

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية
Université de Ghardaïa

N° d'enregistrement



كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الآلية والكهروميكانيك
Département d'Automatique et Electromécanique
Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Master

Domaine : Énergie Renouvelable
Filière : Énergie Renouvelable
Spécialité : Électrotechnique

Thème

Typologies d'intégration des systèmes photovoltaïques autonomes
Dimensionnement optimal et étude de rentabilité

Présenté par :

MENAD Mohamed Salah Eddine & BENHENIA Ahmed Cherif

Soutenue publiquement en Juin 2025

Devant le jury composé de :

BOUKHARI Hamed	Maître de Conférences B	Université de Ghardaïa	Présidente
BELGHERRAS Sifia	Maître de Conférences A	Université de Ghardaïa	Encadrant
BEKKOUCHE Sidi Mohammed El Amine	Directeur de Recherche	URAER - Ghardaïa	Co-encadrant
BOUCHELGA Fatma	Maître de Conférences A	Université de Ghardaïa	Examineur
BARKAT Fadila	Maître de Conférences B	Université de Ghardaïa	Examineur

Année universitaire 2024 / 2025

Remerciements

Au terme de ce travail, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation et à son aboutissement.

Nos remerciements les plus sincères vont en premier lieu à **Dr BELGHERRAS Sifia**, Maître de Conférences "A" à l'université de Ghardaïa. Pour sa disponibilité, ses conseils éclairés et son encadrement rigoureux. Son accompagnement constant, sa bienveillance et son exigence scientifique ont été d'un grand apport tout au long de ce travail

Nous tenons également à remercier chaleureusement **Dr BEKKOUCHE Sidi Mohammed El Amine**, Directeur de Recherche à l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables (URAER – Ghardaïa), membre de l'équipe Architecture Solaire et Bioclimatique, pour son encadrement attentif, ses orientations précieuses et son soutien indéfectible. Son expertise et sa générosité intellectuelle ont grandement enrichi notre réflexion.

Nous tenons à exprimer mes sincères remerciements aux membres de jury Drs **BOUKHARI Hamed**, **BOUCHELGA Fatma** et **BARKAT Fadila** pour le temps et l'attention consacrés à l'évaluation de ce mémoire et pour leurs engagements et leur bienveillance. Nous espérons que nos travaux pourront contribuer à enrichir le domaine.

Nos remerciements s'adressent aussi à **l'Université de Ghardaïa** ainsi qu'à **l'URAER**, pour leur accueil chaleureux, la qualité de l'environnement de travail qu'ils offrent, et pour nous avoir permis de mener notre stage dans un cadre aussi stimulant que professionnel.

Nous exprimons également notre reconnaissance à l'ensemble de nos enseignants ainsi qu'aux responsables du Master en Énergies Renouvelables, spécialité Électrotechnique, pour la richesse de leur enseignement, la qualité de leur encadrement, et l'opportunité qui nous a été donnée de bénéficier de ce programme.

Enfin, nous adressons nos plus profonds remerciements à nos parents, nos familles et nos amis, pour leur soutien moral constant, leurs encouragements inestimables et leur présence bienveillante, qui ont été essentiels à la réussite de ce parcours.

À toutes ces personnes, nous dédions humblement le fruit de notre travail, en témoignage de notre reconnaissance et de notre respect.

Résumé

Les travaux visent à déterminer la configuration optimale d'un système photovoltaïque autonome en conciliant fiabilité de fonctionnement et rentabilité économique conformément aux différents types d'intégration. Une méthodologie simplifiée a été adoptée pour le dimensionnement du système, en tenant compte de l'orientation et de l'inclinaison des modules photovoltaïques afin de maximiser la captation du rayonnement solaire. Une attention particulière a été portée à la durée de vie des batteries, élément essentiel pour garantir l'autonomie et l'efficacité du système sur le long terme. Une optimisation de l'angle d'inclinaison et un dimensionnement précis des composants permettent d'améliorer significativement la performance énergétique tout en réduisant les coûts globaux. Les résultats montrent qu'un système avec des batteries de longue durée peut offrir un meilleur retour sur investissement, même si le coût initial est plus élevé. Si le délai de récupération d'un projet est plus court que celui d'autres opportunités d'investissement similaires, cela peut indiquer que le projet est plus attractif. En général, un système photovoltaïque autonome peut représenter une solution économiquement viable, notamment dans les régions où le coût de l'électricité conventionnelle est élevé ou dans les zones isolées non desservies par le réseau électrique. Il peut aussi devenir rentable en 5 à 10 ans, selon le coût d'installation, l'ensoleillement, le coût de l'électricité, les subventions et les incitations financières et la durée de vie du système par rapport à son coût.

Mots-clés : Système photovoltaïque autonome, Typologies d'intégration, Dimensionnement optimal, Inclinaison optimale, Rentabilité financière.

Abstract

The work aims to determine the optimal configuration of an autonomous photovoltaic system by balancing operational reliability and economic profitability according to the various types of integration. A simplified methodology was adopted for the sizing of the system, taking into account the orientation and tilt of the photovoltaic modules to maximize solar radiation capture. Particular attention has been paid to the lifespan of the batteries, a key element in ensuring the autonomy and efficiency of the system in the long term. Optimizing the tilt angle and precise sizing of the components significantly improve energy performance while reducing overall costs. The results show that a system with long-lasting batteries can provide a better return on investment, even if the initial cost is higher. If the payback period of a project is shorter than that of other similar investment opportunities, it may indicate that the project is more attractive. In general, an off-grid photovoltaic system can represent a financially viable solution, especially in areas where the cost of conventional electricity is high or in remote areas not served by the electrical grid. It can also become profitable in 5 to 10 years, depending on installation costs, sunlight exposure, electricity prices, subsidies and financial incentives, and the system's lifespan relative to its cost.

Keywords : Autonomous photovoltaic system, Integration typologies, Optimal sizing, Optimal tilt, Financial profitability.

ملخص

تهدف الأعمال إلى تحديد التكوين الأمثل لنظام الطاقة الشمسية المستقل من خلال التوفيق بين موثوقية التشغيل والجدوى الاقتصادية وفقًا لأنواع التكامل المعماري المختلفة. تم اعتماد منهجية مبسطة لتحديد أبعاد النظام، مع الأخذ في الاعتبار اتجاه وزاوية ميل الألواح الشمسية من أجل تحقيق أقصى استفادة من إشعاع الشمس. تمت مراعاة خاصة لعمر البطاريات، وهو عنصر أساسي لضمان الاستقلالية وكفاءة النظام على المدى الطويل. إن تحسين زاوية الميل والتصميم الدقيق للمكونات يساهمان في تحسين الأداء الطاقوي بشكل كبير مع تقليل التكاليف الإجمالية. تظهر النتائج أن نظامًا مزودًا ببطاريات طويلة الأمد يمكن أن يوفر عائدًا أفضل على الاستثمار، حتى لو كانت التكلفة الأولية أعلى. إذا كان زمن استرداد مشروع ما أقصر من زمن استرداد فرص استثمارية مشابهة، فقد يشير ذلك إلى أن المشروع أكثر جاذبية. بشكل عام، يمكن أن يمثل نظام الطاقة الشمسية المستقل حلاً اقتصاديًا قابلاً للتطبيق، خاصة في المناطق التي تكون فيها تكلفة الكهرباء التقليدية مرتفعة أو في المناطق النائية التي لا تخدمها شبكة الكهرباء. يمكن أن يصبح أيضًا مربحًا في غضون 5 إلى 10 سنوات، حسب تكلفة التركيب، ومدة سطوع الشمس، وتكلفة الكهرباء، والاعتمادات والحوافز المالية، وعمر النظام مقارنة بتكلفته.

الكلمات المفتاحية: نظام الطاقة الشمسية المستقل، أنواع التكامل المعماري، التصميم الأمثل، الميل الأمثل، الجدوى المالية.

