- [24] Dr SAHEB – koussa, M.HAddadi and M.belhamel « étude de faisabilité et optimisation d’un system hybride (éolien-photovoltaïque-diesel) a fourniture d ; énergie électrique totalement autonome » Vol.2 N°.1 84-95, publié par Elsevier,30 juin 2010.
- [25] Saheb-Koussa, Djohra, Mourad Haddadi, Maiouf Belhamel, Seddik Hadji, and Said Nouredine. "Modeling and simulation of the fixed-speed WECS (wind energy conversion]
- [26]Anne Labouret , Pascal Cumunel , Jean-Paul Braun et Benjamin Faraggi «Cellules solaires Les Bases De L’énergie Photovoltaïque, 5e Édition, Editions Techniques Et Scientifiques Françaises,2010.
- system): application to the Algerian Sahara area." Energy 35, no. 10 (2010): 4116-4125.
- [27] Soler Robert, « L’énergie solaire : Des fondamentaux aux technologies d'aujourd'hui et de demain », Lavoisier, Paris, 2019.
- [28] [Kahoul Fouad, Caractéristique électrique d’une cellule solaire à hétérojonction a-Si: H/ $\mu\text{c-Si}$, mémoire de MASTER, 2014].
- [29] D. Hocine, cours de microélectronique 2023, chapitre 6 : Composants optoélectroniques.
- [30] Mlle BENHADDOUCHE NESRINE FATIMA, La Commande d’un système photovoltaïque d’un Satellite. Mémoire de master. Université de Telmcen, Algérie, 2014.
- [31] W. Herrman, W. Wiesner, W. Vaaben, « Hot spot investigations on PV modules – New concepts for a test standard and consequences for module design with respect to bypass diodes », 26th PVSC, Sept. 30 – Oct. 1997, Anaheim, CA.
- [32] M. C. Alonso-Garcia, J. M. Ruiz, F. Chenlo, « Experimental study of mismatch and shading effects in the I-V characteristic of a photovoltaic module », Solar Energy Materials & Solar Cells Volume 90, Issue 3, 15 February 2006, Pages 329-340.
- [33] J. P. David, J. Duveau, J. Guerin and A. Michel « Electrical and thermal testing and modelling of breakdown in space solar cells and generators », 23rd Photovoltaic Specialists Conference, 1993, 10-14 May 1993 pp 1415 - 1420]

ANNEXE

Annexe 1 :

Codes sources

- **Arduino : algorithm Arduino utilisé pour la recolte des donnés :**

```
#include <SD.h>
#include <Wire.h>
#include <Adafruit_ADS1015.h>
#define SD_CS_PIN 10
Adafruit_ADS1115 ads(0x48);
int16_t adc0;
int16_t adc1;
int16_t adc2;
int16_t ad0;
int16_t ad1;
float G;
float H;
float T;
float IB;
float IP;
float Vb;
float Vp;
```

```
float Pb;
float Pp;
float SOC;
const float V_min=22;
const float V_max=28;

File dataFile;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  Serial.println(F("CLEARDATA"));
  Serial.println(F("LABEL,Time,Date,Courant batterie(A) ,Courant pv(A) , Tension batterie(V), Tension
pv(V),Temperature(C) , Humidité(%) , Pyranometer(W/m²) , Puissance Batterie(W), Puissance PV(W)
,SOC (%) "));

  // Initialize SD card

  if (!SD.begin(SD_CS_PIN)) {

// Serial.println("SD Card initialization failed!");
    return;
  }

// Serial.println("SD Card initialized successfully!");
  dataFile = SD.open("data.txt", FILE_WRITE);
  if (dataFile) {

    dataFile.println("courant batterie(IB) ,courant pv(IP) , tension batterie(Vb), tension
pv(Vp),temperature(T) , humidité(H) , Pyranometer( $\mu$ V/W/m²) ,Puissance Batterie(W), Puissance
PV(W)");

    dataFile.close();

// Serial.println("Data file created!");
```

```
} else {  
// Serial.println("Error creating data file!");  
  
}  
  
ads.setGain(GAIN_TWOTHIRDS);  
  
// ads.setGain(GAIN_TWOTHIRDS); +/- 6.144V 1 bit = 0.1875mV (default)  
  
// ads.setGain(GAIN_ONE); +/- 4.096V 1 bit = 0.125mV  
  
// ads.setGain(GAIN_TWO); +/- 2.048V 1 bit = 0.0625mV  
  
// ads.setGain(GAIN_FOUR); +/- 1.024V 1 bit = 0.03125mV  
  
// ads.setGain(GAIN_EIGHT); +/- 0.512V 1 bit = 0.015625mV  
  
// ads.setGain(GAIN_SIXTEEN); +/- 0.256V 1 bit = 0.0078125mV  
  
ads.begin();  
delay(1000);  
}  
  
void loop() {  
  
ads.setGain(GAIN_TWOTHIRDS);  
ads.begin();  
delay(1000);  
  
for (int i = 1; i <=30; i++) {
```

