

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DES SCIENCES
DEPARTEMENT PHYSIQUE
N° : Ph/ENR/17/2023



DOMAINE : Sciences de la matière
FILIERE : Physique
OPTION : Physique Énergétique et
Energie renouvelable

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master Académique

Par : Touama Toufik Mohamed

Intitulé

**Etude des panneaux solaires photovoltaïques
intégrés au bâtiment**

Soutenu le 24/06 /2023 devant le jury composé de :

MAHDI Khaled	Université M'sila	Président
HADDAD Zakaria	Université M'sila	Rapporteur
SALMI Mohamed	Université M'sila	Examineur

Année universitaire : 2022/2023

REMERCIEMENT

Je tiens tout d'abord à exprimer ma gratitude envers Allah Tout Puissant pour m'avoir accordé la santé, la force, la patience et les connaissances nécessaires pour poursuivre mes études et réaliser ce travail.

Je souhaite adresser mes remerciements sincères au Dr. Haddad Zakaria, qui a accepté de me superviser et m'a accordé sa confiance pour mener à bien ce travail. Son soutien constant et ses encouragements permanents ont été d'une grande valeur. Ses remarques et ses recommandations m'ont permis de mener à bien ce projet. Je prie Allah de le récompenser et de lui accorder le succès dans sa carrière.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude envers le Dr. Mahdi Khaled et le Pr. Salmi Mohamed pour avoir accepté d'évaluer mon travail. C'est un honneur et un immense plaisir de présenter ce travail devant vous.

Je tiens à remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire. Votre soutien et votre collaboration ont été précieux.

À vous tous, je souhaite adresser un grand merci.

DÉDICACE

À l'aide de "ALLAH", le Tout-Puissant.

Tous nos remerciements et gratitude.

À l'homme précieux qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect mon père, décédé prématurément Tous les mots du monde ne sauraient exprimer avec fidélité l'immense amour que je vous porte, Pour ses encouragements incessants et son soutien moral et matériel aux moments difficiles qui furent pour moi les meilleurs gages de réussite.

L'aide et les encouragements qu'il m'a donnés apporté durant toutes ces années d'étude sans lui Je ne serais pas ce que je suis aujourd'hui.

*Cher père **MOUSSA Touama** Dieu lui fasse miséricorde.*

*Mon adorable mère **MAROUF Soumya** qui m'a entouré d'amour, d'affection et qui fait tout pour ma réussite, que dieu la garde que Dieu vous donne santé et longue vie, afin que je puisse vous combler à mon tour. Mon frère: **Fethi** et Mes sœurs : **Oumayma** et **Nour** Pour leur disponibilité, leur soutien moral, leur encouragement incessant. Je vous dédie ce travail en témoignage de ma profonde affection et mon attachement en vous souhaitant beaucoup de bonheur, de santé et de réussite. Que Dieu nous unissent pour toujours.*

Mes amis chacun par son nom.

Tous les professeurs de l'enseignement supérieur et surtout mon encadrant Dr. Haddad Zakaira et Dr. Loukriz Abdelouadoud

A tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à ce travail.

mohamed

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES.....	I
LISTE DES TABLEAUX.....	II
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Besoins énergétiques dans un habitat

1. Introduction.....	3
2. Besoins énergétiques dans un habitat	3
2.1. Chauffage et climatisation.....	3
2.2. Ventilation.....	4
2.3. Eclairage.....	4
2.4. Production d'eau chaude.....	5
3. Consommation énergétique des logements anciens et récents.....	5
4. Conditions requises pour l'installation des panneaux photovoltaïques aux habitats...	6
4.1. Compatibilité de l'habitation.....	6
4.2. Assurer de la viabilité et de la rentabilité de l'installation de panneaux PV.....	7
5. Intégration architecturale des panneaux PV dans l'habitation.....	7
6. Conclusion.....	7

Chapitre II : État de l'art sur le BIPV

1. Introduction.....	9
2. Intégration de cellules photovoltaïques dans les bâtiments.....	9
3. BIPV et aspects architecturaux	11
4. Aperçu général sur le BIPV.....	11
4.1. Techniques d'intégration de BIPV.....	11
4.2. Produits en feuille BIPV.....	12
4.3. Produits de tuiles BIPV.....	15
4.4. Produits de modules BIPV.....	16
4.5. Produits de vitrage pour cellules solaires.....	16
4.6. Produits BAPV.....	17
5. Considérations sur la conception du BIPV.....	18
5.1. Orientation du bâtiment et ombrage	18

5.2.	Charge du bâtiment.....	19
5.3.	Enveloppe du bâtiment.....	20
6.	Performance et efficacité du BIPV.....	21
6.1.	Rendement des cellules PV.....	21
6.2.	Rendement du module.....	22
6.3.	Coefficient de température.....	24
7.	Tendances et applications du marché BIPV.....	25
7.1.	Bâtiments résidentiels.....	26
7.2.	Bâtiments commerciaux.....	26
7.3.	Infrastructures urbaines.....	26
8.	Défis et perspectives d'avenir du BIPV.....	26
8.1.	Coût.....	26
8.2.	Durabilité.....	26
8.3.	Intégration.....	26
8.4.	Normalisation.....	26
8.5.	Recherche et développement.....	26
9.	Conclusion.....	27

Chapitre III : Etude expérimentale & Résultats et discussion

1.	Introduction.....	29
2.	Site d'expérimentation (wilaya de M'sila).....	29
3.	Appareils de mesure utilisés.....	29
3.1.	Station météo.....	29
3.2.	Multimètre.....	30
3.3.	Thermomètre.....	31
3.4.	Résistance électrique.....	31
4.	Tests expérimentaux.....	32
4.1.	Paramètres météorologiques.....	32
4.1.1.	Irradiation solaire globale.....	33
4.1.2.	Vitesse du vent.....	33
4.1.3.	Humidité relative.....	34
4.2.	Températures des panneaux PVs.....	35
4.3.	Caractéristiques électriques des panneaux PVs.....	37
4.3.1.	Test de la journée 23/05/2023.....	37
4.3.2.	Test de la journée 29/05/2023.....	38

4.3.3.	Test de la journée 30/05/2023.....	41
5.	Conclusion.....	43
	Conclusion générale.....	45
	Références bibliographiques	

LISTE DES FIGURES

Figure I.1. Consommation d'énergie selon la date de construction et les choix écologiques....	6
Figure II.2. Exemples de BIPV en tant que produits de vitrage de cellules solaires pour (a) les façades et(b) les toits	10
Figure II.3 Feuille BIPV d'Alwitra GmbH et Co	13
Figure II.4 Produits tuile BIPV (a) SRS Energy, (b) Solar Century.....	14
Figure II.5. Produits de modules BIPV (a) Creaton AG, (b) Rheinzink	16
Figure II.6 Divers produits de vitrage pour cellules solaires de Sapa Building System	17
Figure II.7. Produits BAPV (a) ni-Soler, (b) Hauptsitz	18
Figure II.8. Ensemble des Bâtiments sous ombrages.....	19
Figure II.9. Compositions globale d'un module PV.....	23
Figure II.10. Connections des cellules dans un module PV.....	23
Figure II.11. Influence de la température sur le module PV.....	25
Figure III.1 Station météo de marque Vantage	30
Figure III.2 Multimètre.....	31
Figure III.3 Thermomètre digital de type TP2.....	31
Figure III.4 Résistance électrique.....	31
Figure III.5 Panneaux solaires photovoltaïques.....	32
Figure III.6 Variation temporelle de l'irradiation solaire globale durant les journées 23/29/30 Mai 2023.....	33
Figure III.7 Variation temporelle de la vitesse du vent durant les jours 23/29/30 Mai 2023.....	34
Figure III.8 Variation temporelle de l'humidité relative durant la journée pour 23/29/30 Mai 2023.....	34
Figure III.9 Variation temporelle de la température des panneaux PVs (a) Incliné et horizontal, (b) Vertical et incliné, (c) Vertical et horizontal.....	36

Figure III.10. Variations temporelle de la tension de panneau PV horizontal pendant la journée 23/05/2023.....	37
Figure III.11. Variations temporelle de la tension de panneau PV incliné pendant la journée 23/05/2023.....	37
Figure III.12. Variations temporelle de la tension de panneau PV vertical pendant la journée 29/05/2023.....	38
Figure III.13. Variations temporelle du courant de panneau PV vertical pendant la journée 29/05/2023.....	39
Figure III.14. Variations temporelle de la tension de panneau PV incliné pendant la journée 29/05/2023.....	39
Figure III.15. Variations temporelle du courant de panneau PV incliné pendant la journée 29/05/2023.....	40
Figure III.16. Variations temporelle de la tension de panneau PV vertical pendant la journée 30/05/2023.....	41
Figure III.17. Variations temporelle du courant de panneau PV vertical pendant la journée 30/05/2023.....	41
Figure III.18. Variations temporelle de la tension de panneau PV horizontal pendant la journée 30/05/2023.....	42
Figure III.19. Variations temporelle du courant de panneau PV horizontal pendant la journée 30/05/2023.....	42

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 Caractéristiques d'un produit des feuilles BIPV	13
Tableau II.2 Caractéristiques de certains produits tuile BIPV.....	14
Tableau II.3 Données littéraires pour certains produits de modules BIPV.....	15
Tableau II.4 Caractéristiques des produits de vitrage pour cellules solaires.....	17
Tableau II.5 Caractéristiques des produits BAPV	18
Tableau III.1 Caractéristiques des panneaux solaires.....	32

Introduction générale

Alors que le monde continue de faire face aux défis du changement climatique et de l'épuisement des ressources énergétiques, l'intégration des systèmes photovoltaïques au bâtiment (BIPV) dans la conception des bâtiments représente une étape cruciale vers un avenir durable. Ces systèmes offrent non seulement un moyen de générer de l'énergie propre et renouvelable, mais offrent également l'opportunité de redéfinir la relation entre l'architecture et la consommation d'énergie. En mélangeant harmonieusement l'esthétique, l'économie et l'innovation technique, les systèmes BIPV permettent la réalisation de bâtiments zéro énergie et zéro émission qui sont à la fois visuellement captivants et respectueux de l'environnement[1].

Les systèmes BIPV servent de solution à double usage en remplaçant les matériaux et composants de construction traditionnels dans l'enveloppe climatique, y compris les toits et les façades. Peng et al [2] soulignent que ces systèmes sont parfaitement intégrés dans la conception du bâtiment et sont considérés comme des éléments de construction fonctionnels [3]. Par conséquent, les systèmes BIPV servent non seulement de matériau d'enveloppe du bâtiment, mais fonctionnent également simultanément comme générateurs d'énergie [4].

Ce travail est basé sur une étude expérimentale sur le comportement électrique et thermique des panneaux solaires photovoltaïques sous les conditions météorologiques et environnementales de la ville de M'sila, avec différentes positions (vertical, horizontal et incliné), dans le but de les intégrer au bâtiment.

Pour atteindre cet objectif, nous avons divisé notre travail en trois chapitres avec une introduction et une conclusion générales.

- Le premier chapitre présente les besoins énergétiques dans un habitat tels que : ventilation, énergie mécanique et cuisson, froid, utilisation des équipements électroniques professionnels ou domestiques chauffage, climatisation, éclairage et production d'eau chaude sanitaire, et les conditions requises pour l'installation des panneaux photovoltaïques aux habitats
- Le deuxième chapitre résume brièvement l'état de l'art actuel du BIPV, y compris à la fois les feuilles BIPV, les tuiles, les modules et les produits de vitrage de cellules solaires, mentionnant également les systèmes photovoltaïques attachés au bâtiment BAPV.
- Le troisième chapitre est consacré à l'étude expérimentale et à la présentation des principaux résultats obtenus.

Chapitre I
Besoins énergétiques
dans un habitat

Introduction

Selon un scénario de l'Agence internationale de l'énergie, d'ici 2040, 14% de la consommation mondiale d'énergie proviendra des ménages, soit une augmentation de 57% par rapport au taux de 2010. Le secteur résidentiel est ainsi responsable d'une grande partie de la consommation énergétique. Loin d'être gouvernée par la seule efficacité énergétique des bâtiments, la consommation résidentielle reflète largement les pratiques énergétiques domestiques des ménages. Ce fait explique l'intérêt croissant et interdépendant des chercheurs et des gouvernements pour comprendre les déterminants de l'utilisation de l'énergie domestique afin de développer des mesures de rationalisation de la consommation. Au-delà des facteurs liés au bâtiment, le comportement des occupants joue un rôle non négligeable dans l'intensité de la consommation d'énergie dans les bâtiments résidentiels [5]. Dans ce contexte, on a présenté les besoins énergétiques de l'habitat, puis la solution pratique pour transférer l'habitat d'un élément consommateur d'énergie vers un élément générateur de celle-ci en intégration des panneaux PV dans la construction des habitations.

1. Besoins énergétiques dans un habitat

Un habitat est un élément consommateur d'énergie, il doit y avoir des fonctions dans lequel qui cause cette consommation très importantes, ces fonctions sont classées en deux catégories :

- Des fonctions générales qui correspondent à 80% de la consommation tels que : chauffage, climatisation, éclairage et production d'eau chaude sanitaire, en général sont de grosses consommatrices d'énergie et habituellement rencontrées dans la plupart des bâtiments.
- Des fonctions spécifiques ou auxiliaires tels que : ventilation, énergie mécanique et cuisson, froid, utilisation des équipements électroniques professionnels ou domestiques, sont spécifiques à certains locaux et en général modérément consommatrices d'énergie, sauf cas particuliers, mais néanmoins en forte croissance.

1.1. Chauffage et climatisation

Le chauffage et la climatisation sont des besoins fondamentaux pour l'homme. Tous les types des habitats sont équipés de systèmes de chauffage ou de refroidissement permettant de contrôler la température intérieure. Ces systèmes donnent la possibilité aux occupants d'ajuster la température et parfois le degré d'humidité en fonction de leurs besoins. Pour maintenir la température au niveau souhaité, les déperditions thermiques du local sont compensées par la production de chaleur. Elle devra donc avoir une puissance suffisante. Dans un bâtiment, on distingue deux types de locaux différents :

- Les locaux climatisés sont les pièces et couloirs, dans lesquels, la température doit être maintenue à un niveau défini par une ou plusieurs consignes.
- Les locaux non-climatisés sont les pièces et couloirs dans lesquels la température n'est pas contrôlée ou qui ne sont pas équipés de générateurs thermiques.