Table des Matières

Table des matières.....	I
Nomenclature.....	IV
Table des figures.....	VI
Liste des tableaux.....	VIII
Introduction générale.....	1

Chapitre 1

Principes de base sur les systèmes photovoltaïques autonomes "Hors réseau"

1. Introduction.....	3
2. Différence entre un système photovoltaïque autonome et un système connecté au réseau	3
2.1. Système photovoltaïque autonome.....	4
2.2. Système photovoltaïque raccordé au réseau.....	4
3. Composants d'un système photovoltaïque autonome.....	5
3.1. Panneaux solaires ou modules photovoltaïques.....	5
3.2. Contrôleur de charge.....	6
3.3. Batteries solaires.....	8
3.3.1. Batteries au plomb-acide.....	9
3.3.2. Batteries lithium-ion.....	10
3.4. Onduleur.....	10
3.4.1. La conversion du courant.....	10
3.4.2. Suivi du point de puissance maximale MPPT.....	11
3.4.3. Contrôle de la qualité de l'énergie.....	11
3.4.4. Protection et sécurité.....	11
3.4.5. Communication et surveillance.....	11
3.5. Câblage et connecteurs.....	11
3.6. Raccordement et configuration du banc de batteries solaires.....	13
3.7. Raccordement et configuration des panneaux photovoltaïques.....	13
3.8. Système de montage et types d'intégration des systèmes photovoltaïques.....	14
3.8.1. Systèmes photovoltaïques de montage fixes.....	16

3.8.1.1. Montage sur le toit.....	16
3.8.1.2. Montage au sol.....	17
3.9. Systèmes de poursuite solaire.....	17
3.9.1. Systèmes de poursuite solaire à un seul axe.....	17
3.9.2. Systèmes de poursuite solaire à deux axes.....	18
4. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques autonomes.....	19
5. Conclusion.....	20

Chapitre 2

Grandeurs radiométriques solaires

1. Introduction.....	21
2. Méthodes de calcul du rayonnement solaire.....	21
3. Coordonnées solaires.....	22
3.1. Latitude de lieu.....	23
3.2. Longitude de lieu.....	23
3.3. Angle de déclinaison solaire.....	23
3.4. Angle horaire.....	24
3.5. Hauteur du soleil.....	24
3.6. Azimut du soleil.....	25
3.7. Azimut du plan.....	25
3.8. Angle d'incidence sur un plan.....	25
4. Modèle d'estimation du rayonnement solaire terrestre (modèle de Capderou).....	25
4.1. Calcul de l'éclairement solaire sur un plan horizontal.....	26
4.2. Calcul de l'éclairement solaire sur un plan quelconque.....	27
4.2.1. L'éclairement direct.....	27
4.2.2. L'éclairement diffus.....	27
4.2.2.1. La composante circumsolaire.....	27
4.2.2.2. La composante isotrope.....	28
4.2.2.3. La composante du cercle de l'horizon.....	28
5. L'inclinaison optimale.....	29
6. Régime climatique de Ghardaïa.....	29
7. Calcul de l'irradiation solaire.....	30

8. Conclusion.....	37
--------------------	----

Chapitre 3

Mise en œuvre des systèmes photovoltaïques autonomes en fonction des types d'intégration

1. Introduction.....	38
2. Méthode de dimensionnement.....	38
2.1. L'évaluation des besoins énergétiques.....	39
2.2. La tension du fonctionnement recommandée $U_{\text{système}}$	39
2.3. Le dimensionnement du banc de batteries.....	40
2.4. Le dimensionnement des panneaux solaires.....	41
2.5. Le choix du régulateur.....	42
2.6. Le choix de l'onduleur.....	42
3. Évaluation des coûts en fonction des types d'intégration.....	42
3.1. Montage d'une installation photovoltaïque de types cheminée ou brise soleil, en façade ou en allège	44
3.1.1. Pose du générateur photovoltaïque en façade, de type cheminée ou en allège, cas des orientations Sud, Est et Ouest	44
3.1.2. Pose du générateur photovoltaïque en façade, de type cheminée ou en allège, cas d'une orientation Nord	54
3.2. Pose du générateur photovoltaïque sur la toiture d'un bâtiment, une véranda ou au sol, cas de l'orientation Sud inclinée à latitude du lieu 32°	57
3.3. Pose du générateur photovoltaïque sur la toiture d'un bâtiment, une véranda ou au sol, cas de l'orientation Sud à inclinaison mensuelle optimale	60
3.4. Quantification des résultats.....	63
3.4.1. Comparaison des tarifs.....	63
3.4.2. Étude de rentabilité.....	66
3.4.2.1. Cas d'une inclinaison à latitude du lieu 32°	69
3.4.2.2. Cas d'une inclinaison mensuelle optimale.....	73
3.4.2.3. Comparaison entre les deux types d'intégration.....	75
4. Conclusion.....	77

Conclusion générale

Conclusion générale.....	79
Références.....	81

Nomenclature

$C_{\text{Stockage_batterie}}$: capacité du stockage d'une seule batterie (Ah)

$U_{b_{nm}}$: tension nominale de la batterie (V)

I_r : coefficient d'irradiation solaire (kWh/m^2) qui fait référence à la quantité d'énergie solaire reçue par unité de surface sur une période donnée.

E_{Produite} : énergie produite (Wh) par le système photovoltaïque. Elle est équivalente à la somme de la charge électrique (l'énergie consommée) et 30% de cette énergie.

$U_{m_{nm}}$: tension nominale du module photovoltaïque (V)

I_{cc} : La valeur maximale du courant produite par les modules photovoltaïques, elle doit être connue pour déterminer la capacité du régulateur de charge (A)

V_{oc} : La valeur maximale de la tension, elle doit être connue pour déterminer la capacité du régulateur de charge (V)

N représente le numéro du jour de l'année à compter du premier janvier

d : l'angle de déclinaison ($^\circ$)

H : l'angle horaire ($^\circ$)

TSV : le temps solaire vrai (h)

DE : le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich (égale 1 h pour l'Algérie)

TL : temps légal, celui donné par une montre

Et : correction de l'équation du temps

h : hauteur du soleil ($^\circ$)

a : azimut du soleil ($^\circ$)

A_p : l'azimut du plan

T_L^* : le facteur de trouble atmosphérique de Linke par ciel clair

T_0 : le facteur de turbidité due à l'absorption gazeuse par la vapeur d'eau

z : l'altitude de lieu (km)

T_1 : le facteur de trouble correspondant à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O_2 , CO_2 , et O_3) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh

T_2 : le facteur de trouble dû à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption.

Table des figures

- Figure 1.1 :** Schéma descriptif et composition d'un panneau solaire [5].
- Figure 1.2 :** Schéma descriptif d'une cellule photovoltaïque [4].
- Figure 1.3 :** Contrôleurs de charge PWM [8].
- Figure 1.4 :** Contrôleurs de charge MPPT [11].
- Figure 1.5 :** Quelques modèles de batteries solaires au lithium-ion, a : 12V 100Ah, b : 12V 40Ah, c : 12V 200Ah [15].
- Figure 1.6 :** Modèles d'onduleurs [18,19].
- Figure 1.7 :** Câblage et connecteurs pour le raccordement des batteries solaires et des panneaux photovoltaïques [20].
- Figure 1.8 :** Branchement en série et / ou en parallèle.
- Figure 1.9 :** Différents types de montage des panneaux photovoltaïques
- Figure 1.10 :** Schéma descriptif des typologies d'intégration des systèmes photovoltaïques [21].
- Figure 1.11 :** Distances requises entre les rangées de capteurs solaires [21].
- Figure 1.12 :** Système de montage en toiture.
- Figure 1.13 :** Système de montage au sol.
- Figure 1.14 :** Modèle d'un système de poursuite solaire à un seul axe.
- Figure 1.15 :** Modèle d'un système de poursuite solaire à double axes.
- Figure 2.1 :** Schémas indiquant les principaux repères de la position du soleil [44].
- Figure 2.2 :** Altitude et localisation de la Wilaya de Ghardaïa [49].
- Figure 2.3 :** Courbes des éclairissements solaires (global, diffus et directe), cas de la journée du 5 janvier.
- Figure 2.4 :** Courbes des éclairissements solaires (global, diffus et directe), cas de la journée du 19 avril.
- Figure 2.5 :** Courbes des éclairissements solaires (global, diffus et directe), cas de la journée du 25 Août.
- Figure 3.1 :** Constitution d'un système photovoltaïque autonome [46].
- Figure 3.2 :** Pose d'un générateur photovoltaïque en façade [52,53].