.....

- **MATLAB SIMULINK : algorithm utilisé pour construire la fonction de l'MPPT sur MATLAB :**

```
function D = fcn(Vpv,Ipv)
Dinit=0.4;
Dmax=0.9;
Dmin=0.1;
deltaD=20e-6;
persistent Vold Pold Dold;
dataType="double";
if isempty(Vold)
    Vold=0;
    Pold=0;
    Dold=Dinit;
end
P=Vpv*Ipv;
.....
```

Annexe 2 :

PLX-DAQ (data acquisition) :

Time	Date	Courant batterie(A)	Courant pv(A)	Tension batterie(V)	Tension pv(V)	Température(C)	Humidité(%)	Pyranometrer(W/m ²)	Puissance Batterie(W)	Puissance PV(W)	SOC (%)
14:43:20	45544,00	0,90114	- 2,33438	26,60156	37,8125	28,84766	88,86719	371,11727	23,97162	88,26857	76,69
14:44:27	45544,00	-1,75114	- 0,68063	26,39649	31,20606	28,35938	87,89063	159,39012	46,22385	21,23964	73,27
14:45:34	45544,00	-1,06591	- -1,065	26,36719	37,06055	29,33594	88,37891	180,32493	28,10502	39,46945	72,79
14:46:41	45544,00	-1,33864	- 0,84563	26,39649	35,82519	29,33594	87,89063	221,24299	35,33533	30,2947	73,27
14:47:48	45544,00	-1,98636	- 0,34875	26,30859	31,95801	29,33594	89,84375	54,71601	52,25846	11,14533	71,81
14:48:55	45544,00	-2,0375	- -0,405	26,25	31,36719	28,84766	88,86719	181,27651	53,48441	12,70369	70,83
14:50:02	45544,00	-1,33864	- 0,82125	26,36719	35,82519	28,84766	89,84375	248,36311	35,29611	29,42142	72,79
14:51:09	45544,00	-0,63637	- 1,7175	26,45508	29,21875	29,33594	89,84375	309,2644	16,83509	50,18322	74,25
14:52:17	45544,00	-1,61477	- 0,60937	26,42578	35,39551	28,84766	88,37891	230,28303	42,67167	21,5691	73,76
14:53:24	45544,00	-1,13068	- 1,03688	26,33789	35,39551	28,84766	89,35547	196,02606	29,7798	36,70072	72,3

14:54:3			-							-	-	
1	45544,00	-1,94545	0,478 12	26,25	33,56 933	29,33 594	89,35 547	206,9 6925	51,06 818	16,05 033	70,83	
14:55:3			-						-	-		
8	45544,00	-2,08182	0,384 38	26,367 19	33,08 594	29,33 594	90,33 203	195,5 5026	54,89 171	12,71 744	72,79	
14:56:4			-						-	-		
5	45544,00	-2,00682	0,384 38	26,191 41	35,66 406	27,87 109	90,82 032	204,5 903	52,56 141	13,70 841	69,86	
14:57:5			-						-	-		
2	45544,00	-2,05796	0,461 25	26,396 49	33,51 562	28,35 938	91,30 86	214,5 8192	54,32 279	15,45 906	73,27	
14:58:5	45544,00	-1,93523	-	26,191	31,42	28,35	90,82	87,54	-	-	69,86	