1.2. Ventilation

Est l'un des besoins les plus vitales pour un habitat. Elle a pour objet d'assurer une qualité et une quantité d'air hygiénique suffisantes aux occupants des habitats. Elle consiste à fournir un apport d'air neuf pour la respiration, à éliminer les pollutions intérieures liées à la présence humaine, et à éviter l'humidité excessive par une aération maîtrisée. Le principe de fonctionnement de la fonction ventilation se base sur le renouvellement d'un certain volume d'air intérieur d'une façon périodique par remplacement par de l'air neuf. Cette opération qui apparaît simple s'avère être très utile car elle permet d'évacuer la quantité de chaleur non nécessaire présente dans l'habitat. Les besoins de ventilation sont très variés, et cela suivant le type de l'immeuble, mais c'est ces besoins qui déterminent le dimensionnement et l'installation du système. Mais quel que soit l'ampleur de ces besoins, tous les systèmes de ventilation utilisent l'énergie électrique dans leurs fonctionnements.

1.3. Eclairage

Tout comme le confort thermique, le confort visuel est aussi un élément très influant pour assurer d'excellentes conditions de vie ou de travail. Il est réalisé à partir de l'éclairage qui est l'ensemble des moyens qui permettent à l'homme de maintenir les conditions de luminosité dans ses environnements pour éviter la fatigue oculaire. Les deux éléments caractérisant le service d'éclairage sont l'ambiance lumineuse et l'indice de rendu des couleurs :

- **L'ambiance lumineuse**

Dépend de la température des couleurs exprimée en Kelvin et le niveau d'éclairement, tandis que l'indice de couleur désigne l'effet d'une source de lumière sur l'aspect coloré des objets qu'elle éclaire, ou en d'autres termes, c'est l'aptitude de la lumière à restituer les couleurs. Selon la Commission Internationale de l'éclairage : l'IRC ou "Indice de Rendu des Couleurs" possèdent des degrés différents suivant la nécessité du site en question. Entre 80 et 85, le rendu des couleurs satisfait à des usages quotidiens dans le logement. Des valeurs supérieures à 85 désignent certains locaux de travail comme les bureaux et les salles d'enseignement. Les lampes à mettre en place doivent avoir un indice de rendu des couleurs supérieur à 95 pour assurer un bon choix de l'éclairage.

- **L'efficacité des lampes**

Pour un meilleur pilotage de critère du coût d'habitat, un bon choix des lampes avec une haute efficacité énergétique; peut aider à réduire le nombre des luminaires utilisés et donc mieux gérer la consommation globale de l'éclairage. Il en résultera ainsi une réduction de l'impact environnemental ainsi qu'une réduction du coût d'installation. De plus, le consommateur peut bénéficier d'avantage pour réduire son bilan financier global tout en coordonnant tous les paramètres comme la périodicité de la maintenance (entretien, test et remplacement des lampes) et le prix unitaire des lampes choisies.

1.4. Production d'eau chaude

Afin de coordonner confort et cout, dans l'habitat, la production d'eau chaude peut être une sous-production du chauffage. Et pour une mesure cohérente du besoin en eau chaude sanitaire, on doit tenir compte du type de bâtiment, du nombre d'occupants et des habitudes de l'usager. Ce besoin est calculé à l'aide de ces trois facteurs clés:

- Besoin en eau, exprimé soit en litres par heure ou par jour, soit en mètres cubes par an ; l'eau froide consommée est à une température variant de 8 à 15°C, avec une moyenne de 12°C.
- Température au robinet dont le niveau dépend de l'usage : 40°C pour lavabo, bidet, baignoire, douche, 60°C pour grand évier, plonge, buanderie (manuelle), 70°C pour machines à laver (vaisselle, linge).
- Fréquence de puisage, avec l'importance de chacun de ces puisages. Donc en assurant les différentes demandes de l'usager en eau chaude, les sources d'énergie les plus utilisées sont de deux types principaux :
 - Production instantanée par combustion (gaz, fioul domestique), la régulation de la température de l'eau chaude est contrôlée par le débit de gaz. Cependant, cette régulation s'adapte mal aux variations de débit d'eau. La température de l'eau chaude obtenue est assez variable.
 - Production à accumulation thermique, il s'agit d'un thermostat qui commande le fonctionnement du générateur. La production d'eau chaude peut être programmée en fonction du tarif de l'énergie électrique. En pratique, le ballon d'accumulation fonctionne la nuit pour profiter des heures creuses.

2. Consommation énergétique des logements anciens et récents

Le schéma de la consommation d'énergie, ci-dessous, montre les très fortes variations dans la performance énergétique des logements anciens par rapport aux logements actuels. Cependant, malgré

le renforcement de l'isolation thermique et l'efficacité des équipements de chauffage, la consommation d'énergie globale ne cesse d'augmenter. Les raisons principales sont l'augmentation de la surface des logements par rapport au nombre d'occupants et une amélioration générale du confort.

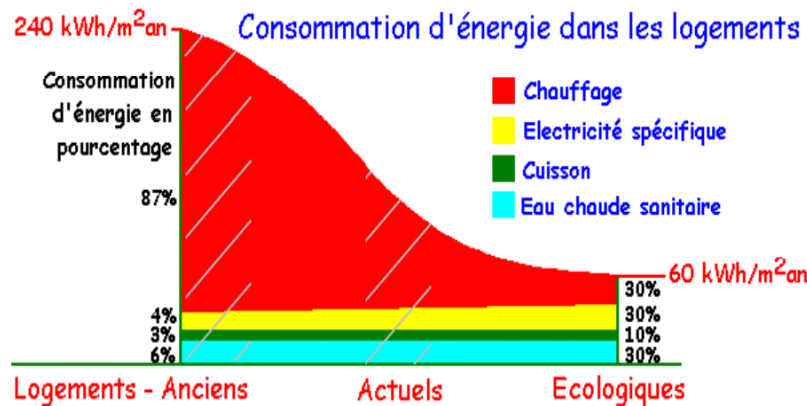


Figure I.1. Consommation d'énergie selon la date de construction et les choix écologiques

3. Conditions requises pour l'installation des panneaux photovoltaïques aux habitats

Les conditions principales d'installation des panneaux PV dans un habitat sont :

3.1. Compatibilité de l'habitation

La compatibilité dépend de l'habitation et de son architecture, où dans la plus part des cas, les panneaux PV seront installés sur la toiture, ainsi ils pourront capter les rayons du soleil de façon optimale. Pour cela, le toit doit répondre à certaines spécifications :

- Une pente de toit orientée vers le sud (idéalement, pas nécessairement).
- L'angle d'inclinaison optimal des panneaux PV est égal à latitude de site.
- Il n'y a pas d'obstacles directs qui ombragent le toit.

Pour s'assurer que la toiture est compatible avec l'installation de panneaux photovoltaïques, il est préférable de réaliser une étude préalable.

En effet, il existe d'autres endroits que la toiture pour les installer, tels que :

- La façade de la maison.
- Au sol, à condition d'avoir un grand terrain.
- Sur l'auvent d'une véranda ou d'un balcon.

3.2. Assurer de la viabilité et de la rentabilité de l'installation de panneaux PV

Les panneaux PVs représentent un investissement important. Alors pas question de se lancer la dedans sans avoir vérifié au préalable[6] :

- Que la production d'électricité générée par les panneaux serait suffisante pour l'habitation. Il existe pour cela des simulateurs, qui tiennent compte la durée d'ensoleillement de zone, de l'inclinaison du toit, etc. Ce serait dommage d'engager des frais pour s'apercevoir après coup que l'énergie produite n'est pas suffisante, alors on regarde bien la consommation sur les factures.
- Que le projet pourra être rentabilisé. Pour cela, on compare scrupuleusement les factures d'électricité et l'estimation d'électricité produite.

4. Intégration architecturale des panneaux PV dans l'habitation

En fait, l'intégration des panneaux photovoltaïque sur les toits et les façades de bâtiment est une solution prévenante dans l'environnement urbain. Les différentes techniques d'intégration architecturale des modules photovoltaïques dans un bâtiment ont été développées selon les types d'installations et l'orientation des bâtiments. Ainsi, les pertes de rayonnement solaires changent par les orientations et les inclinaisons de façades, où la position horizontale donne un bon résultat annuel par rapport à la position optimale, et la position verticale est moins importante[7].

5. Conclusion

Ce chapitre met en évidence l'importance de l'intégration des panneaux photovoltaïques pour répondre aux besoins énergétiques des habitations de manière durable. Nous avons identifié que les fonctions générales et spécifiques des habitations représentent une part significative de la consommation énergétique, nécessitant des solutions efficaces.

L'intégration des panneaux PVs dans la construction des habitations offre une solution prometteuse pour réduire la consommation énergétique. Cependant, cela nécessite des conditions spécifiques et une évaluation minutieuse de la viabilité et de la rentabilité. L'approche architecturale joue un rôle clé en maximisant la production d'électricité solaire. En tenant compte de l'orientation et de l'inclinaison des façades, nous pouvons exploiter au mieux l'énergie solaire dans les environnements urbains.

Ce travail de recherche ouvre la voie à des mesures concrètes pour promouvoir l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique et à la création de communautés plus durables.

Chapitre II
État de l'art
sur le BIPV

1. Introduction

Le photovoltaïque intégré au bâtiment (BIPV), où les cellules solaires sont intégrées dans les enveloppes des bâtiments et utilisent le rayonnement solaire pour produire de l'électricité, peut représenter un outil puissant et polyvalent pour atteindre ces objectifs en termes de solutions esthétiques, économiques et techniques [8],[9]. Les systèmes photovoltaïques intégrés au bâtiment (BIPV) remplacent certaines parties des matériaux de construction conventionnels et des systèmes dans l'enveloppe des bâtiments, tels que les toits et les façades. Les systèmes BIPV sont capables de produire de l'électricité pour répondre aux besoins énergétiques des bâtiments, tout en contribuant à la réduction de l'empreinte carbone globale de ces derniers [10]. Suite aux avantages de l'intégration des systèmes PVs aux bâtiments, de plus en plus de pays ont fixé des objectifs pour l'utilisation du solaire photovoltaïque dans le secteur du bâtiment, car l'intégration du photovoltaïque dans les façades des bâtiments représente un progrès significatif dans les applications solaires photovoltaïques urbaines. Le système solaire photovoltaïque permet non seulement d'économiser l'utilisation d'énergie conventionnelle, mais compense également le pic de production d'électricité à partir du charbon et du pétrole et les émissions des générateurs diesel. L'économie d'énergie est un déterminant très important pour l'utilisation du PV dans les bâtiments de nos jours. On s'attend généralement à ce qu'au cours du siècle prochain, le PV puisse contribuer de manière substantielle à la production d'électricité traditionnelle, même si le PV est maintenant jusqu'à cinq fois plus cher que l'électricité du réseau .

2. Intégration de cellules photovoltaïques dans les bâtiments

L'intégration de cellules photovoltaïques (PV) dans les bâtiments peut se faire sur des toits en pente, des toits plats, des façades et des systèmes de protection solaire [11]. Cependant, les systèmes BIPV remplacent l'enveloppe extérieure du bâtiment, servant ainsi simultanément d'écran climatique et de source d'énergie générant de l'électricité [12]. Par conséquent, les BIPV peuvent permettre des économies en matériaux et en main-d'œuvre, en plus de réduire les coûts d'électricité. Néanmoins, étant donné que les BIPV jouent le rôle d'écrans de protection climatique, il est d'une importance majeure d'avoir des exigences satisfaisantes ou strictes en matière d'étanchéité à la pluie et de durabilité. Plusieurs aspects doivent être considérés et évalués pour l'intégration des cellules PV dans l'enveloppe extérieure du bâtiment. L'un des aspects consiste à assurer une lame d'air sous les cellules solaires afin de fournir un flux d'air réduisant la température des cellules solaires, car une température élevée diminue l'efficacité des cellules solaires, en particulier pour les cellules Si mono- et polycristallines [13]. Un autre aspect à prendre en compte est l'inclinaison des BIPV, qui doit suivre l'inclinaison du toit (ou du mur

d'ailleurs) pour être des solutions intégrées, tant pour les bâtiments existants que neufs. La position géographique et l'orientation vers le soleil et la couverture de la zone sont d'autres aspects à prendre en compte lors de l'intégration des systèmes BIPV. En fait, certains fabricants de BIPV proposent également des modules pour donner un aspect plus esthétique et cohérent aux toits et aux façades. Les BIPV doivent remplir toutes les exigences en ce qui concerne plusieurs propriétés de l'enveloppe du bâtiment qu'ils remplacent [14]. Divers problèmes physiques du bâtiment, tels que la chaleur et l'humidité, doivent également être pris en compte. Des exemples de cellules solaires intégrées sous forme de tuiles BIPV et de modules BIPV sont illustrés à la Fig. 1. En outre, les BIPV en tant que produits de vitrage de cellules solaires dans la façade et sur le toit sont représentés à la Fig. 2. Le vitrage de cellules solaires offre une solution pour utiliser la fenestration en ce qui concerne la lumière du jour, le gain de chaleur solaire, l'ombrage solaire, les expressions architecturales diverses et, enfin, le gain d'énergie solaire en convertissant l'énergie solaire rayonnante en électricité.



Figure II.1. Exemples de tuiles BIPV (à gauche) et de modules BIPV (à droite)



Figure II.2. Exemples de BIPV en tant que produits de vitrage de cellules solaires pour (a) les façades et (b) les toits.

3. BIPV et aspects architecturaux

Diverses opportunités de conception architecturale innovante, qui peuvent également être esthétiquement attrayantes, sont fournis par divers systèmes BIPV, voir par ex. Fig. 1 et Fig. 2. Les BIPV peuvent être utilisés comme ombrage dispositifs et forment également des éléments de fenêtrage semi-transparents [8,9]. Les carreaux de silicone peuvent être appliqués su faire ressembler un toit BIPV à un toit en tuiles standard, tandis que des modules semi-transparents peuvent être appliqués dans les façades ou les plafonds de verre pour créer différents effets visuels. Présenter un toit BIPV comme un toit donnant une impression visuelle claire est préféré par certains architectes, tandis que d'autres veulent que le toit BIPV ressemble autant que possible à un toit standard. Informations supplémentaires sur l'intégration des systèmes d'énergie solaire dans les bâtiments en général, et l'intégration architecturale du PV et du BIPV dans notamment, se retrouvent dans les études de Hestnes [17], Farkas et al. [18] et Peng et al. [3] respectivement.