- Figure 3.3 :** Coût total de l'installation photovoltaïque en fonction de la charge d'alimentation électrique en considérant les différents types d'intégration.
- Figure 3.4 :** Coût total de l'installation photovoltaïque en fonction de la charge d'alimentation électrique en considérant les différents types d'intégration.
- Figure 3.5:** Économie financière due à l'intégration d'un générateur photovoltaïque installé sur une structure orientée au Sud à inclinaison optimale par rapport à un générateur photovoltaïque incliné à latitude du lieu 32° .
- Figure 3.6 :** Économie financière due à l'intégration des générateurs photovoltaïques orientés vers le Sud et inclinés à latitude du lieu 32° et des panneaux installés sur une structure orientée au Sud à inclinaison optimale par rapport à un générateur installé sur une façade Sud.
- Figure 3.7 :** La part du coût des batteries par rapport au système photovoltaïque autonome, cas d'une inclinaison à latitude du lieu 32° .
- Figure 3.8 :** Coût additionné du système photovoltaïque et de sa facture électrique relative comparé à la facture énergétique avant l'investissement qui s'élève à 16.5 dinars par kilowattheure, cas d'une inclinaison à latitude du lieu 32° .
- Figure 3.9 :** Coût additionné du système photovoltaïque et de sa facture électrique relative comparé à la facture énergétique avant l'investissement qui s'élève à 80 dinars par kilowattheure, cas d'une inclinaison à latitude du lieu 32° .
- Figure 3.10 :** Différence entre les valeurs des coûts, cas des factures d'électricité qui s'élèvent à 80 dinars par kilowattheure, cas d'une inclinaison à latitude du lieu 32° .
- Figure 3.11 :** La part du coût des batteries par rapport au système photovoltaïque autonome, cas d'une inclinaison mensuelle optimale.
- Figure 3.12 :** Coût additionné du système photovoltaïque et de sa facture électrique relative comparé à la facture énergétique avant l'investissement qui s'élève à 16.5 dinars par kilowattheure, cas d'une inclinaison mensuelle optimale.
- Figure 3.13 :** Coût additionné du système photovoltaïque et de sa facture électrique relative comparé à la facture énergétique avant l'investissement qui s'élève à 80 dinars par kilowattheure, cas d'une inclinaison mensuelle optimale.
- Figure 3.14 :** Différence entre les valeurs des coûts, cas des factures d'électricité qui s'élèvent à 80 dinars par kilowattheure, cas d'une inclinaison mensuelle optimale.

Liste des tableaux

Tableau 1.1 :	Type de batteries solaires au plomb-acide
Tableau 1.2 :	Avantages et inconvénients d'un système photovoltaïque autonome
Tableau 2.1 :	L'azimut du plan suivant les différentes orientations
Tableau 2.2 :	Estimation des irradiances solaires journalières " $I_{r \text{ Sol Jour}}$ " en fonction des typologies d'intégration architecturale
Tableau 3.1 :	Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 0.5 kWh
Tableau 3.2 :	Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 1 kWh
Tableau 3.3 :	Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 1.5 kWh
Tableau 3.4 :	Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 2 kWh
Tableau 3.5 :	Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 3 kWh
Tableau 3.6 :	Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 3.5 kWh
Tableau 3.7 :	Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 4 kWh
Tableau 3.8 :	Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 5 kWh
Tableau 3.9 :	Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 6 kWh
Tableau 3.10 :	Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 0.25 kWh
Tableau 3.11 :	: Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 0.5 kWh
Tableau 3.12 :	Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 3 kWh
Tableau 3.13 :	Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 6 kWh
Tableau 3.14 :	Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge

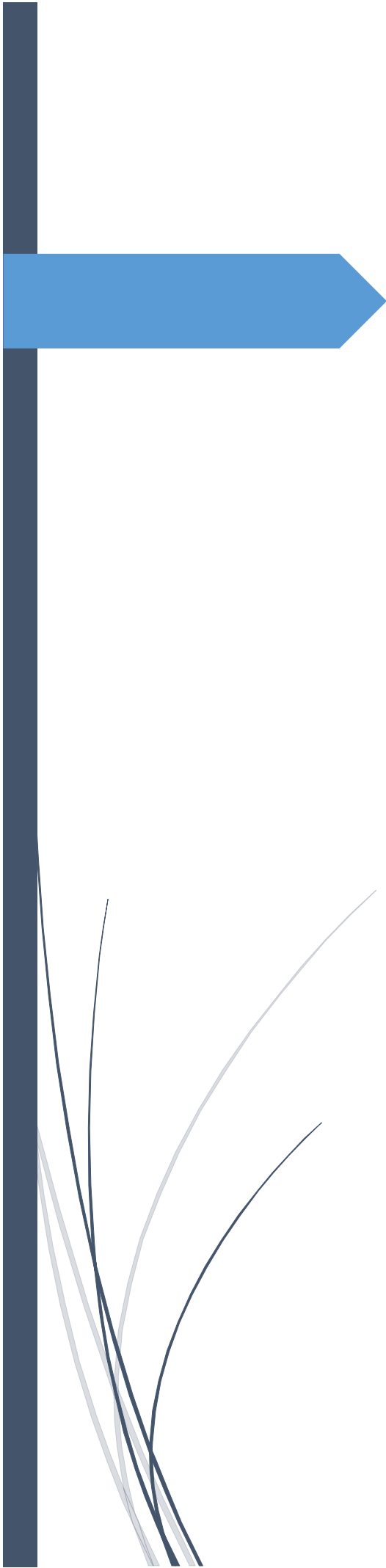
électrique quotidienne de 3 kWh

Tableau 3.15 : Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 6 kWh

Tableau 3.16 : Irradiations solaires mesurées (réelles) incidentes sur un capteur incliné à latitude du lieu (32°) et à inclinaison optimale mensuelle orienté au Sud et calcul des énergies photovoltaïques produites

Tableau 3.17 : Influence du coût du système PV sur le délai de récupération (initial et définitif) et la rentabilité financière du système photovoltaïque d'une capacité de 3 kWh, le cas où le kilowattheure électrique du réseau est évalué à 80 dinars

Tableau 3.18 : Influence du coût du système PV renforcé sur le délai de récupération (initial et définitif) et la rentabilité financière du système photovoltaïque d'une capacité de 3 kWh, le cas où le kilowattheure électrique du réseau est évalué à 80 dinars



Introduction générale

Introduction générale

Dans le cadre de l'orientation mondiale vers les énergies renouvelables, le système photovoltaïque autonome peut se distinguer comme une solution efficace pour répondre aux besoins énergétiques, en particulier dans les zones éloignées et non raccordées aux réseaux électriques. Ils sont utiles aussi pour des applications spécifiques : pour l'habitat et les applications rurales, les infrastructures et les grands immeubles, le transport et les applications industrielles. L'intégration de ces systèmes varie donc en fonction des besoins spécifiques, des ressources disponibles et des contraintes locales. Chaque typologie présente des avantages et des défis, mais toutes contribuent à la transition vers des sources d'énergie renouvelables et à la réduction de l'empreinte carbone.

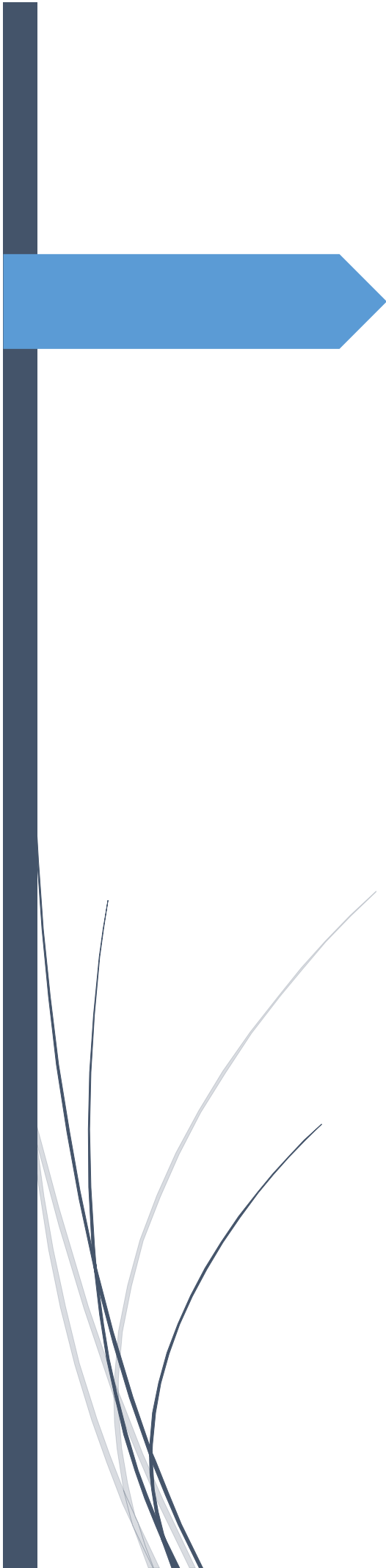
L'objectif principal de ce mémoire est d'étudier un ensemble de typologies d'intégration des systèmes photovoltaïques autonomes. Nous visons principalement la compréhension approfondie des différentes approches possibles, leurs avantages et inconvénients, en déduisant des conditions nécessaires pour leur succès dans divers contextes. L'accent est mis sur le dimensionnement optimal qui est une étape cruciale pour assurer leur efficacité et leur durabilité. Pour ce faire, plusieurs étapes et considérations ont été prise en compte lors de ce processus. L'étude de rentabilité des systèmes photovoltaïques autonomes implique plusieurs étapes et considérations et a pris une importance capitale. Elle a nécessité une approche systématique qui prend en compte les coûts, les revenus et la production d'énergie. Cela permet de déterminer si un tel investissement est viable et rentable sur le long terme.