9			0,543 75	41	09	938	032	562	50,68 635	17,08 509	
15:00:0 6	45544,00	-2,21818	- 0,399 37	26,25	33,89 16	28,84 766	90,82 032	182,2 281	58,22 726	13,53 546	70,83
15:01:1 3	45544,00	-0,88523	- 1,284 38	26,25	36,89 941	28,84 766	91,79 688	345,4 2456	23,23 725	47,39 269	70,83
15:02:2 0	45544,00	-0,78637	- 1,141 87	26,279 3	34,58 984	29,33 594	90,33 203	121,8 026	20,66 512	39,49 727	71,32
15:03:2 7	45544,00	2,39773	- 5,090 63	26,484 38	31,31 348	28,84 766	90,82 032	569,0 465	63,50 227	159,4 0518	74,74
15:04:3 4	45544,00	-1,82273	- 0,643 12	26,279 3	32,44 141	28,84 766	89,84 375	67,56 238	47,89 999	20,86 387	71,32
15:05:4 1	45544,00	-1,09318	- 1,076 25	26,279 3	33,51 562	28,35 938	91,30 86	208,3 9663	28,72 805	36,07 119	71,32

Annexe 3 :

A Illustrations du montage et de la mise en œuvre pratique :



- **figure 1: installation Photovoltaïque du CDER**



- **figure 2 : poste de contrôle**



- figure 3 : régulateur MPPT



- **figure 4 : unité de monitoring**

Résumé

Le mémoire d'étude en master « Contrôle et Supervision d'un système photovoltaïque à l'aide d'un microcontrôleur » a consisté en la conception et la mise en œuvre d'un système complet de surveillance permettant de suivre et d'optimiser à la fois la production et la consommation d'énergie solaire au sein du CDER Bouzareah. Grâce à l'intégration de capteurs de courant, de température, de lumière et de tension, reliés à un microcontrôleur, nous avons pu recueillir et stocker en temps réel des données cruciales, nécessaires à une analyse approfondie des performances du système. Les informations ainsi collectées ont permis de réaliser différents calculs et traitements pour assurer une gestion optimale du flux énergétique.

Ce projet a été entièrement réalisé par nos soins, depuis la phase de modélisation du système photovoltaïque jusqu'à sa simulation et sa mise en œuvre pratique. Chaque étape, de la conception théorique à l'installation concrète, a été exécutée avec rigueur, validant ainsi les performances attendues. Le succès de cette réalisation témoigne de la maîtrise des outils technologiques et des compétences pratiques nécessaires à la gestion et à la supervision des systèmes photovoltaïques. En définitive, l'objectif est de mettre en place une solution de contrôle efficace pour mieux gérer la production d'énergie photovoltaïque, tout en assurant un suivi précis de la consommation.

Abstract

The master's study dissertation "Control and Supervision of a photovoltaic system using a microcontroller" consisted of the design and implementation of a complete monitoring system making it possible to monitor and optimize both production and solar energy consumption within CDER Bouzareah. Through the integration of current, temperature, light and voltage sensors, linked to a microcontroller, we were able to collect and store crucial data in real time, necessary for in-depth analysis of system performance. The information thus collected made it possible to carry out various calculations and processing to ensure optimal management of the energy flow.

This project was entirely carried out by us, from the modeling phase of the photovoltaic system to its simulation and practical implementation. Each step, from theoretical design to concrete installation, was executed with rigor, thus validating the expected performances. The success of this achievement demonstrates the mastery of technological tools and practical skills necessary for the management and supervision of photovoltaic systems. Ultimately, the objective is to implement an effective control solution to better manage photovoltaic energy production, while ensuring precise monitoring of consumption.

Mots clefs: controle,supervision,installation photovoltaïque,microcontrôleur,Arduino,CDER.