4. Aperçu général sur le BIPV

L'état de l'art du BIPV englobe l'ensemble des avancées technologiques, économiques et esthétiques qui ont été réalisées dans ce domaine. Les recherches ont permis d'améliorer la qualité et la performance des systèmes BIPV et de réduire leurs coûts. Les avancées dans la conception architecturale et la fabrication de matériaux ont également permis d'intégrer des cellules photovoltaïques de manière plus esthétique et harmonieuse dans l'enveloppe des bâtiments.

4.1. Techniques d'intégration de BIPV

La gamme de produits BIPV est très large et ils peuvent être classés de plusieurs manières différentes. Dans ce travail, la catégorisation est principalement effectuée sur la base des descriptions de produits des fabricants et avec quels autres types de matériaux les produits sont personnalisés pour être combinés. Les produits ou les systèmes BIPV ont été classés dans les groupes suivants [19]:

- Produits en feuille BIPV.
- Produits de tuiles BIPV.
- Produits de modules BIPV.
- Produits de vitrage pour cellules solaires.

De plus, lié aux différents produits BIPV, le système photovoltaïque appliqué au bâtiment (BAPV) les produits doivent également être mentionnés:

- **Produits BAPV**

Les produits photovoltaïques appliqués au bâtiment (BAPV) sont considérés comme des ajouts aux bâtiments, donc pas directement liés aux aspects fonctionnels des structures du bâtiment [3]. Autrement dit, les BAPV ne sont pas les BIPV, c'est-à-dire que les BAPV ne sont pas intégrés à l'enveloppe extérieure du bâtiment, ne remplaçant donc pas des éléments de construction traditionnels comme le font les BIPV. Certains produits BIPV présentent une variété de propriétés, ce qui rend plus difficile la catégorisation eux. Pourtant, dans d'autres cas, il peut même être assez difficile de déterminer si un produit PV doit être considéré comme un produit BIPV ou non, par ex. en raison du manque d'informations et de l'incertitude quant à la manière dont produit est monté. Dans ce qui suit, il est donné plus de détails et quelques exemples de chacun des différents groupes de produits BIPV. Pour un examen complet de l'état de l'art de ces systèmes BIPV, y compris les références et les coordonnées, il est fait référence aux travaux de Petter et al [15]. Les propriétés diverses des produits BIPV sont souvent regroupées dans des tableaux pour fournir aux lecteurs des informations précieuses sur ces produits. Cependant, malheureusement, il est souvent difficile d'obtenir toutes les informations souhaitées auprès des fabricants. En général, de nombreuses valeurs (par exemple, même l'efficacité) ne sont souvent pas disponibles sur les sites web des fabricants ou sur d'autres canaux d'information ouverts, ce qui se traduit par des espaces vides dans les tableaux de ce travail. Espérons que la prise en compte de ce fait incitera les fabricants à indiquer toutes les propriétés importantes de leurs produits sur leurs sites web et sur d'autres canaux d'information, et servira également d'incitation et de rappel aux utilisateurs pour demander ces valeurs aux fabricants.

4.2. Produits en feuille BIPV

Les produits en feuille BIPV sont légers et flexibles, ce qui est avantageux en ce qui concerne la facilité d'installation et les contraintes de poids en vigueur pour les toits. Les cellules PV sont souvent constituées de cellules à couche mince pour maintenir la souplesse du film et l'efficacité vis-à-vis des hautes températures pour une utilisation sur toiture non ventilée. Malheureusement, il existe actuellement peu de fabricants sur le marché qui fournissent des solutions. Le tableau 1 et la figure 3 présentent un exemple d'un produit de feuille BIPV. Les produits en feuille PV ont un faible facteur de remplissage dû à la fois au faible rendement et aux grandes résistances électriques des cellules solaires des cellules à couche mince. Cependant, il est possible de faire

varier le degré d'inclinaison du produit dans une large mesure à condition. Cependant, ces produits de feuilles de cellules solaires peuvent être facilement appliqués sur de nombreuses surfaces de bâtiments différentes [19].

Manufacturer	Product	Uoc (V)	I _{sc} (A)	P _{max} (W)	FF	Area (mm x mm)	P _{max} /Area (W/m ²)
Alwitra GmbH & Co	Evalon V Solar 408	138,6	5,1	408/ module	0,58	1550 x 6000	42,9
	Evalon V solar 136	46,2	5,1	136/ module	0,58	1050 x 3360	38,5

Tableau II.1 Caractéristiques d'un produit des feuilles BIPV [15]

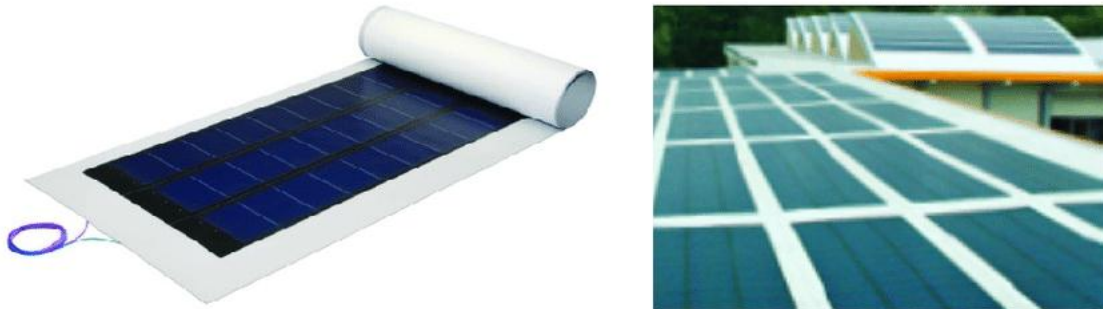


Figure II.3. Feuille BIPV d'Alwitra GmbH et Co.
(cellules de silicium amorphe d'Uni-Solar) [19].

4.3. Produits de tuiles BIPV

Les produits de tuiles BIPV peuvent couvrir tout le toit ou certaines parties du toit. Ils sont normalement disposés en modules ayant l'aspect et les propriétés des tuiles standards et substituer un certain nombre de tuiles traditionnelles, permettant ainsi également une rénovation facile des toits. Le type de cellule et la forme des tuiles varient. Certains produits carrelés peuvent ressembler à des carreaux de céramique incurvés et ne seront pas aussi efficace en raison de la surface incurvée, mais peut être plus esthétique [20]. Quelques exemples de BIPV Les produits de carreaux actuellement sur le marché sont présentés dans le tableau 2, dont deux sont illustrés à la figure 4.

Manufacturer	produit	Uoc (V)	Isc (A)	Pmax (W)	FF	Area (mm x mm)	Pmax/Area (W/m ²)
Solardachstein	STEPdesign	23,15	2,40	1,36/cell	0,76	8 units 100 x 100	136
SRS Energy	Solé Powertile	6,3	4,6	15,75/module	0,54	868 x 457,2	39,7
Lumeta	Solar Flat Tile	7,4	5,2	28/module	0,73	432 x 905	71,6
Solar Century	C21e Tile	12,0	5,55	52/module	0,78	1220 x 420	101,5

Tableau II.2 Caractéristiques de certains produits tuile BIPV [15]



Figure II.4. Produits tuile BIPV (a) SRS Energy, (b) Solar Century [14,13]

Les produits BIPV de Solardachstein, Lumeta et Solar Century (Tableau 2) ont les FF les plus élevés, ce qui indique que les rendements sont élevés. En fait, Solar Century rapporte une efficacité de 20% par cellule pour leur C21e tuile. Le concept de conception de STEPdesign et de Solé Powertile est qu'un module apparaît comme des tuiles de toit standard qui remplacent plusieurs tuiles de toit standard. Le module a un panneau intégré de cellules poly- ou monocristallines. C'est-à-dire que certaines parties du module ne sont pas recouvertes de cellules solaires, de sorte que l'efficacité totale de la surface ne sera pas aussi élevée qu'indiquée. La solution STEPdesign de Solardachstein peut être montée sur plusieurs types de tuiles différentes. La tuile C21e de Solar Century a une plus grande surface active que les produits précédents, car des cellules en silicium monocristallin couvrent toute la surface du module, et elle est compatible avec une série de tuiles et d'ardoises nommées. La tuile Solé Powertile de SRS Energy a une conception semblable à celle des tuiles de toit standard, et la couverture de cellules en silicium amorphe de Uni-Solar agit comme la peau des tuiles[13,14].

4.4. Produits de modules BIPV

Les produits de modules BIPV présentés sont quelque peu similaires aux modules PV conventionnels. La différence, cependant, est que les modules BIPV sont fabriqués avec des solutions de revêtement anti-intempéries. Certains produits peuvent remplacer différents types de toitures ou s'adapter à une solution de toiture spécifique produite par son fabricant. Ces systèmes de montage augmentent la facilité d'installation. Il existe une grande quantité de produits sur le marché et certains d'entre eux sont promus comme des produits BIPV sans en fait fonctionner comme des peaux de pluie, alors que d'autres produits ne sont pas très précis sur la façon dont ils sont réellement montés, ce qui entraîne une incertitude quant à savoir s'il s'agit de BIPV ou de BAPV. Les produits modulaires sont des modules préfabriqués avec une isolation thermique ou d'autres éléments inclus dans le corps. Quelques exemples de produits de modules BIPV sont donnés dans le tableau 3, dont deux illustrés dans la figure 5. Les valeurs FF données pour les produits de module BIPV dans le tableau 3 sont approximativement les mêmes. Les rendements des produits Abakus Solar AG dans le tableau 3 se situent entre 13,2% et 14,6%, Dupont fournit un rendement de 17,7%, tandis que les modules Schott Solar sont annoncés avec des rendements de 12,5% et 13,1%. Solar Century donne un rendement de 20% par cellule pour leur C21e Slate [13,14].

Constructeur	Produit	n(%)	U_{oc} (V)	I_{sc} (A)	P_{max} (W)	FF	Surface (mm x mm)	$P_{max}/Surface$ (W/m ²)
Creaton AG	Creaton Solesia		13.86	8.46	90/module	0.77	1778 × 355	142.6
Rheinzink	PV Quickstep		17.10	5.12	68/module	0.78	2000 × 365	93.2
Abakus Solar AG	PeakOn P220-60	13.2	36.77	8.22	220	0.73	1667 × 1000	132.0
	Peak On P235-60	14.6	37.21	8.48	235	0.74	1630 × 1000	144.2
	ANT P6-60-230	14.0	36.77	8.42	230	0.74	1658 × 986	140.7
DuPont	Gevity	17.7	24.20, 24.43	8.77, 8.87	160, 165	0.75, 0.76	1332.5 × 929, 1332.5 × 929	129.36, 133.4
Suntech	MSZ-190J-D		45.2	5.62	190/module	0.75	1641 × 834.5	139
	MSZ-90J-CH		22.4	5.29	90/module	0.76	879 × 843.5	125
Schott Solar	InDax 214	12.5	36.3	8.04			1769 × 999	
	InDax 225	13.1	33.5	6.60			1769 × 999	
Solar Century	C21e Slate	20/c ell	12.0	5.55	52	0.78	1174 × 318	139.3

Tableau II.3 Données littéraires pour certains produits de modules BIPV [13].



Figure II.5. Produits de modules BIPV (a) Créaton AG, (b) Rheinzink [19].

4.5. Produits de vitrage pour cellules solaires

Les BIPV en tant que produits de vitrage pour cellules solaires offrent une grande variété d'options pour les fenêtres, vitrées ou carrelées façades et toits, différentes couleurs et transparences peuvent rendre de nombreux différents esthétiquement agréables résultats possibles. Quelques exemples de produits de vitrage pour cellules solaires sont donnés dans le tableau 4 et la figure 6. Les modules de vitrage à cellules solaires transmettent la lumière du jour et servent de protection contre l'eau et le soleil. La distance entre les cellules solaires (normalement 3-50 mm) dépend du niveau de transparence souhaité et des critères de la production d'électricité. L'espace entre les cellules transmet la lumière du jour diffuse. Par conséquent, à la fois l'ombrage et l'éclairage naturel est fourni tout en produisant de l'électricité. Les fabricants de vitrages pour cellules solaires proposent généralement des produits personnalisés concernant la forme, le matériau de la cellule, la couleur et le niveau de transparence, c'est-à-dire la distance entre les cellules, alors que le tableau 4 présente quelques modules prédéfinis. Par exemple, le niveau de transparence varie de 16% à 41% pour divers Vidursolar alors qu'il est de 25% pour le produit Abakus Soler AG Peak In P210-60. Les différents modèles de Sapa Building System illustré à la Fig. 6 utilise des matériaux amorphes, polycristallins ou monocristallins cellules avec des séparations cellulaires différentes [19].

Constructeur	Produit	n(%)	U_{oc} (V)	I_{sc} (A)	P_{max} (W)	FF	Surface (mm x mm)	$P_{max}/$ Surface (W/m ²)
Abakus Solar AG	Peak In P210-60		36.5 0	7.70			2000 × 1066	
Vidursolar	FV VS16 C36 P120		21.6	7.63			1600 × 720	
Glaswerke Arnold GmbH & Co KG	Voltaflux-ASI-T- Mono 4-fach		93	1.97	100/module	0.55	2358 × 1027	41.3
Schott Solar	ASI THRU-1-L ASI THRU-4-IO	6 6	111 111	0.55 2.22	48 190	0.79 0.77	1122 × 690 1122 × 2619	62.0 64.7
Sapa Building System	Amorphous silicon thin film Poly-crystalline Mono-crystalline high efficient	5/cell 16/cell 22/cell			32/cell 1.46–3.85/cell 2.90–3.11/cell		576 × 976/cell 156 × 156/cell 125 × 125/cell	50 120 155

Tableau II.4 Caractéristiques des produits de vitrage pour cellules solaires [13].