La méthode de dimensionnement a été basée sur des équations analytiques exprimées sous forme des formules explicites et des fonctions mathématiques bien connues qui donnent lieu à des solutions analytiques à notre problème mathématique. Contrairement à la méthode de dimensionnement, le calcul de l'énergie photovoltaïque produite, exprimée par des irradiances solaires journalières, a été obtenu par des méthodes approximatives et des calculs informatiques, mais qui décrivent efficacement le comportement du système étudié. Les travaux ont été menés en utilisant le logiciel MATLAB qui est un environnement de programmation, un langage de calcul numérique et un outil puissant et polyvalent largement utilisé dans divers domaines.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté les principes fondamentaux du système photovoltaïque autonome en abordant les principaux composants et les méthodes de connexion des batteries et des panneaux solaires. Une partie a été focalisée aussi sur les différents types d'installations tels que les systèmes fixes, les systèmes de poursuite solaire à un ou à double axe et les modes d'intégration architecturale (façades, toitures, balcons et brise-soleil).

Toutefois, il est connu que la production d'électricité par un système photovoltaïque est pleinement influencée par plusieurs facteurs liés au rayonnement solaire. C'est pourquoi, le second chapitre est consacré à l'estimation des irradiances solaires journalières qui expriment l'énergie produite par le générateur photovoltaïque. Les typologies d'intégration architecturale ont été prises en considération.

Le troisième chapitre concerne le choix du meilleur type d'intégration qui dépend de divers facteurs : le site et l'emplacement de l'installation, les contraintes architecturales et les objectifs énergétiques, l'analyse des tarifications et la rentabilité financière. L'étude a été basée sur des analyses approfondies pour être en mesure de prendre une décision éclairée qui répondra aux attentes en matière d'énergie solaire.



Chapitre 1 : Principes de base sur les systèmes photovoltaïques autonomes "Hors réseau"

Chapitre 1

1. Introduction

À l'échelle mondiale, l'essor industriel et l'amélioration du niveau de vie s'accompagnent d'un épuisement progressif des ressources énergétiques conventionnelles. Face à cette situation, il devient impératif de se tourner vers des sources d'énergie alternatives afin de pallier la diminution des combustibles fossiles, d'autant plus que la demande énergétique ne cesse d'augmenter. Le secteur du bâtiment, en particulier le résidentiel, figure parmi les plus grands consommateurs d'énergie, une tendance observée aussi bien à l'échelle internationale qu'en Algérie. L'essor des équipements domestiques et des dispositifs destinés au confort contribue à cette hausse constante des besoins énergétiques. En conséquence, la consommation électrique du secteur résidentiel devrait connaître une augmentation notable entre 2018 et 2050, selon les projections disponibles. Parallèlement, les besoins énergétiques liés aux activités industrielles viennent accentuer cette demande croissante [1].

Face à ces enjeux, les progrès technologiques, les actions de sensibilisation et les mesures incitatives mises en place par les gouvernements ont encouragé de nombreux pays à adopter des stratégies visant une exploitation optimisée de l'énergie solaire, notamment par sa transformation photovoltaïque en électricité. À ce jour, cette approche demeure une solution porteuse d'avenir. Dans ce cadre, le rôle essentiel d'un concepteur de systèmes autonomes est d'assurer une installation efficace et économiquement viable. Pour y parvenir, il est indispensable d'opter pour une conception optimisée, une sélection rigoureuse des équipements, une définition précise des spécifications techniques et l'application des meilleures pratiques en ingénierie et en installation. De plus, la mise en place d'un programme de maintenance préventive structuré et adapté est essentielle pour garantir la pérennité du système [2].

À travers le monde, les systèmes solaires autonomes figurent parmi les solutions énergétiques les plus répandues. Qu'il s'agisse d'alimenter une simple source lumineuse dans un abri, de faire fonctionner une calculatrice ou encore de fournir de l'électricité à une habitation entière. Leur principe de fonctionnement reste identique : l'énergie solaire est captée, stockée dans une batterie, puis exploitée selon les besoins. Ce type de système peut être utilisé par tous, même pour des applications basiques comme l'éclairage extérieur. Pour ceux qui souhaitent entreprendre des projets plus conséquents, il est souvent recommandé de débiter avec un petit dispositif solaire autonome avant d'évoluer vers des installations plus sophistiquées [3].

2. Différence entre un système photovoltaïque autonome et un système connecté au réseau

Un système photovoltaïque autonome et un système photovoltaïque raccordé au réseau ont des objectifs différents et des caractéristiques distinctes. La principale différence réside dans leur

connexion au réseau électrique et dans leurs capacités de stockage de l'énergie. Les systèmes autonomes sont autosuffisants et conçus pour une utilisation hors réseau, tandis que les systèmes connectés au réseau dépendent de ce dernier pour l'approvisionnement en énergie et peuvent y exporter l'énergie excédentaire.

2.1. Système photovoltaïque autonome

Leur indépendance par rapport au réseau : les systèmes autonomes fonctionnent indépendamment du réseau électrique. Ils produisent et stockent de l'électricité pour l'utiliser dans des endroits éloignés où le réseau n'est pas disponible.

Stockage d'énergie : ces systèmes comprennent généralement des batteries qui stockent l'énergie excédentaire produite pendant les périodes ensoleillées pour l'utiliser pendant la nuit ou pendant les jours nuageux.

Composants : un système autonome se compose généralement de panneaux solaires, d'un régulateur de charge, de batteries et d'un onduleur si l'alimentation est en courant alternatif.

Leur application : il est couramment utilisé dans les zones isolées pour les maisons hors réseau, les équipements de télécommunications et les projets d'électrification rurale.

Leur fonctionnement : les systèmes solaires autonomes et les systèmes de secours reliés au réseau fonctionnent généralement à des tensions faibles, telles que 12 V, 24 V ou 48 V. Cela est dû au fait que la majorité des batteries et des panneaux solaires sont conçus pour des tensions faibles, ce qui rend la construction de systèmes autonomes à faible tension plus simple, flexible et sûre.

Le coût : en général, les systèmes autonomes peuvent être plus coûteux en raison de la nécessité de disposer de batteries et de composants supplémentaires pour le stockage de l'énergie.

Leur maintenance : elle peut s'avérer plus difficile en raison de l'éloignement des lieux des différentes installations.

2.2. Système photovoltaïque raccordé au réseau

Connexion au réseau : les systèmes connectés au réseau sont reliés au réseau électrique et peuvent réinjecter l'électricité excédentaire dans le réseau.

Aucun stockage d'énergie requis : ces systèmes ne nécessitent généralement pas de batteries, car ils peuvent prélever de l'énergie sur le réseau lorsque la production solaire est insuffisante et renvoyer l'excédent d'énergie sur le réseau lorsque la production est supérieure à la consommation.

Composants : un système connecté au réseau se compose de panneaux solaires, d'un onduleur pour convertir le courant continu en courant alternatif et souvent d'un compteur pour mesurer le flux d'énergie en provenance et à destination du réseau.

Applications : il est fréquemment utilisé dans les environnements résidentiels, commerciaux et industriels où l'accès au réseau est disponible.

Leur fonctionnement : ils sont généralement de plus grande envergure et produisent souvent plusieurs kilowatts d'électricité. Ces systèmes étant conçus pour fonctionner à des tensions élevées, les panneaux solaires sont souvent connectés en série afin de créer un circuit à haute tension, qui est ensuite converti en courant alternatif via un onduleur adapté pour la connexion au réseau. Dans les systèmes connectés au réseau, il est fréquent de connecter plusieurs panneaux solaires pour atteindre des tensions de plusieurs centaines de volts avant de les acheminer vers l'onduleur.

Coût : en général, les systèmes connectés au réseau sont moins coûteux à installer que les systèmes autonomes car ils ne nécessitent pas de batterie de stockage.

Leur maintenance : l'entretien est généralement plus simple, car ces systèmes sont souvent installés dans des zones urbaines où l'accès au service est plus facile.

3. Composants d'un système photovoltaïque autonome

Un système photovoltaïque autonome, également appelé système solaire hors réseau, est conçu pour produire et stocker de l'électricité indépendamment du réseau électrique. Les principaux composants sont les suivants :

3.1. Panneaux solaires ou modules photovoltaïques

Ce sont les principaux composants qui convertissent la lumière du soleil en électricité. Sa structure est décrite par la **figure 1.1**. Ils sont constitués de nombreuses cellules solaires, généralement en silicium, qui génèrent un courant continu lorsqu'elles sont exposées à la lumière du soleil. Un grand nombre de panneaux sont conçus pour fournir une tension allant de 14 à 16 volts lorsqu'ils sont sous une charge, ce qui est idéal pour recharger une batterie de 12 volts. À noter qu'en absence d'une charge, un voltmètre relié à un panneau solaire peut afficher une tension pouvant atteindre 22 volts, ce qui est normal dans un circuit ouvert. Une fois que le panneau est intégré à un circuit, la tension se stabilise autour de 14-16 volts. Il est également possible de connecter plusieurs panneaux solaires en série afin d'augmenter la puissance produite (en watts) ou d'utiliser plusieurs panneaux pour fonctionner à une tension plus élevée [3].

L'effet voltaïque a été découvert en 1839 par Edmond Becquerel [4]. Il a montré que la conversion photovoltaïque consiste en la transformation directe de la lumière en énergie électrique

via des cellules photovoltaïques. Ces cellules sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs, souvent en silicium (**Figure 1.2**). La structure est composée en quatre couches : une grille conductrice, une couche de silicium dopée n, une couche dopée p et une grille.



Figure 1.1 : Schéma descriptif et composition d'un panneau solaire [5]

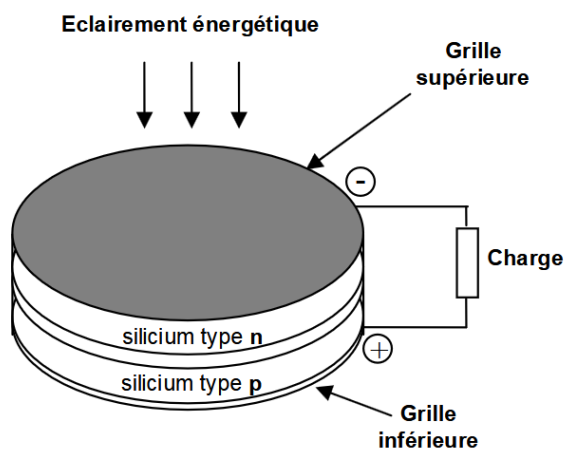


Figure 1.2 : Schéma descriptif d'une cellule photovoltaïque [4]

3.2. Contrôleur de charge

C'est un dispositif qui régule la tension et le courant provenant des panneaux solaires vers les batteries. Il empêche la surcharge et la décharge profonde des batteries, assurant ainsi leur longévité et leur efficacité. Le contrôleur de charge évite aussi les fluctuations de tension, qui pourraient nuire aux performances de la batterie, réduire sa durée de vie ou même entraîner une défaillance du système en raison d'une accumulation excessive de chaleur. Les contrôleurs de charge basés sur la technologie MPPT sont largement utilisés, car ils maximisent l'efficacité énergétique. Équipés de microprocesseurs, ces dispositifs surveillent et régulent la tension en continu, garantissant ainsi une sortie stable et une meilleure efficacité de transfert d'énergie [6].

Le régulateur doit maintenir l'état de charge des batteries entre deux seuils, un seuil élevé et un seuil bas, qu'il ne faut pas dépasser. Il existe différents types de régulateurs disponibles sur le marché, les plus couramment utilisés étant : les régulateurs série et les régulateurs shunt. Lorsque les batteries atteignent leur pleine charge, le régulateur shunt intercepte le courant provenant du champ solaire et l'envoie directement à la terre (ou à une borne négative) à travers une charge résistive. Le régulateur série, quant à lui, ouvre le circuit pour couper le courant qui provient du champ photovoltaïque. Un régulateur de charge, qu'il soit de conception simple ou complexe, reste toujours l'élément central d'une installation photovoltaïque et doit garantir sa fiabilité et sa performance.

Le contrôleur de charge PWM (Pulse Width Modulated & Modulation de Largeur d'Impulsion) est une méthode efficace pour maintenir une charge de batterie à une tension constante. Dans ce système, le courant fourni par le panneau solaire varie en fonction de l'état de la batterie et des besoins de recharge. Lorsque la tension de la batterie atteint le seuil de régulation, l'algorithme PWM réduit progressivement le courant de charge afin d'éviter le réchauffement et le dégazage de la batterie. Cependant, la charge continue à transférer la quantité maximale d'énergie à la batterie dans les meilleurs délais. La tension générée par le panneau photovoltaïque est ajustée par le contrôleur PWM pour correspondre à celle de la batterie.

Le contrôleur PWM fonctionne comme un interrupteur reliant le panneau solaire à la batterie. Lorsque l'interrupteur est fermé, la tension du panneau et celle de la batterie deviennent presque identiques. À une tension de travail de 12 volts, si la batterie est déchargée, la tension de charge initiale sera autour de 13 volts, en tenant compte d'une chute de tension de 0.5 volts dans les câbles et le contrôleur, ce qui amène la tension du panneau à environ 13.5 volts. La tension augmente lentement à mesure que la batterie se charge. Lorsque la tension d'absorption est atteinte, le contrôleur PWM commence à déconnecter et reconnecter le panneau afin de prévenir toute surcharge [7]. Pour une représentation visuelle, nous proposons deux cas de figure conformément à la **Figure 1.3** ci-dessous.



BlueSolar 12/24 - 5. 5A à 12V ou 24V



BlueSolar DUO 12/24 - 20 20 A à 12 V ou 24 V

Figure 1.3 : Contrôleurs de charge PWM [8]

Le suivi du point de la puissance maximale MPPT est une technique utilisée principalement dans les systèmes photovoltaïques (solaires) pour maximiser la puissance produite par les panneaux solaires. Le concept est basé sur le fait que la production d'énergie d'un panneau solaire varie en fonction de l'intensité de la lumière du soleil, de la température et des conditions de charge. Le système MPPT permet de s'assurer que les panneaux solaires fonctionnent à leur point de puissance optimal, qui est le point de la courbe courant-tension I-V où le produit du courant et de la tension (et donc de la puissance) est maximisé. Il peut améliorer l'énergie produite de 20 à 30 % ou plus par rapport aux systèmes sans MPPT. Bien que le MPPT soit le plus souvent associé aux systèmes d'énergie solaire, il peut également être appliqué à d'autres systèmes d'énergie renouvelable, tels que les turbines éoliennes, où la puissance de sortie peut être augmentée ou diminuée. Le MPPT est, en conséquence, une technologie cruciale dans les systèmes d'énergie solaire modernes, leur permettant de fonctionner efficacement dans des conditions variables. En utilisant des algorithmes et des contrôleurs avancés, le MPPT garantit que les panneaux solaires fournissent constamment la puissance maximale possible [9, 10]. La **Figure 1.4** propose deux modèles largement utilisés.



Figure 1.4 : Contrôleurs de charge MPPT [11]

3.3. Batteries solaires

Les batteries stockent l'électricité produite par les panneaux solaires pour l'utiliser lorsque la lumière du soleil n'est pas disponible, par exemple, la nuit, ou par temps nuageux. Les batteries constituent une source d'énergie électrique, chacune étant composée d'une ou plusieurs cellules électrochimiques. Elles possèdent des connexions externes permettant d'alimenter des circuits

électriques ou divers dispositifs. La borne positive est appelée anode, tandis que la borne négative est désignée sous le nom de cathode. Les paramètres des batteries photovoltaïques destinées aux systèmes solaires sont déterminés à l'aide d'équations spécifiques [12].