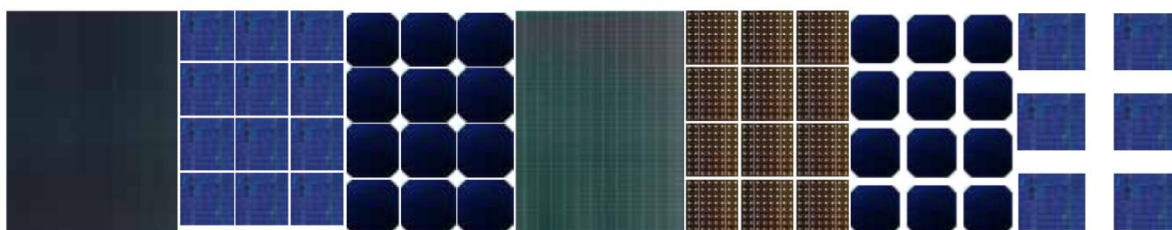


Figure II.6 Divers produits de vitrage pour cellules solaires de Sapa Building System [19].

4.6. Produits BAPV

Comme mentionné précédemment, les produits BAPV sont ajoutés plutôt qu'intégrés dans le toit ou la façade. Les produits BAPV ne font pas l'objet de cette étude, mais il est tout de même intéressant d'en examiner certains. Outre, le produit flexible d'Uni-Soler est utilisé par plusieurs autres fabricants. Les produits sont donnés dans le tableau 5, avec deux d'entre eux représentés dans la figure 7. L'efficacité du produit Hauptsitz est annoncée à 17,7%, tandis qu'Isofoton donne

une efficacité de 14,5% pour leur produit (tableau 5). Le stratifié Uni-Soler est flexible, ce qui facilite son intégration avec d'autres matériaux de construction.

Constructeur	Produit	n(%)	U_{oc} (V)	I_{sc} (A)	P_{max} (W)	FF	Surface (mm x mm)	$P_{max}/$ Surface (W/m ²)
Uni-Solar	PVL-68		23.1	5.1	68/module	0.58	2849 × 394	60.6
	PVL-144		46.2	5.3	144/module	0.59	5486 × 394	66.6
Hauptsitz	SunPower 220 Solar Panel	17.7	48.6	5.75			1559 × 798	
Isofoton	ISF-240	14.5	37.1	8.45	240	0.77	1667 × 994	144.8

Tableau 5. Caractéristiques des produits BAPV [13].

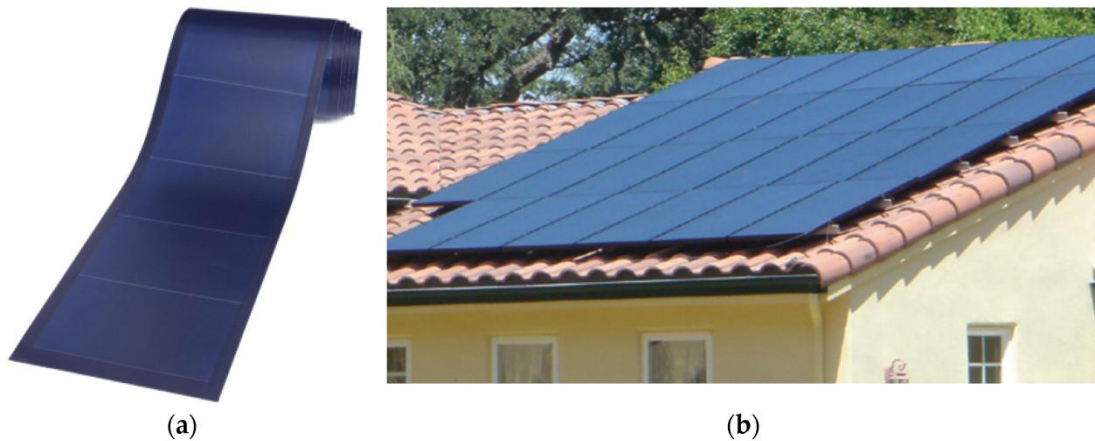


Figure II.7 Produits BAPV (a) Uni-Soler, (b) Hauptsitz

5. Considérations sur la conception du BIPV

Les systèmes BIPV comportent plusieurs aspects de conception qui doivent être pris en compte, notamment :

5.1. Orientation du bâtiment et ombrage

Au cours de la période moderne, les controverses sur l'orientation solaire des bâtiments témoignent de la difficulté à donner une signification pratique à l'injonction hygiéniste d'une insolation "maximale". Entre la recherche de la plus longue durée d'ensoleillement (exposition est-ouest), l'optimisation saisonnière de l'énergie transmise aux façades (exposition nord-sud) ou la dilution des ombres (exposition diagonale), les choix d'orientation apparaissent incertains. Les controverses qui en résultent trouvent un écho important dans la littérature théorique produite

dans la première moitié du 20e siècle, mais leur influence sur les pratiques réelles de construction est encore mal connue.

L'orientation et l'ombrage d'un bâtiment peuvent avoir un impact significatif sur les performances des systèmes BIPV. Les bâtiments orientés vers le sud et peu ombragés sont idéaux pour les installations BIPV (figure 8).

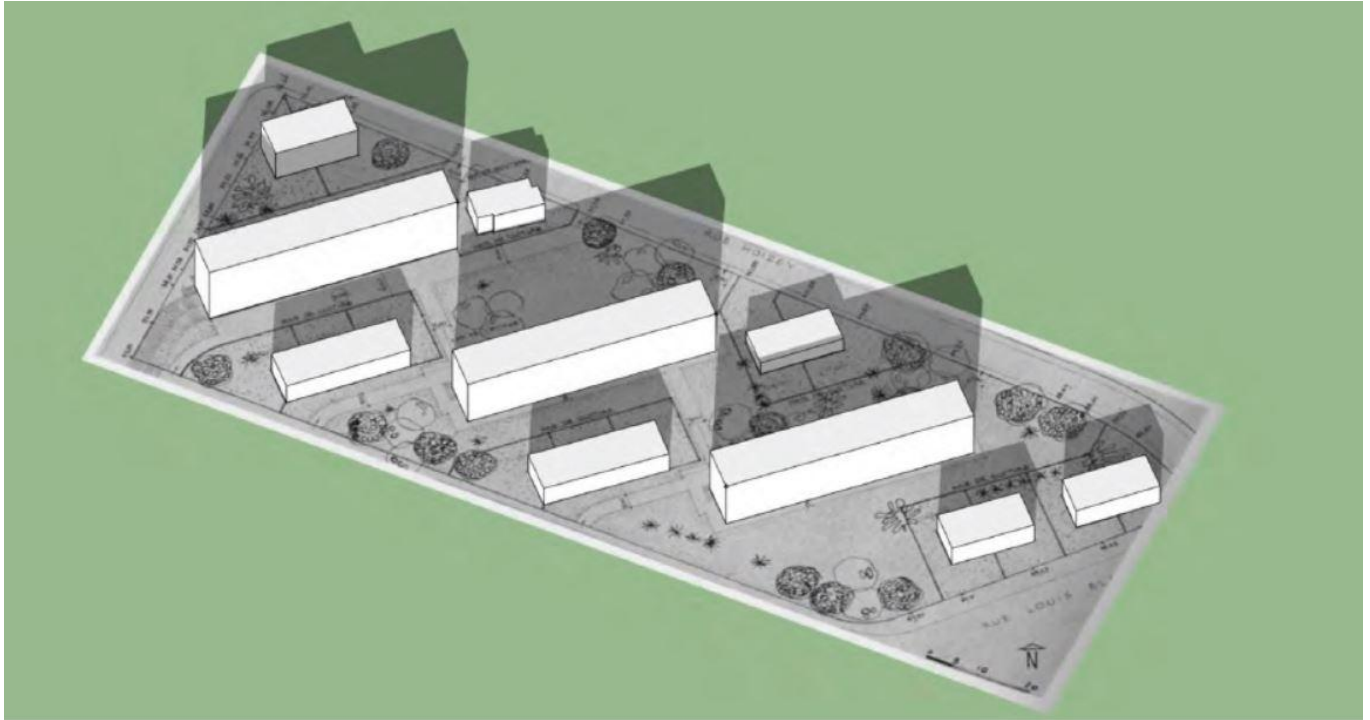


Figure II.8 Ensemble des Bâtiments sous ombrages.

5.2. Charge du bâtiment

La charge du bâtiment, ou la quantité d'énergie consommée par le bâtiment, doit être prise en compte lors de la conception d'un système BIPV. La taille et la capacité du système BIPV doivent être basées sur la consommation d'énergie du bâtiment. La charge du bâtiment fait référence à la quantité d'énergie consommée par un bâtiment à diverses fins, telles que le chauffage, le refroidissement, l'éclairage et les appareils électroménagers. La charge du bâtiment doit être prise en compte lors de la conception d'un système BIPV, car elle influe sur la taille et la capacité du système nécessaire pour répondre aux besoins énergétiques du bâtiment[15,16].

Pour déterminer avec précision la charge du bâtiment, il est nécessaire de réaliser un audit énergétique complet du bâtiment. Il s'agit d'analyser les schémas de consommation d'énergie du bâtiment et d'identifier les zones où la consommation d'énergie est élevée. L'audit peut également révéler des possibilités d'amélioration de l'efficacité énergétique, telles que l'installation de

systèmes d'éclairage ou de chauffage, de ventilation et de climatisation plus efficaces. Une fois la charge du bâtiment déterminée, le système BIPV peut être conçu pour répondre à une partie ou à la totalité des besoins énergétiques du bâtiment. Il est important de noter que la conception du système BIPV ne doit pas compromettre l'intégrité structurelle ou l'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment. Le système BIPV doit être intégré à l'enveloppe du bâtiment de manière à préserver l'intégrité des barrières thermiques et hygrométriques du bâtiment[15,16].

Pour maximiser la production d'énergie du système BIPV, il est recommandé d'orienter les modules vers le soleil et d'éviter les ombres. L'orientation et l'angle des modules doivent être optimisés pour capter le maximum de lumière solaire tout au long de la journée. La taille et la capacité du système BIPV doivent également être conçues pour correspondre à la charge du bâtiment et aux besoins énergétiques, tout en tenant compte des changements futurs de la demande énergétique [21].

Globalement, la charge du bâtiment est un facteur essentiel à prendre en compte lors de la conception d'un système BIPV. Un audit énergétique approfondi peut aider à déterminer la charge du bâtiment et à identifier les domaines dans lesquels il est possible d'améliorer l'efficacité énergétique. Concevoir le système BIPV en fonction de la charge du bâtiment peut contribuer à réduire les coûts énergétiques et les émissions de carbone, tout en assurant l'indépendance énergétique du bâtiment [15,16].

5.3. Enveloppe du bâtiment

La conception de l'enveloppe du bâtiment, y compris les systèmes de couverture et de bardage, doit être compatible avec l'installation BIPV. Le système BIPV ne doit pas compromettre l'intégrité structurelle ou l'étanchéité de l'enveloppe du bâtiment [15]. L'enveloppe du bâtiment est la limite physique qui sépare les environnements intérieurs et extérieurs d'un bâtiment. Elle comprend les murs, le toit, les fenêtres, les portes et les autres éléments qui entourent le bâtiment. L'enveloppe du bâtiment joue un rôle crucial dans la performance d'un bâtiment et doit être prise en compte lors de la conception d'un système BIPV. La conception du système BIPV ne doit pas compromettre les barrières thermiques et hygrométriques de l'enveloppe du bâtiment. Une bonne intégration du système BIPV dans l'enveloppe du bâtiment peut contribuer à maintenir l'efficacité énergétique et la durabilité du bâtiment. Cette intégration implique de s'assurer que les modules BIPV ne créent pas de lacunes ou de fuites dans l'enveloppe du bâtiment et que les modules n'obstruent pas le flux d'air ou de vapeur d'eau[15-17].

Les matériaux utilisés pour l'enveloppe du bâtiment peuvent également affecter les performances du système BIPV. Par exemple, une surface de toit très réfléchissante peut augmenter la quantité

de lumière solaire réfléchi sur les modules BIPV, ce qui peut accroître leur efficacité. En revanche, une toiture de couleur sombre peut absorber plus de chaleur et réduire l'efficacité du système BIPV. Outre les matériaux utilisés, l'orientation et l'angle de l'enveloppe du bâtiment peuvent également affecter les performances du système BIPV. L'orientation et l'angle du toit et des murs peuvent avoir un impact sur la quantité de lumière solaire que les modules BIPV reçoivent tout au long de la journée. L'orientation et l'angle idéaux dépendent de la latitude et du climat de l'emplacement du bâtiment[15-17].

Globalement, l'enveloppe du bâtiment est un facteur essentiel à prendre en compte lors de la conception d'un système BIPV. L'intégration correcte des modules BIPV dans l'enveloppe du bâtiment peut contribuer à maintenir l'efficacité énergétique et la durabilité du bâtiment. Les matériaux utilisés ainsi que l'orientation et l'angle de l'enveloppe du bâtiment peuvent également affecter les performances du système BIPV. Une approche globale de la conception prenant en compte tous ces facteurs peut contribuer à maximiser la production d'énergie du système BIPV et à améliorer la durabilité globale du bâtiment [23].

6. Performance et efficacité du BIPV

La performance et l'efficacité des systèmes BIPV sont des facteurs critiques pour leur adoption et leur viabilité commerciale. Plusieurs facteurs affectent la performance et l'efficacité des systèmes BIPV, notamment :

6.1. Rendement des cellules PV

Le rendement des cellules photovoltaïques utilisées dans les modules BIPV est un facteur essentiel de leur performance. Des cellules plus efficaces produiront plus d'électricité par unité de surface du module. L'efficacité des cellules fait référence à la capacité des cellules photovoltaïques (PV) à convertir la lumière du soleil en électricité. L'efficacité des cellules PV est l'un des facteurs les plus importants qui déterminent l'efficacité et les performances globales d'un système BIPV. Un rendement plus élevé des cellules signifie qu'une plus grande quantité de lumière solaire peut être convertie en électricité, ce qui se traduit par une plus grande production d'énergie par le système BIPV[24].