Les batteries se déclinent en plusieurs catégories selon leurs caractéristiques, leur fabricant et leur domaine d'application. Lorsqu'elles sont intégrées dans un système photovoltaïque, elles subissent continuellement des cycles de charge et de décharge. Parmi les types de batteries couramment utilisés dans ces applications, on retrouve :

3.3.1. Batteries au plomb-acide

Les batteries solaires au plomb-acide sont fréquemment utilisées dans les systèmes de stockage d'énergie solaire en raison de leur coût relativement bas et de leur fiabilité. Les principaux types de batteries au plomb-acide sont décrits selon le **Tableau 1.1** ci-dessous :

Tableau 1.1 : Type de batteries solaires au plomb-acide

Batteries plomb-acide ouvertes	Ces batteries sont les plus courantes et les moins chères. Elles nécessitent un entretien régulier, comme le remplissage d'eau.		Parc constitué de 12 batteries solaires ouvertes de 2V d'une capacité de 800 Ah, Tension 24 V [13]
Batteries plomb-acide AGM Absorbent Glass Material	Ces batteries sont scellées et ne nécessitent pas d'entretien. Elles sont plus sûres et ont une meilleure résistance aux vibrations.		Victron Energy - Batterie solaire 120Ah AGM 12V [14]
Batteries plomb-acide gel	Semblables aux AGM, elles contiennent un électrolyte sous forme de gel, ce qui les rend également sans entretien et plus sûres.		Batterie Solaire Gel 200AH/12V - Felicity solar

3.3.2. Batteries lithium-ion

Ces batteries sont de plus en plus populaires en raison de leur densité énergétique élevée, de leur durée de vie plus longue et de leur faible besoin d'entretien. Elles sont plus coûteuses que les batteries au plomb-acide, mais leur efficacité et leur durée de vie les rendent attrayantes pour de nombreux utilisateurs. La **Figure 1.5** représente quelques modèles existants dans la littérature.

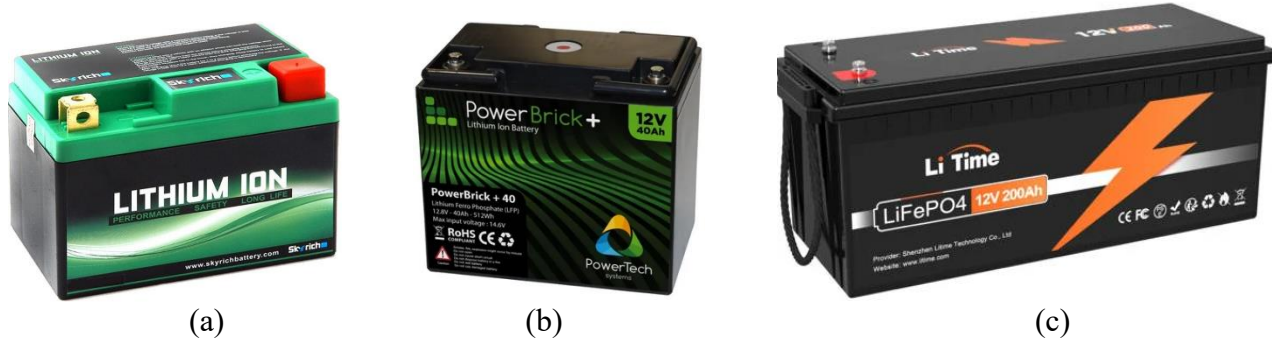


Figure 1.5 : Quelques modèles de batteries solaires au lithium-ion, a : 12V 100Ah, b : 12V 40Ah, c : 12V 200Ah [15]

3.4. Onduleur

Les onduleurs, souvent appelés entraînements AC ou variateurs de fréquence VFD, sont des dispositifs permettant de convertir le courant continu DC en courant alternatif AC. L'onduleur convertit le courant continu stocké dans les batteries en courant alternatif (CA), utilisé par la plupart des appareils ménagers. Certains systèmes peuvent utiliser directement une charge à courant continu, ce qui élimine la nécessité d'un onduleur. Ils sont utilisés pour contrôler la vitesse et le couple des moteurs électriques et sont généralement classés en kilovoltampères KVA ou voltampères VA. Les onduleurs sont souvent conçus avec une capacité environ 25 % supérieure à la charge calculée. Les sorties des onduleurs sont classées en trois types : onde sinusoïdale, onde sinusoïdale modifiée et onde carrée. En pratique, tant les compagnies d'électricité que les générateurs peuvent fournir une sortie en onde sinusoïdale [6].

Les circuits d'entrée et de sortie de l'onduleur doivent être protégés par des fusibles ou des disjoncteurs, lesquels doivent être accessibles et clairement identifiés. Il est également recommandé d'utiliser un dispositif de protection contre les surtensions sur l'entrée de l'onduleur afin de limiter les risques liés aux impacts de foudre à proximité. Les principes de fonctionnement d'un onduleur solaire [16, 17] sont comme suit :

3.4.1. La conversion du courant

Les panneaux solaires produisent de l'électricité sous forme de courant continu lorsqu'ils sont exposés à la lumière du soleil. L'onduleur le convertit en courant alternatif à une fréquence et une tension appropriées pour l'utilisation domestique.

3.4.2. Suivi du point de puissance maximale MPPT

Les onduleurs solaires sont équipés d'un système de suivi du point de puissance maximale "Maximum Power Point Tracking". Ce système optimise la production d'énergie en ajustant en temps réel la charge sur les panneaux solaires pour s'assurer qu'ils fonctionnent à leur efficacité maximale, en tenant compte des variations de lumière et de température.

3.4.3. Contrôle de la qualité de l'énergie

L'onduleur surveille également la qualité de l'énergie produite. Il s'assure que le courant alternatif généré respecte les normes de qualité requises, en régulant la tension et la fréquence.

3.4.4. Protection et sécurité

Les onduleurs sont équipés de dispositifs de protection pour éviter les surcharges, les courts-circuits et d'autres anomalies qui pourraient endommager le système ou présenter des risques de sécurité.

3.4.5. Communication et surveillance

De nombreux onduleurs modernes, comme ceux présentés dans la **Figure 1.6**, intègrent des fonctionnalités de communication qui permettent aux utilisateurs de surveiller la production d'énergie en temps réel via des applications ou des interfaces web. Cela permet une gestion efficace du système et une détection rapide des problèmes.



Figure 1.6 : Modèles d'onduleurs [18, 19]

3.5. Câblage et connecteurs

Les spécifications des câbles solaires varient selon les pays, en raison des différences de terrain et de climat. Toutefois, les câbles nécessaires pour l'installation se divisent généralement en trois catégories principales : les lignes aériennes, les câbles d'alimentation et de contrôle, et les accessoires généraux. Dans les systèmes photovoltaïques, les câbles jouent un rôle crucial puisqu'ils assurent la connexion entre les panneaux solaires et les autres composants du système. Ces câbles sont conformes aux normes britanniques et internationales. Par exemple, le câble standard EN50618, largement utilisé dans les installations solaires sur toiture et les parcs photovoltaïques, facilite l'interconnexion des différents éléments du système PV. Ce câble, conçu pour un usage extérieur, est fabriqué pour résister

aux conditions environnementales variées et aux effets de la dégradation causée par les rayons ultraviolets. De plus, des conducteurs en cuivre nu sont utilisés pour la mise à la terre des composants essentiels du système PV.

Les conducteurs dans les systèmes photovoltaïques peuvent être en aluminium ou en cuivre, deux matériaux ayant de bonnes propriétés de conductivité électrique. Selon les besoins de l'installation, ces conducteurs peuvent être rigides, avec un fil solide et non-flexible, ou toronnés, où plusieurs fils fins sont torsadés ensemble. Les câbles toronnés sont de plus en plus privilégiés, surtout dans les grandes installations, en raison de leur meilleure conductivité et de la surface de contact plus importante par rapport aux câbles rigides. Cela permet de réduire les pertes d'énergie et d'assurer une meilleure performance du système solaire sur le long terme [3, 6].



Figure 1.7 : Câblage et connecteurs pour le raccordement des batteries solaires et des panneaux photovoltaïques [20]

3.6. Raccordement et configuration du banc de batteries solaires

La configuration d'un banc de batteries solaires dépend des besoins énergétiques et de la capacité de stockage souhaitée par l'utilisateur, la fiche technique de la batterie et le système de panneaux solaires. Il est à noter que les besoins énergétiques sont en fonction de la consommation quotidienne du ménage (en kilowattheures kWh) et de l'autonomie souhaitée exprimée en jours. La fiche technique de la batterie indique le type de la batterie, sa capacité de stockage, exprimée en ampères-heures (Ah), et sa durée de vie.