Au fil des ans, des progrès significatifs ont été réalisés dans l'amélioration de l'efficacité des cellules photovoltaïques. Les cellules photovoltaïques de première génération, fabriquées à partir de silicium cristallin, avaient un rendement d'environ 6 à 10%. Aujourd'hui, les cellules photovoltaïques peuvent atteindre des rendements de 23 à 25%. Ces cellules PV à haut rendement sont généralement fabriquées à partir de matériaux tels que le silicium monocristallin,

le silicium polycristallin et les matériaux à couche mince tels que le tellure de cadmium, le sélénure de cuivre indium gallium et le silicium amorphe [18,19]. L'efficacité des cellules photovoltaïques dépend de plusieurs facteurs, notamment du type de matériau utilisé, du processus de fabrication, de la taille et de l'épaisseur de la cellule, et de la qualité de sa surface. Des matériaux et des processus de fabrication de meilleure qualité peuvent se traduire par une plus grande efficacité des cellules. En outre, des cellules plus grandes, avec une plus grande surface et une épaisseur plus fine, peuvent capter plus de lumière solaire et produire plus d'électricité. L'amélioration de l'efficacité des cellules a contribué à l'adoption croissante des systèmes BIPV. L'efficacité accrue des cellules permet d'utiliser des modules BIPV plus petits et plus esthétiques sans compromettre la production d'énergie. Il est donc possible d'intégrer les systèmes BIPV aux façades, aux toits et à d'autres éléments architecturaux sans nuire à la conception du bâtiment[18,19].

En conclusion, l'efficacité des cellules photovoltaïques est un facteur crucial qui affecte la performance et la viabilité des systèmes BIPV. Les progrès réalisés en matière d'efficacité des cellules ont contribué à l'adoption croissante des systèmes BIPV et ont permis d'intégrer la production d'énergie solaire dans la conception des bâtiments. L'amélioration continue de l'efficacité des cellules augmentera encore la viabilité et le potentiel de la technologie BIPV.

6.2. Rendement du module

L'efficacité du module BIPV, qui comprend les cellules photovoltaïques et d'autres composants (figure 9), tels que l'encapsulant et la feuille arrière, est un autre facteur critique de sa performance. Des modules plus efficaces produiront plus d'électricité par unité de surface de l'installation. L'efficacité du module fait référence à l'efficacité des modules PV, qui sont constitués de plusieurs cellules PV connectées entre elles comme indique dans la figure 10. L'efficacité du module est un facteur critique qui détermine l'efficacité et la performance globales d'un système BIPV. Un rendement élevé des modules signifie qu'une plus grande quantité de lumière solaire peut être convertie en électricité, ce qui se traduit par une plus grande production d'énergie par le système BIPV.

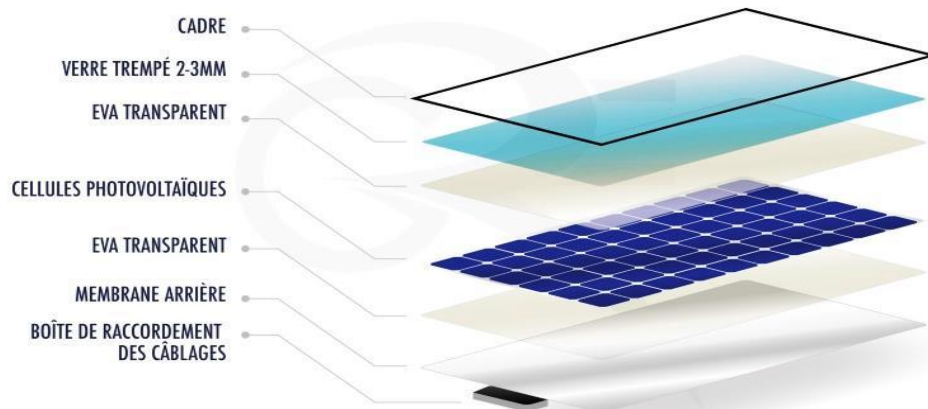


Figure II.9 Compositions globale d'un module PV.

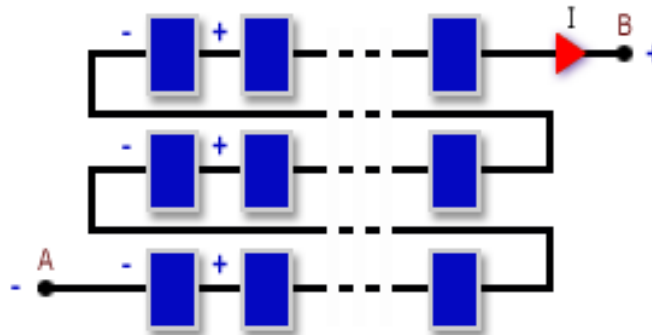


Figure II.10 connexions des cellules dans un module PV

L'efficacité du module est influencée par divers facteurs, notamment l'efficacité des cellules PV utilisées, le type de technologie du module, ainsi que la conception et la construction du module. Les types les plus courants de technologies de modules PV utilisés dans les systèmes BIPV sont les modules monocristallins, polycristallins et à couche mince. Les modules monocristallins sont généralement les plus efficaces, avec des rendements allant de 18 à 22 %. Ces modules sont fabriqués à partir de silicium de haute pureté et ont un aspect noir uniforme. Les modules polycristallins sont légèrement moins efficaces, avec des rendements allant de 15 à 18 %. Ces modules sont fabriqués à partir de silicium de moindre pureté et ont un aspect bleuté. Les modules à couche mince sont généralement les moins efficaces, avec des rendements allant de 7 à 13%. Ces modules sont fabriqués à partir de fines couches de divers matériaux, dont le tellure de cadmium, le sélénure de cuivre indium gallium et le silicium amorphe [26]. Outre le type de technologie utilisée, la conception et la construction du module peuvent également influencer sur son efficacité. L'épaisseur du module, l'espacement entre les cellules et la qualité de la

surface du module peuvent tous avoir un impact sur l'efficacité du module. En outre, l'orientation et l'angle du module peuvent affecter la quantité de lumière solaire qu'il reçoit, ce qui peut avoir une incidence sur son efficacité. L'amélioration de l'efficacité des modules a contribué à l'adoption croissante des systèmes BIPV. Une meilleure efficacité des modules signifie que des modules BIPV plus petits et plus esthétiques peuvent être utilisés sans compromettre la production d'énergie. Cela permet d'intégrer les systèmes BIPV aux façades, aux toits et à d'autres éléments architecturaux sans nuire à la conception du bâtiment.

6.3. Coefficient de température

Le coefficient de température du module BIPV fait référence à l'effet de la température sur ses performances. Les modules BIPV ayant un coefficient de température plus faible seront plus performants dans les environnements à haute température [13]. Le coefficient de température est une mesure de la manière dont l'efficacité d'un module photovoltaïque (PV) est affectée par les changements de température. Les changements de température peuvent affecter la tension et le courant de sortie d'un module photovoltaïque comme illustre dans la figure 11, ce qui peut avoir un impact sur son efficacité et ses performances globales. Le coefficient de température est exprimé en pourcentage par degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$). Un coefficient de température négatif signifie que l'efficacité du module PV diminue à mesure que la température augmente. En effet, à mesure que la température augmente, la tension et le courant de sortie diminuent, ce qui entraîne une réduction du rendement. Inversement, un coefficient de température positif signifie que le rendement du module photovoltaïque augmente avec la température. En effet, lorsque la température augmente, la tension et le courant de sortie augmentent, ce qui entraîne une amélioration du rendement. Le coefficient de température est influencé par divers facteurs, notamment le type de matériau utilisé dans le module photovoltaïque, le processus de fabrication, ainsi que la conception et la construction du module [27].

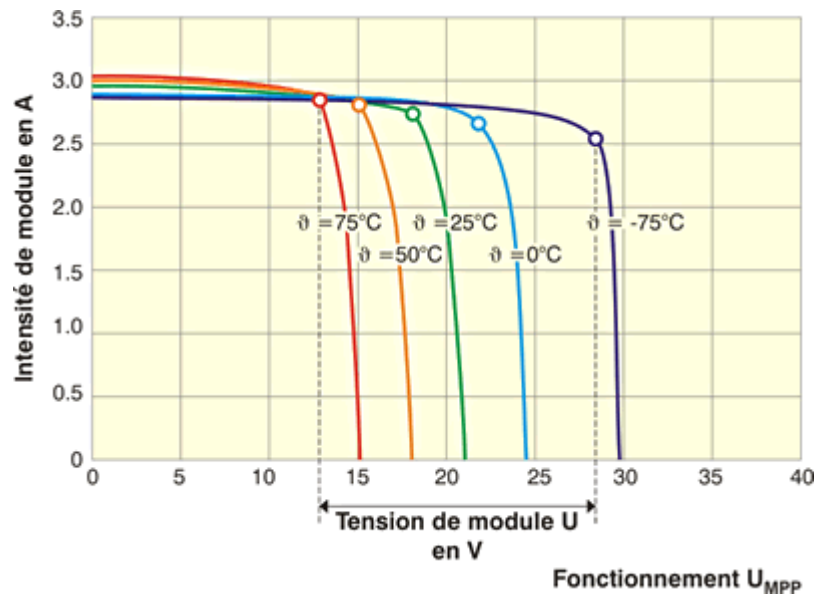


Figure II.11 Influence de la température sur le module PV

Les différents types de matériaux photovoltaïques ont des coefficients de température différents, certains matériaux étant plus performants que d'autres dans des environnements à haute température. En outre, la conception et la construction du module peuvent avoir un impact sur son coefficient de température. Les systèmes BIPV ont généralement un coefficient de température inférieur à celui des systèmes PV traditionnels. Cela s'explique par le fait que les systèmes BIPV sont intégrés dans des éléments de construction, tels que les toits et les façades, qui offrent une certaine isolation contre les fluctuations de température. Cette isolation permet de maintenir une plage de température plus stable pour les modules photovoltaïques, réduisant ainsi l'impact des changements de température sur leur efficacité. En conclusion, le coefficient de température est un facteur critique qui affecte l'efficacité et la performance des modules PV dans les systèmes BIPV. Un coefficient de température plus faible signifie que les modules photovoltaïques sont plus résistants aux changements de température, ce qui se traduit par une meilleure efficacité et de meilleures performances. La conception et la construction des systèmes BIPV peuvent contribuer à atténuer l'impact des changements de température sur l'efficacité des modules, ce qui en fait une option plus attrayante pour la production d'énergie solaire dans les bâtiments [28].

7. Tendances et applications du marché BIPV

Le marché du BIPV connaît une croissance rapide, avec un nombre croissant de bâtiments intégrant des systèmes BIPV. Les tendances du marché et les applications des systèmes BIPV sont les suivantes :

7.1. Bâtiments résidentiels

Les systèmes BIPV sont de plus en plus utilisés dans les bâtiments résidentiels, où ils peuvent compenser la consommation d'électricité du bâtiment et assurer l'indépendance énergétique.

7.2. Bâtiments commerciaux

Les systèmes BIPV sont utilisés dans les bâtiments commerciaux, où ils permettent de réaliser des économies d'énergie et d'apporter une valeur esthétique.

7.3. Infrastructures urbaines

Les systèmes BIPV sont utilisés dans les infrastructures urbaines, telles que les abribus, les lampadaires et les supports à vélos, pour produire de l'électricité et fournir de l'éclairage.

8. Défis et perspectives d'avenir du BIPV

Malgré les progrès significatifs réalisés dans le domaine de la technologie BIPV, plusieurs défis doivent encore être relevés pour que le potentiel de cette technologie soit pleinement exploité. Voici quelques-uns des défis et des orientations futures de la technologie BIPV :

8.1. Coût

Les systèmes BIPV sont encore plus chers que les systèmes de toiture et de bardage traditionnels, ce qui peut limiter leur adoption.

8.2. Durabilité

Les modules BIPV doivent être suffisamment durables pour résister aux conditions climatiques difficiles et aux contraintes mécaniques de l'enveloppe du bâtiment.

8.3. Intégration

Les modules BIPV doivent être intégrés dans l'enveloppe du bâtiment de manière transparente et sans compromettre l'intégrité structurelle ou l'étanchéité du bâtiment.

8.4. Normalisation

La normalisation des composants et des systèmes BIPV peut contribuer à réduire les coûts et à améliorer la fiabilité et les performances des systèmes BIPV.

8.5. Recherche et développement

La poursuite de la recherche et du développement dans le domaine de la technologie BIPV peut conduire à des systèmes plus efficaces, plus durables et plus rentables.

9. Conclusion

La technologie BIPV a considérablement évolué ces dernières années, avec des progrès dans les matériaux, la conception et les techniques d'intégration. Les systèmes BIPV offrent plusieurs avantages par rapport aux systèmes de toiture et de bardage traditionnels, notamment en termes d'économies d'énergie, de réduction des émissions de carbone et de valeur esthétique. Malgré les défis à relever, l'avenir de la technologie BIPV est prometteur. Les systèmes BIPV ont le potentiel de jouer un rôle important dans la réduction de l'empreinte carbone des bâtiments et dans la réalisation de l'indépendance énergétique. Grâce à l'amélioration constante de la technologie, les systèmes BIPV deviennent plus efficaces, plus durables et plus rentables. Le marché des systèmes BIPV est en pleine croissance, avec un nombre croissant de bâtiments intégrant la technologie BIPV. La demande de bâtiments durables et économes en énergie ne cessant de croître, les systèmes BIPV sont susceptibles de se généraliser. Le développement de la technologie BIPV est une étape importante vers la réalisation d'un environnement bâti durable et économe en énergie.

Chapitre III

Etude expérimentale & Résultats et discussion

1. Introduction

Ce chapitre présente les résultats d'une série des tests expérimentaux menés au Laboratoire de Physique et Chimie des Matériaux de l'Université Mohamed Boudiaf à M'sila, Algérie. L'effet de l'angle d'inclinaison des panneaux solaires photovoltaïques intégré aux bâtiments a été étudié. Pour cela, on a choisis les trois positions principales des panneaux photovoltaïques : vertical, horizontal et incliné. Les essais ont été réalisés sous les conditions extérieures et atmosphériques de la ville de M'sila. Une étude comparative a été faite et les résultats obtenus ont été présentés dans ce chapitre

2. Site d'expérimentation (wilaya de M'sila)

M'sila est un point de contact entre l'est, l'ouest, le sud et le nord de l'Algérie. Elle a une superficie de 18 175 kilomètres carrés et est situé dans des coordonnées géographiques qui incluent une altitude de 477 mètres, une latitude de 35 degrés 70 nord et une longitude de 4 degrés 54 est. La durée d'ensoleillement annuel moyen à M'sila est de 3 570,73 heures et son albédo est de 0,2. En Algérie, et généralement dans l'hémisphère nord, il est préférable d'orienter le champ solaire vers le sud. L'angle d'inclinaison exprime l'angle d'installation des panneaux solaires par rapport à l'horizontale

3. Appareils de mesure utilisés

Les paramètres mesurés sont : le courant, la tension et la température des panneaux.