Le montage en série permet d'augmenter la tension, par exemple, deux batteries de 12V en série donneront 24V. Il consiste à relier le pôle (+) d'une batterie au pôle (-) d'une autre. Le montage en parallèle sert pour augmenter la capacité (par exemple, deux batteries de 100Ah en parallèle donneront 200Ah à la même tension). Elles sont connectées aux mêmes bornes positives et négatives. Si le branchement est mixte, ça sera une combinaison des deux méthodes (série et parallèle). C'est une méthode qui permet d'augmenter à la fois la tension et la capacité selon les besoins du système. En termes de compatibilité, il est important que les batteries utilisées soient de même type, de même capacité et de même état de charge pour éviter des déséquilibres qui pourraient réduire leur durée de vie. La **Figure 1.8** donne un exemple illustratif.

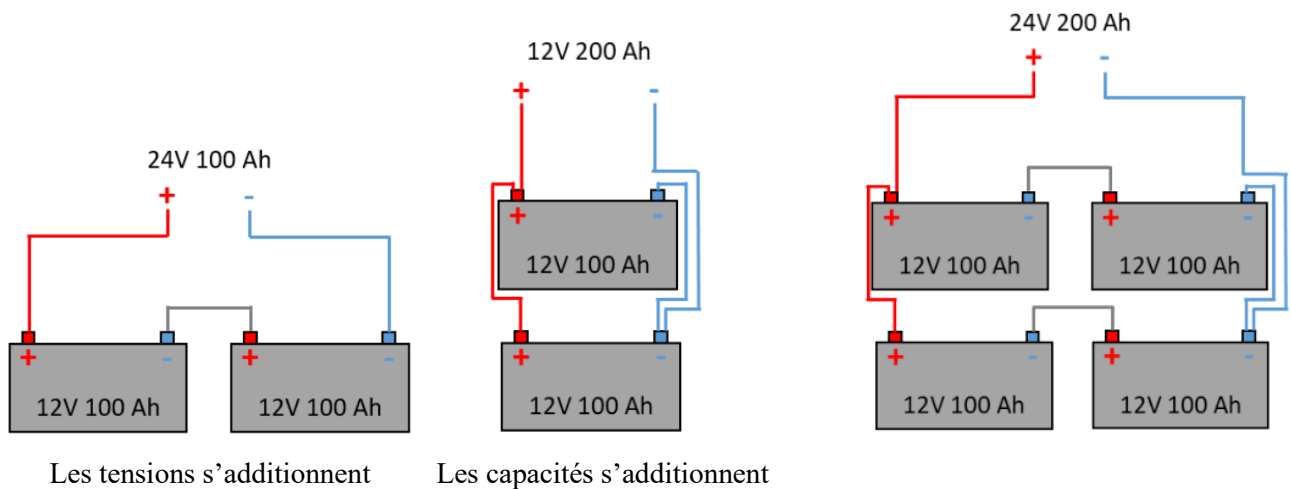


Figure 1.8 : Branchement en série et / ou en parallèle

3.7. Raccordement et configuration des panneaux photovoltaïques

Le choix et le type de raccordement dépendent de la configuration de l'onduleur et des caractéristiques du système.

Le montage en série est une méthode courante. Les panneaux photovoltaïques sont connectés les uns aux autres de manière à ce que le courant traverse chaque panneau successivement. Cela augmente la tension totale tout en maintenant le même courant, c'est-à-dire, le courant reste identique

à celui d'un seul panneau. Leurs connexions consistent à relier le terminal positif (+) d'un panneau au terminal négatif (-) du panneau suivant comme il est montré dans la **Figure 1.9**.

Dans le montage parallèle, la **Figure 1.9** indique que toutes les bornes positives (+) des panneaux solaires sont reliées entre elles, et de même pour toutes les bornes négatives (-). Son avantage est de pouvoir rester en basse tension. Alors que la tension résultante est égale à la tension d'un seul panneau. Le courant total est quant à lui égal à la somme des courants fournis par chacun des panneaux.

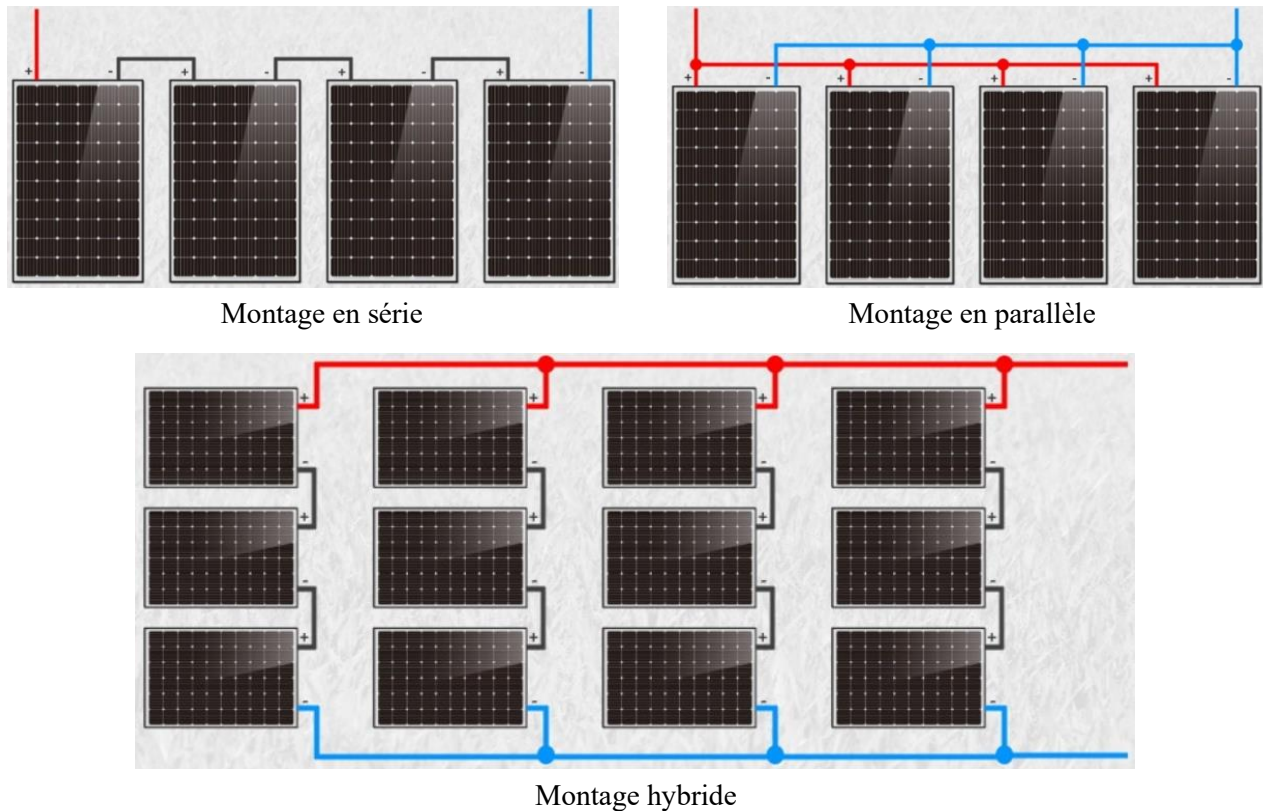


Figure 1.9 : Différents types de montage des panneaux photovoltaïques

D'autant plus, il est recommandé d'utiliser des panneaux de même type et de même puissance pour éviter des déséquilibres dans le système. Il est important aussi de minimiser les ombres sur les panneaux pour assurer une meilleure efficacité, éviter l'effet de "hot spot" qui provoquera les points chauds qui vont certainement endommager ainsi le panneau et réduire sa durée de vie.

3.8. Système de montage et types d'intégration des systèmes photovoltaïques

Les différentes typologies des systèmes photovoltaïques intégrés aux bâtiments sont représentées sur la **Figure 1.10**. Afin de calculer les distances requises entre les rangées, on se réfère à la **Figure 1.11**.