3.1. Station météo

Les paramètres météorologiques sont mesurés à l'aide d'une station météo de marque Vantage Pro2 des laboratoires Davis comme présenté dans la figure III.1. La station météo de marque Vantage Pro2 des laboratoires Davis est un équipement couramment utilisé pour mesurer les paramètres météorologiques. Voici les principaux paramètres que cette station peut mesurer :

- Température : La Vantage Pro2 mesure la température de l'air à l'aide d'un capteur intégré.
- Humidité relative : Elle est mesurée en pourcentage, indiquant la quantité d'humidité présente dans l'air.
- Pression atmosphérique : La station météo Vantage Pro2 est équipée d'un baromètre qui mesure la pression atmosphérique. Cette mesure est souvent utilisée pour prédire les changements météorologiques.

- Vitesse et direction du vent : Un anémomètre est utilisé pour mesurer la vitesse du vent, tandis qu'une girouette indique la direction d'où provient le vent.
- Précipitations : La Vantage Pro2 peut mesurer la quantité de précipitations sous forme de pluie, de neige ou de grêle. Cela est généralement réalisé à l'aide d'un pluviomètre intégré.
- Rayonnement solaire : Certains modèles de la station météo Vantage Pro2 sont équipés d'un capteur de rayonnement solaire, qui mesure l'intensité du rayonnement solaire.
- Indice UV : Certains modèles peuvent également mesurer l'indice UV, qui indique l'intensité des rayons ultraviolets du soleil.

Ces paramètres météorologiques sont enregistrés par la station météo Vantage Pro2 et peuvent être consultés sur son écran intégré ou transmis à un ordinateur ou à une console de réception pour un enregistrement à plus long terme et une analyse ultérieure.



Figure III.1 Station météo de marque Vantage

3.2. Multimètre

Le multimètre est un appareil électrique permettant d'effectuer des mesures électriques, comme des intensités, des tensions ou des résistances électriques. Il regroupe un voltmètre, un ampèremètre et un ohmmètre.



Figure III.2 Multimètre

3.3. Thermomètre

Le thermomètre est composé d'un embout à capteur et de sondes électroniques, affichant la température sur un écran numérique de type TP2. Il mesure les températures des panneaux solaires photovoltaïques.



Figure III.3 Thermomètre digital de type TP2

3.4. Résistance électrique

Le multimètre est connecté en série avec la résistance illustré à la figure III.4 pour mesurer le courant



Figure III.4 Résistance électrique.

4. Tests expérimentaux

Trois panneaux solaires monocristallins de type SFM-100 (figure III .5), qui génèrent 100W sont utilisés. Ils ont testés pendant les journées de 23, 29 et 30 mai 2023. Ces panneaux ont été installés vers le sud à différents angles d'inclinaisons, à savoir 0° , 36° et 90° .

L'étude expérimentale a été menée au laboratoire de physique et chimie des matériaux, département de physique, université de M'sila, sous les conditions météorologique de M'sila.

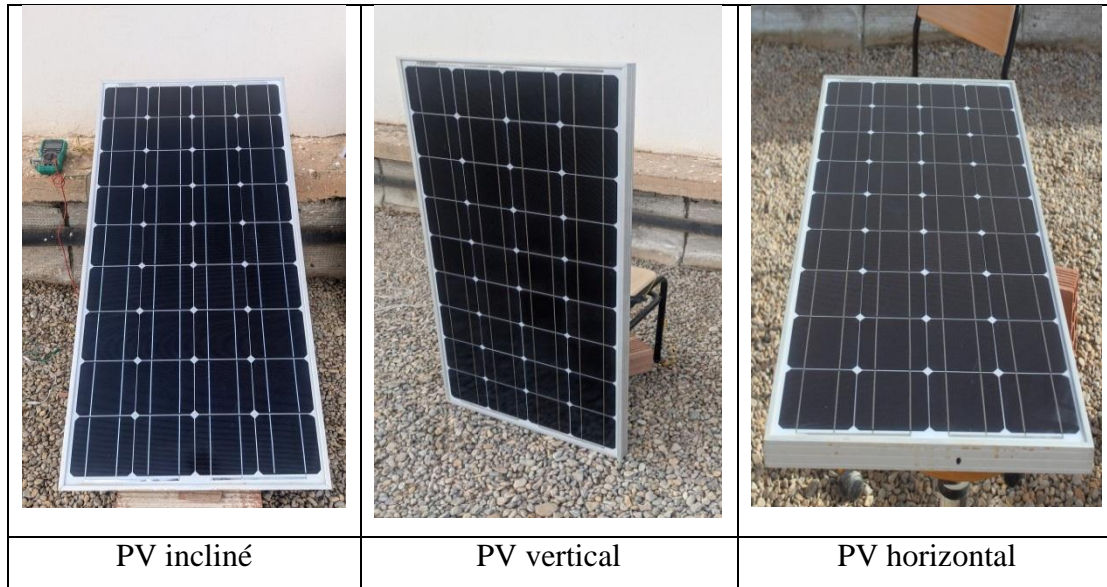


Figure III.5 Panneaux solaires photovoltaïques.

Les caractéristiques des panneaux solaires sont présentées dans le tableau III.1

Panneau solaire de type : SFM-100	
Puissance maximale (P_{max})	100 W
Voltage à Pmax (V_{mp})	18,1 V
Courant à Pmax (I_{mp})	5,51 A
Voltage (open-circuit) (V_{oc})	21,6 V
Courant (short-circuit) (I_{sc})	6,06 A

Tableau III.1 Caractéristiques des panneaux solaires.

4.1. Paramètres météorologiques

Il est important de noter que les paramètres météorologiques tels que le rayonnement solaire, la température ambiante, la vitesse du vent et l'humidité relative ont un impact sur les performances

des systèmes photovoltaïques. Ces paramètres sont cruciaux pour évaluer correctement les performances du système PV.

4.1.1. Irradiation solaire globale

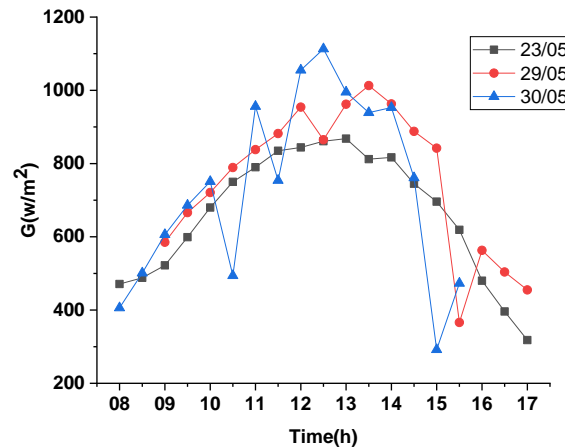


Figure III.6 Variation temporelle de l'irradiation solaire globale durant les journées 23/29/30 Mai 2023.

La figure III.6 illustre les variations de l'irradiation solaire globale pour les trois jours des tests. Pour le 1^{er} jour au lever du soleil, l'irradiation solaire globale est faible, indiquant le début de la journée. Au fur et à mesure l'irradiation solaire globale augmente progressivement, atteignant un pic de plus de 800 W/m² au milieu de la journée. Ensuite, l'irradiation solaire globale diminue lentement. Pour le deuxième jour (29/05), la courbe montre qu'il y a un passage des nuages entre 12:00-14:00 h, et entre 15:00-16:00, où l'irradiation solaire globale diminué de façon rapide et irrégulière. Pour le 3^{ème} jour (30/05), la courbe montre de fluctuations rapides et irrégulières de rayonnement solaire global tout au long de la journée en raison de la présence des nuages.

4.1.2. Vitesse du vent

La figure III.7 illustre la variation temporelle de la vitesse du vent pendant les trois jours des tests.

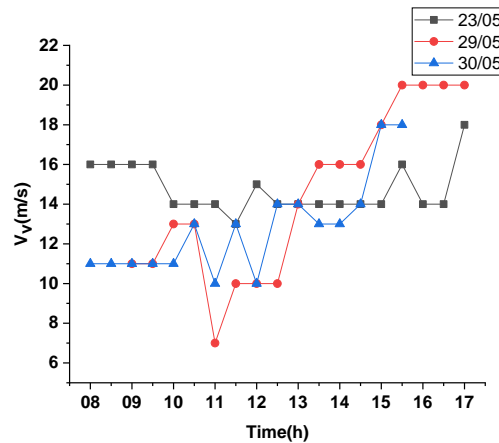


Figure III.7 Variation temporelle de la vitesse du vent durant les jours 23/29/30 Mai 2023.

La figure III.7 montre que pour tous les jours des tests, en début, la vitesse du vent est relativement stable. Au cours de la journée, la vitesse du vent diminue progressivement. L'après-midi, l'augmentation reprend jusqu'à ce qu'elle atteigne son pic pendant les heures avant le coucher du soleil.

4.1.3. Humidité relative

La figure III.8 illustre la variation de l'humidité relative pour les trois jours étudiés,

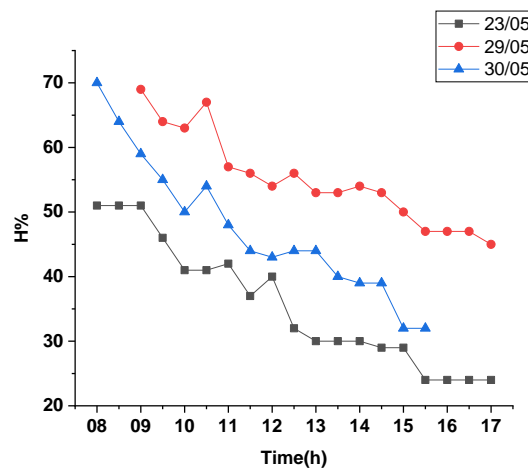
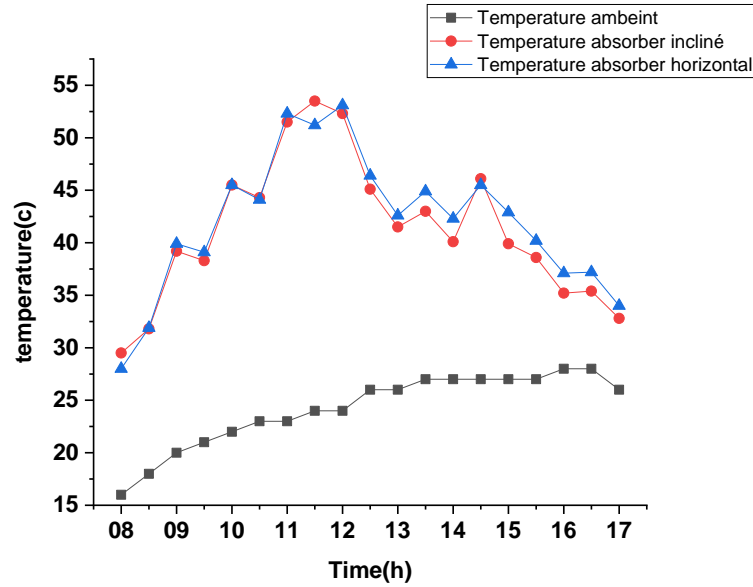


Figure III.8 Variation temporelle de l'humidité relative durant la journée pour 23/29/30 Mai 2023

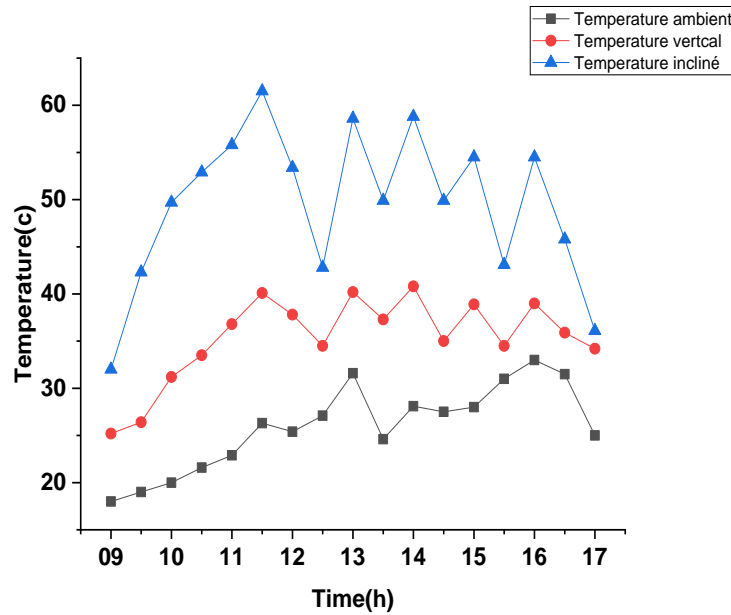
La figure III.8 illustre que les courbes des trois jours en la même allure. Au début de la journée on observe que le taux de l'humidité relative est élevé, indiquant une atmosphère relativement humide après une nuit de condensation. Au cours de la journée, l'humidité diminue

progressivement au fur et à mesure que la journée avance. Cela peut être dû à l'évaporation accrue, à l'activité solaire croissante et à la circulation atmosphérique.

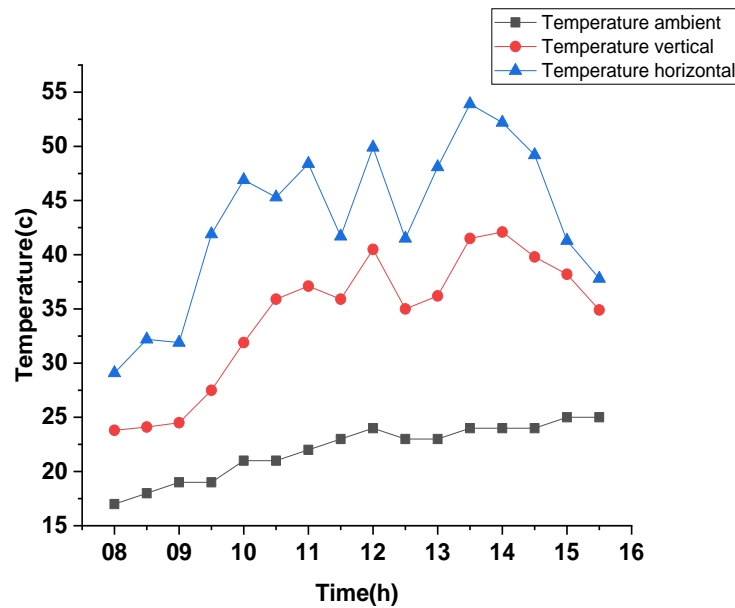
4.2. Températures des panneaux PVs



(a)



(b)



(c)

Figure III.9 Variation temporelle de la température des panneaux PVs
 (a) Incliné et horizontal, (b) Vertical et incliné, (c) Vertical et horizontal.

La figure III.9 présente les variations temporelles des températures des panneaux PVs au cours de la journée pour différentes inclinaison. Au lever du soleil, les températures sont relativement basses, puis augmenter progressivement au fur et à mesure que la journée avance. Les heures de pointe de température peuvent varier en fonction de la localisation géographique et des conditions météorologiques.

Notant que la température ambiante est plus basse que la température des panneaux PVs pour tous les cas, car les modules PVs sont exposés au rayonnement solaire direct.

Les modules PV horizontaux et inclinés ont des températures plus élevées en raison de l'exposition directe au rayonnement solaire, tandis que les modules PV orientés verticalement ont des températures relativement plus basses en raison d'une exposition moins directe au rayonnement solaire.

4.3. Caractéristiques électriques des panneaux PVs

4.3.1. Test de la journée 23/05/2023

- **Panneau Horizontal**

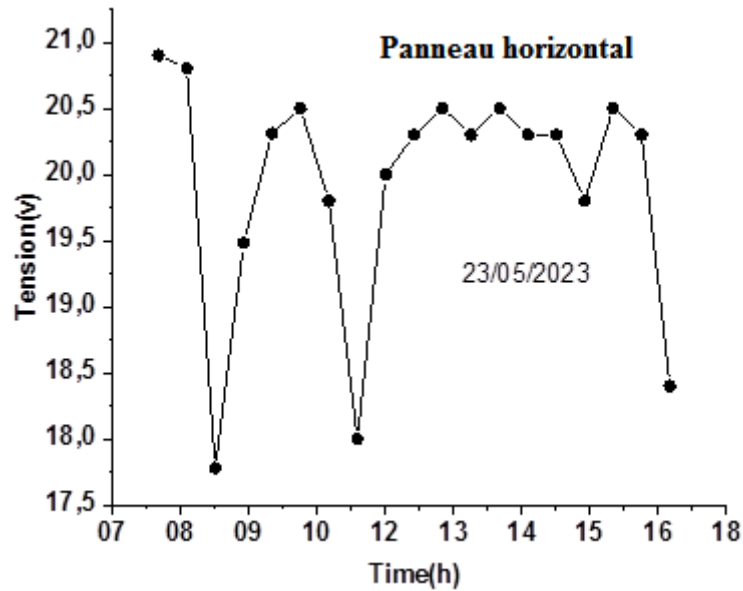


Figure III.10 Variations temporelle de la tension de panneau PV horizontal pendant la journée 23/05/2023

La figure 10 présente les mesures de la tension V de panneau solaire orienté horizontalement, durant la journée de 23/05/2023. Les valeurs mesurées de la tension varient entre 17,5 V et 21 V.

- **Panneau incliné**

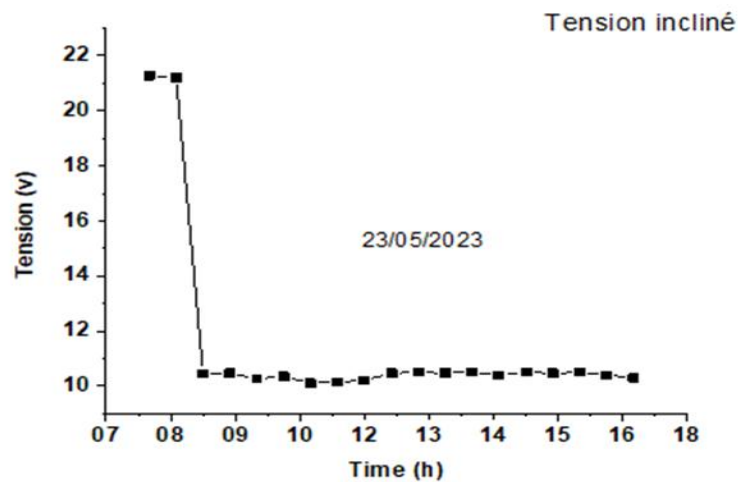


Figure 11 Variations temporelle de la tension de panneau PV incliné pendant la journée 23/05/2023

La figure 11 illustre les valeurs mesurées de la tension V de panneau solaire étudié, qui est incliné à un angle de 36° , tout au long de la journée de 23/05/2023. Les valeurs mesurées montrent une quasi-égalité d'environ 10 V.

La comparaison entre les deux cas (incliné et horizontal) montre que l'orientation horizontale donne de meilleur valeur pendant la saison estivale. Car, en été, lorsque le soleil est au zénith et près de l'horizon, l'orientation horizontale de panneau permet une collecte plus importante de rayonnement solaire. Cela se traduit par une augmentation significative de l'énergie fournie par le panneau solaire.

4.3.2. Test de la journée 29/05/2023

- **Panneau vertical**

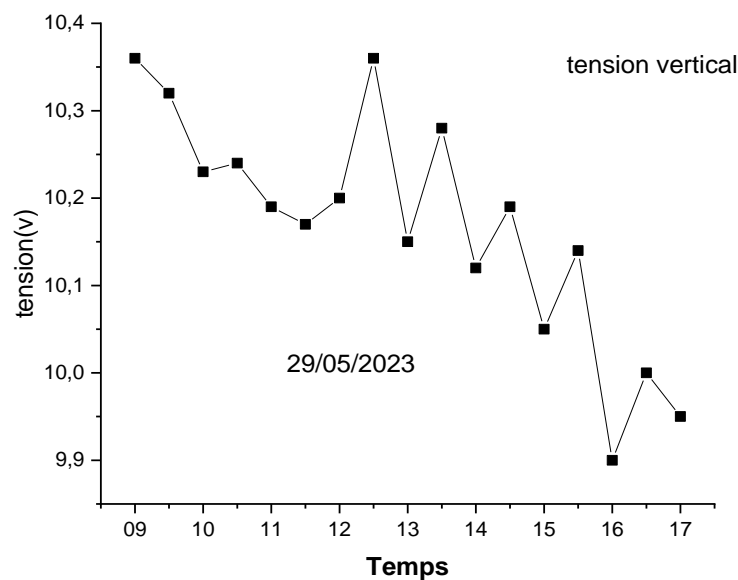


Figure III.12 Variations temporelle de la tension de panneau PV vertical Pendant la journée 29/05/2023

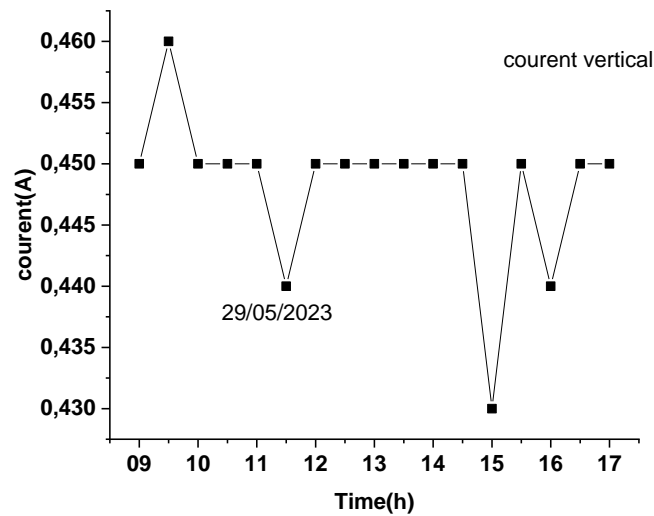


Figure III.13 Variations temporelle du courant de panneau PV vertical
Pendant la journée 29/05/2023

Les figures 12 et 13 présentes les mesures des tensions et des courants respectivement de la journée 29/05/2023 pour le panneau solaire vertical. Les valeurs de tension varient entre 9,9 et 10,3 V, tandis que les valeurs de courant varient entre 0,43 et 0,46 A.

- **Panneau incliné**

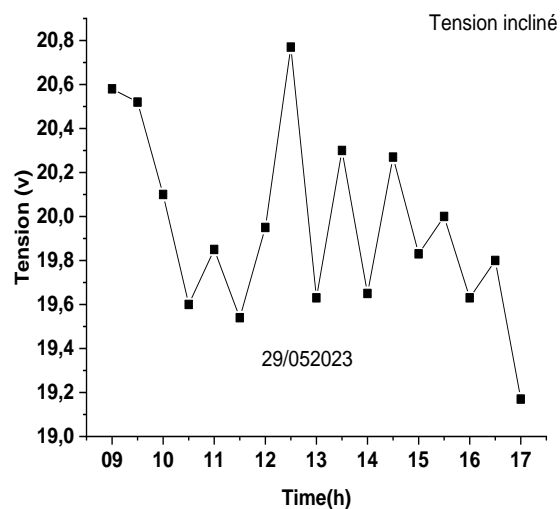


Figure III.14 Variations temporelle de la tension de panneau PV incliné
Pendant la journée 29/05/2023

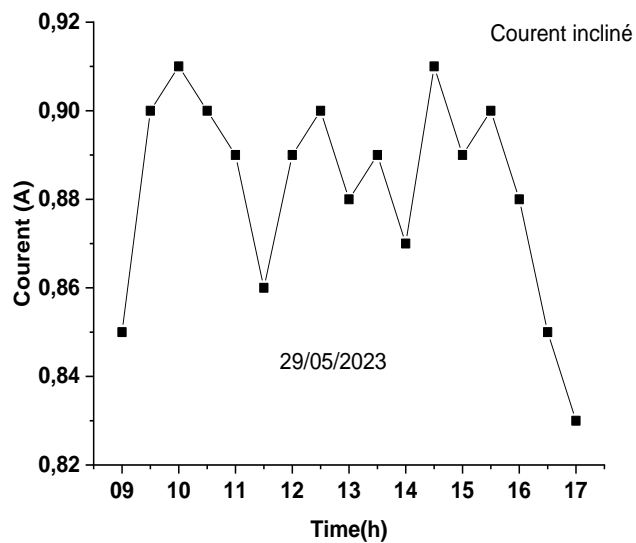


Figure III.15 Variations temporelle du courant de panneau PV incliné
Pendant la journée 29/05/2023

Les figures 14 et 15 présentent les mesures des tensions et des courants respectivement de la journée 29/05/2023 pour le panneau solaire incliné avec un angle de 36° . Les valeurs de la tension varient entre 19,2 et 21,7 V, tandis que les valeurs de courant varient entre 0,82 et 0,91 A.

En comparant les deux cas d'orientation incliné et vertical, on constate que le panneau incliné de 36° pendant la saison estivale donne les meilleurs résultats. En été, lorsque le soleil est au zénith et près de l'horizon, une orientation proche de l'horizontale du panneau solaire permet une captation plus importante de rayonnement solaire. Cela se traduit par une augmentation significative de l'énergie produite par le panneau solaire.

4.3.3. Test de la journée 30/05/2023

- Panneau vertical

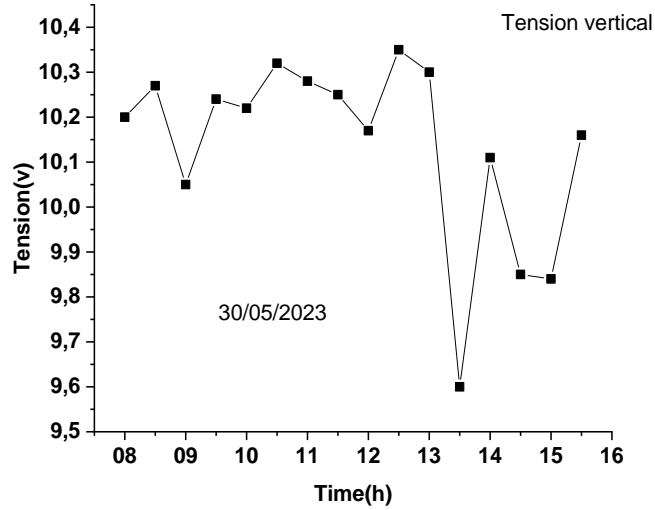


Figure III.16 Variations temporelle de la tension de panneau PV vertical Pendant la journée 30/05/2023

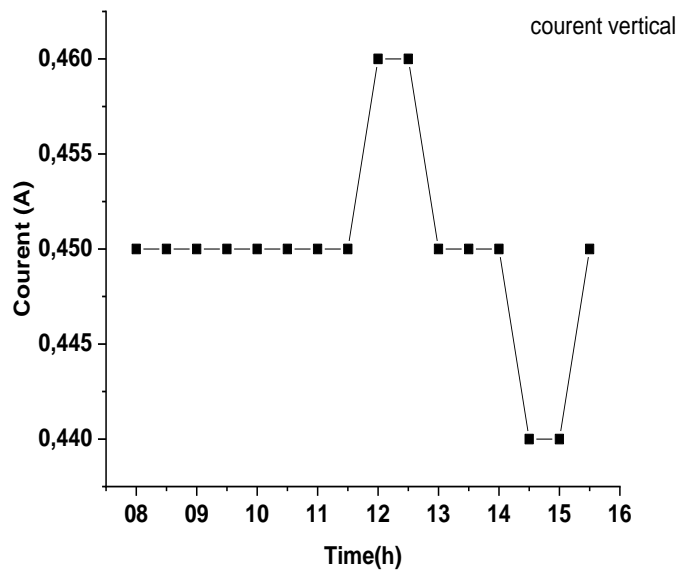


Figure III.17 Variations temporelle du courant de panneau PV vertical Pendant la journée 30/05/2023

Les figures 16 et 17 présentent les mesures de la tension et de courant prises tout au long de la journée 30/05/2023 pour un panneau solaire vertical. Les valeurs de la tension varient entre 9,6 et 10,3 V, tandis que les valeurs de courant varient entre 0,44 et 0,46 A.

- **Panneau horizontal**

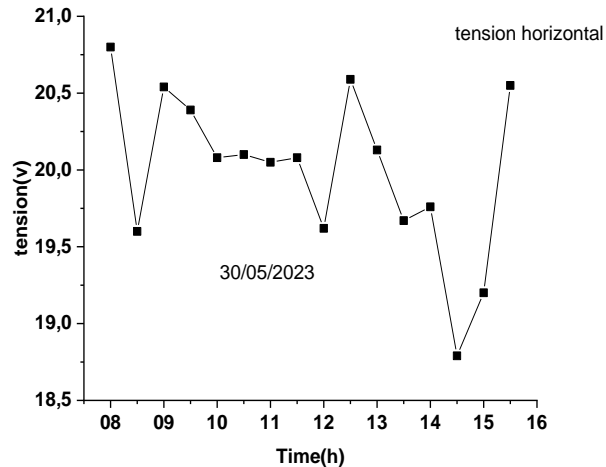


Figure III.18 Variations temporelle de la tension de panneau PV horizontal Pendant la journée 30/05/2023

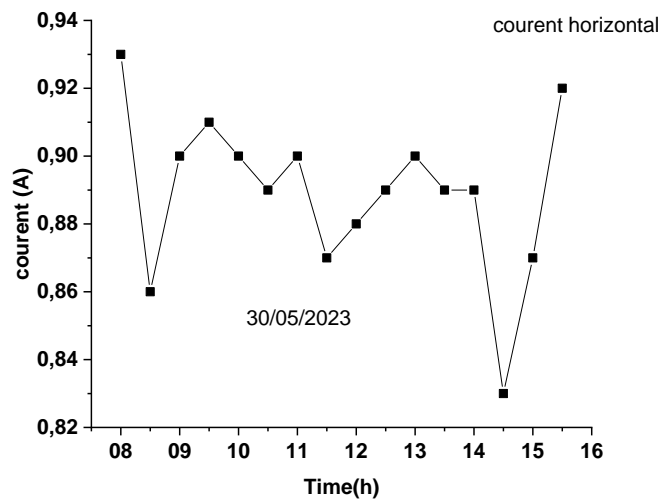


Figure III.19 Variations temporelle du courant de panneau PV horizontal Pendant la journée 30/05/2023

Les figures 18 et 19 illustrent les mesures de la tension et de courant pendant la journée de 30/05/2023 pour un panneau solaire horizontal. On observe une variation des valeurs de tension entre 18,7 et 20,8 V, tandis que les valeurs de courant fluctuent entre 0,83 et 0,93 A.

En comparons les deux d'orientation verticale et horizontale, nous constatons que l'orientation horizontale avec un angle d'inclinaison de 0° pendant la saison estivale donne les résultats les plus favorables. En effet, pendant l'été, lorsque le soleil atteint son point culminant et se rapproche de l'horizon, une orientation horizontale du panneau solaire permet une meilleure captation de rayonnement solaire. Cela conduit à une amélioration notable de la génération d'énergie par le panneau solaire.

5. Conclusion

Ce chapitre présente les résultats d'expériences sur l'intégration de panneaux solaires à différents angles d'inclinaison dans la région de M'sila, en Algérie. Les tests ont été effectués avec trois panneaux solaires orientés vers le sud à des angles de 36° , 90° et 0° . Les mesures météorologiques ont révélé les variations de l'éclairement solaire, de la vitesse du vent, de la température et de l'humidité. Les résultats ont montré que l'orientation horizontale offre les meilleures performances en été, tandis que l'orientation inclinée à 36° présente de bons résultats globaux. Il est essentiel de choisir l'orientation des panneaux en fonction des conditions locales pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire.

Conclusion générale

Conclusion générale

La demande mondiale d'énergie renouvelable et non polluante continue de croître, parallèlement à l'accent mis sur l'efficacité énergétique, le concept de bâtiments à énergie zéro et à zéro émission a attiré une attention considérable. L'une des sources d'énergie les plus importantes est le soleil. Exploiter la puissance du rayonnement solaire grâce à des systèmes photovoltaïques intégrés au bâtiment (BIPV) offre une solution prometteuse et polyvalente, englobant à la fois l'attrait esthétique et la viabilité économique. Dans ce contexte, une étude expérimentale sur l'effet de l'orientation des panneaux solaires photovoltaïques sur leurs caractéristiques électriques et thermiques a été menée dans ce travail, afin d'exploiter les résultats obtenus aux panneaux PVs intégrés aux bâtiments

Les travaux expérimentaux ont été réalisés au laboratoire de physique et chimie des matériaux de l'université Mohamed Boudiaf à M'sila, Algérie, en utilisant des panneaux PVs verticaux, horizontaux et inclinés. Les tests ont été effectués en prenant en compte les conditions environnementales et atmosphériques spécifiques de la région. Les résultats obtenus ont été comparés, analysés et mettant en évidence l'impact des paramètres météorologiques tels que : l'irradiation solaire, la température ambiante, la vitesse du vent et l'humidité relative sur les performances des panneaux solaires PVs. Ils ont été démontrés que l'orientation soigneusement choisie des panneaux solaires en fonction des conditions spécifiques de la région peut maximiser la captation de l'énergie solaire.

Les résultats obtenus ont également montré que la position des panneaux solaires photovoltaïques affecte directement son comportement électrique et thermique, car la position inclinée et horizontale ont les meilleures valeurs de courant et de tension, tandis que la position verticale a la valeur la plus faible de la température.

REFERENCES

- [1] A. Azami and H. Sevinç, “The energy performance of building integrated photovoltaics (BIPV) by determination of optimal building envelope,” *Build. Environ.*, 2021, doi: 10.1016/j.buildenv.2021.107856.
- [2] X. Feng, T. Ma, Y. Yamaguchi, J. Peng, Y. Dai, and D. Ji, “Potential of residential building integrated photovoltaic systems in different regions of China,” *Energy Sustain. Dev.*, vol. 72, pp. 19–32, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.esd.2022.11.006.
- [3] C. Peng, Y. Huang, and Z. Wu, “Building-integrated photovoltaics (BIPV) in architectural design in China,” *Energy Build.*, vol. 43, no. 12, pp. 3592–3598, Dec. 2011, doi: 10.1016/j.enbuild.2011.09.032.
- [4] F. Rosa, “Building-integrated photovoltaics (BIPV) in historical buildings: Opportunities and constraints,” *Energies*, 2020, doi: 10.3390/en13143628.
- [5] J.-P. Lévy and F. Belaïd, “The determinants of domestic energy consumption in France: Energy modes, habitat, households and life cycles,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 2104–2114, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.06.022.
- [6] J. Padilla, C. Toledo, and J. Abad, “Enovoltaics: Symbiotic integration of photovoltaics in vineyards,” *Front. Energy Res.*, vol. 10, Sep. 2022, doi: 10.3389/fenrg.2022.1007383.
- [7] T. Markvart and L. Castañer, *Practical Handbook of Photovoltaics*. Elsevier, 2003.
- [8] T. E. Kuhn, C. Erban, M. Heinrich, J. Eisenlohr, F. Ensslen, and D. H. Neuhaus, “Review of technological design options for building integrated photovoltaics (BIPV),” *Energy Build.*, vol. 231, p. 110381, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.enbuild.2020.110381.
- [9] N. Martín-Chivelet *et al.*, “Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) products and systems: A review of energy-related behavior,” *Energy Build.*, 2022, doi: 10.1016/j.enbuild.2022.111998.
- [10] T. Zhang, M. Wang, and H. Yang, “A Review of the Energy Performance and Life-Cycle Assessment of Building-Integrated Photovoltaic (BIPV) Systems,” *Energies*, vol. 11, no. 11, p. 3157, Nov. 2018, doi: 10.3390/en11113157.
- [11] A. S. Abdelrazik, B. Shboul, M. Elwardany, R. N. Zohny, and A. Osama, “The recent advancements in the building integrated photovoltaic/thermal (BIPV/T) systems: An updated review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2022, doi:

10.1016/j.rser.2022.112988.

- [12] H. Gholami, H. N. Røstvik, and D. Müller-Eie, “Holistic economic analysis of building integrated photovoltaics (BIPV) system: Case studies evaluation,” *Energy Build.*, 2019, doi: 10.1016/j.enbuild.2019.109461.
- [13] A. Loukriz, D. Saigaa, A. Kherbachi, M. Koriker, A. Bendib, and M. Drif, “Prediction of Photovoltaic Panels Output Performance Using Artificial Neural Network,” *Int. J. Energy Optim. Eng.*, 2022, doi: 10.4018/ijeoe.309417.
- [14] J. Marchwiński, “Research on BIPV in Office and Public Utility Buildings in Aesthetic and Utility Context,” *Sustain.*, 2023, doi: 10.3390/su15010136.
- [15] B. Petter Jelle, C. Breivik, and H. Drolsum Røkenes, “Building integrated photovoltaic products: A state-of-the-art review and future research opportunities,” *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 100, pp. 69–96, May 2012, doi: 10.1016/j.solmat.2011.12.016.
- [16] B. Norton *et al.*, “Enhancing the performance of building integrated photovoltaics,” *Sol. Energy*, vol. 85, no. 8, pp. 1629–1664, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.solener.2009.10.004.
- [17] A. G. Hestnes, “Building Integration Of Solar Energy Systems,” *Sol. Energy*, 1999, doi: 10.1016/s0038-092x(00)00065-7.
- [18] K. Farkas, I. Andersen, and A. G. Hestnes, “Architectural integration of photovoltaic cells. Overview of materials and products from an architectural point of view,” 2009.
- [19] B. Jelle, “Building Integrated Photovoltaics: A Concise Description of the Current State of the Art and Possible Research Pathways,” *Energies*, vol. 9, no. 1, p. 21, Dec. 2015, doi: 10.3390/en9010021.
- [20] P. Zhang *et al.*, “IEEE Draft Standard for Spectrum Characterization and Occupancy Sensing,” 2019.
- [21] T. Salameh, M. E. H. Assad, M. Tawalbeh, C. Ghenai, A. Merabet, and H. F. Öztop, “Analysis of cooling load on commercial building in UAE climate using building integrated photovoltaic façade system,” *Sol. Energy*, vol. 199, pp. 617–629, Mar. 2020, doi: 10.1016/j.solener.2020.02.062.
- [22] R. Dumoulin, E. D. Rounis, and A. Athienitis, “Operation and grid interaction modeling of a house with a building integrated photovoltaic thermal (BIPV/T) system coupled to an air-source heat pump,” *Sci. Technol. Built Environ.*, 2021, doi:

10.1080/23744731.2021.1941247.

- [23] L. H. Nguyen, “Béton de structure à propriétés d ’ isolation thermique améliorées : approche expérimentale et modélisation numérique,” *Thèse*, 2014.
- [24] J. Romani, A. Ramos, and J. Salom, “Review of Transparent and Semi-Transparent Building-Integrated Photovoltaics for Fenestration Application Modeling in Building Simulations,” *Energies*, vol. 15, no. 9, p. 3286, Apr. 2022, doi: 10.3390/en15093286.
- [25] Y. Dai and Y. Bai, “Performance Improvement for Building Integrated Photovoltaics in Practice: A Review,” *Energies*, vol. 14, no. 1, p. 178, Dec. 2020, doi: 10.3390/en14010178.
- [26] J. LE ROUZO *et al.*, “Cellules solaires et photonique organique,” *Photoniques*, 2009.
- [27] K. Kety, K. A. Amou, K. Sagna, K. Tepe, Y. Lare, and K. Napo, “Modélisation et simulation d’un générateur photovoltaïque: Cas du module polycristallin Ecoline LX-260P installé au dispensaire de Sévagan (Togo),” 2016.
- [28] N. Martín-Chivelet, J. Polo, C. Sanz-Saiz, L. T. Núñez Benítez, M. Alonso-Abella, and J. Cuenca, “Assessment of PV Module Temperature Models for Building-Integrated Photovoltaics (BIPV),” *Sustainability*, vol. 14, no. 3, p. 1500, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14031500.

Résumé

Dans ce travail, l'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque à l'intérieur des bâtiments a été étudiée. Des expériences ont été réalisées à M'sila, Algérie, en utilisant des panneaux solaires orientés à différents angles d'inclinaison. Les résultats ont démontré l'importance de l'orientation des panneaux solaires en fonction des conditions météorologiques pour maximiser l'utilisation de l'énergie solaire. Cette recherche contribue à une meilleure compréhension des facteurs qui influencent l'efficacité des systèmes solaires PV intégrés aux bâtiments et ouvre la voie à des améliorations futures dans ce domaine.

Mots clés : photovoltaïque, énergie solaire, intégré au bâtiment, tension, courant

Abstract

In this work the integration of solar photovoltaic energy inside buildings was studied. Experiments were conducted in M'sila, Algeria, using solar panels oriented at different tilt angles. The results demonstrated the significance of panel orientation based on meteorological conditions to maximize solar energy utilization. This research contributes to a better understanding of factors influencing the efficiency of PV solar systems integrated into buildings and paves the way for future improvements in this field.

Key words: photovoltaic, solar energy, integrated into the building, voltage, current,

ملخص

في هذا العمل تمت دراسة تكامل الطاقة الشمسية الكهروضوئية داخل المباني. أجريت التجارب في المسيلة بالجزائر باستخدام الألواح الشمسية الموجهة بزوايا إمالة مختلفة. أظهرت النتائج أهمية توجيه اللوحة بناءً على ظروف الأرصاد الجوية لتحقيق أقصى قدر من استخدام الطاقة الشمسية. يساهم هذا البحث في فهم أفضل للعوامل التي تؤثر على كفاءة أنظمة الطاقة الشمسية الكهروضوئية المدمجة في المباني ويمهد الطريق للتحسينات المستقبلية في هذا المجال.

الكلمات المفتاحية : الكهروضوئية، الطاقة الشمسية، مدمج في المبنى، الجهد، التيار