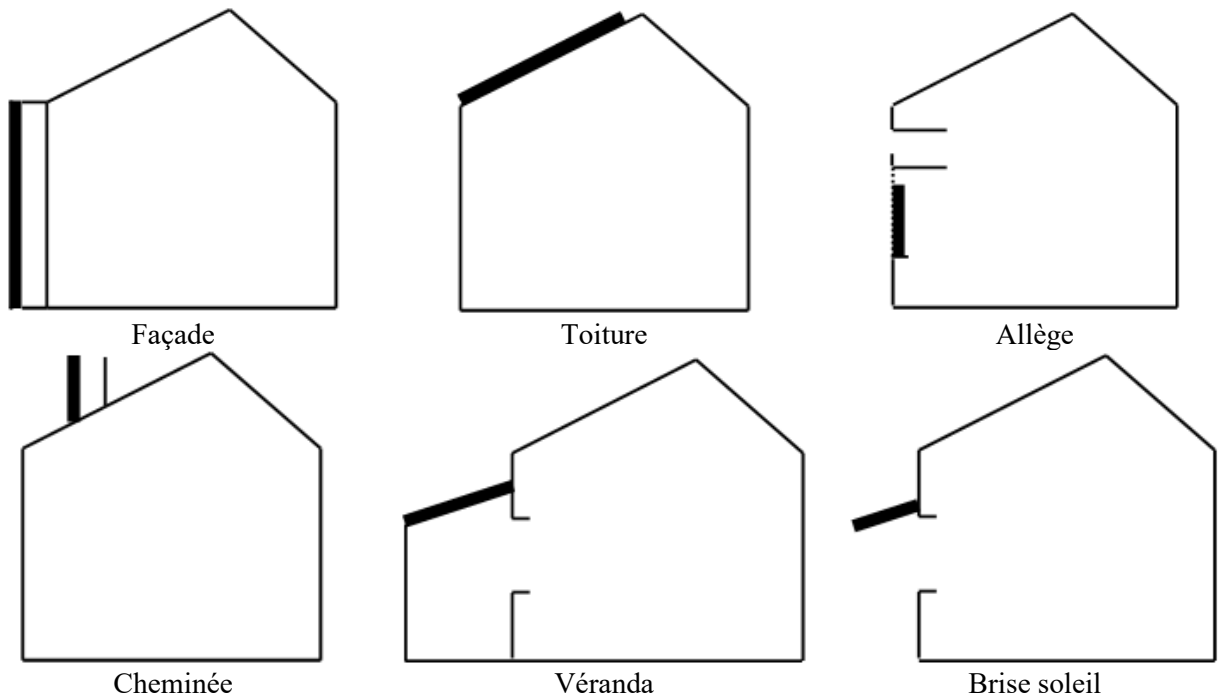


Figure 1.10 : Schéma descriptif des typologies d'intégration des systèmes photovoltaïques [21]

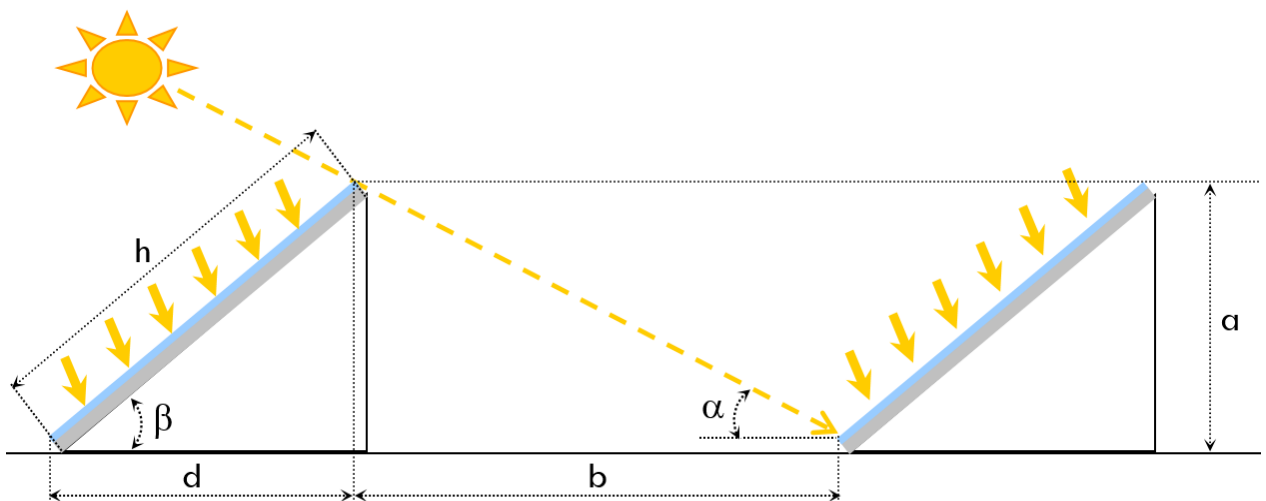


Figure 1.11 : Distances requises entre les rangées de capteurs solaires [21]

La distance à respecter entre deux capteurs photovoltaïques montés sur une toiture ou un sol plat est exprimée par l'équation suivante [21] :

$$\text{Entreaxe} = d + b = h (\cos \beta + \sin \beta / \tan \alpha) \quad (01)$$

h : dimension du capteur (m)

α : hauteur solaire minimum (en degrés, couramment prise le 21 décembre)

β : inclinaison des capteurs (degrés)

Cependant, le matériel et la structure utilisée servent pour la fixation des panneaux solaires en place, que ce soit sur les toits ou au sol. Le choix de la région d'emplacement dont l'irradiation est

maximale est bien évidemment l'un des facteurs cruciaux pour assurer la rentabilité d'un système photovoltaïque. Un montage correct est essentiel pour une exposition solaire et une stabilité optimales. La conception et l'installation du système de montage peuvent influencer de manière significative l'efficacité, la durabilité et les performances globales du système d'énergie solaire. Nous nous intéressons dans cette partie aux principaux aspects des systèmes de montage. Le choix d'un système fixe ou d'un système de tracking se fait essentiellement en fonction du coût.

3.8.1. Systèmes photovoltaïques de montage fixes

L'intégration des modules en toiture ou au sol répond à trois critères : l'esthétique, la réponse adéquate au besoin de couverture, et la facilité d'installation. En outre, ils doivent résister aux forces du vent qui peuvent être considérables en fonction de la disposition et de la grandeur des surfaces inclinées souvent très exposées [22].

3.8.1.1. Montage sur le toit

Les panneaux photovoltaïques sont installés directement sur le toit d'un bâtiment (**Figure 1.12**). Ce type de montage est courant pour les installations résidentielles et commerciales. Les montages sur le toit peuvent être classés en deux catégories :

Montages encastrés : les panneaux solaires sont montés parallèlement à la surface du toit. Montages inclinés : les panneaux solaires sont inclinés pour optimiser l'exposition à la lumière du soleil. [23]



Figure 1.12 : Système de montage en toiture

3.8.1.2. Montage au sol

Les panneaux solaires sont installés au sol à l'aide d'un cadre ou d'un support comme l'indique la **Figure 1.13**. Ce type de montage convient aux installations plus importantes et peut être réglé pour une inclinaison et une orientation optimales. Les facteurs clé qui mènent à la réussite de ce type d'installation ne portent leurs fruits qu'avec un bon choix d'une localisation dont l'irradiation est maximale. Il faut tenir en considération les ombrages mutuels entre les panneaux, c'est-à-dire l'auto-ombrage entre les panneaux en rangées parallèles, et l'occupation du sol. L'ombrage causé par les obstacles environnementaux tels que les arbres ou les bâtiments à proximité la saleté, la poussière, d'autres déjections d'oiseaux semblables à des déchets, présentent des sérieuses contraintes. Plusieurs travaux se sont focalisés sur la description des spécificités de ce type d'installation [24-28]. Néanmoins, l'installation des systèmes photovoltaïques au sol est encadrée par des règles liées au système d'urbanisation. [29]



Figure 1.13 : Système de montage au sol

3.9. Systèmes de poursuite solaire

Les trackers peuvent être sur un ou deux axes. Ceux sur un axe ne vont optimiser le rendement en ne suivant que l'azimut, ceux sur deux axes vont optimiser l'incidence des rayons du soleil. Ces systèmes permettent d'augmenter le rendement des panneaux solaires en leur faisant suivre la course du soleil. En effet, un suiveur solaire peut augmenter le rendement des capteurs photovoltaïques jusqu'à 40% par rapport à une installation fixe orientée plein Sud [29].

3.9.1. Systèmes de poursuite solaire à un seul axe

Le rendement des systèmes photovoltaïques peut être amélioré en suivant deux mécanismes. Le premier consiste à suivre l'azimut qui traduit la course du soleil, les capteurs doivent, en conséquence, suivre le soleil de l'Est à l'Ouest [29]. Ils tournent sur un seul axe et suivent généralement le soleil d'Est en Ouest tout au long de la journée. Ils peuvent augmenter la production d'énergie de 20 à 30 % par rapport aux systèmes fixes [30, 31]. Le second consiste à améliorer

l'incidence des rayons solaires en ajustant l'inclinaison des capteurs solaires. L'incidence des rayons solaires dépend des saisons et de l'heure de la journée. En hiver le soleil est plus bas qu'en été. La **Figure 1.14** donne un exemple indicatif de sa structure.

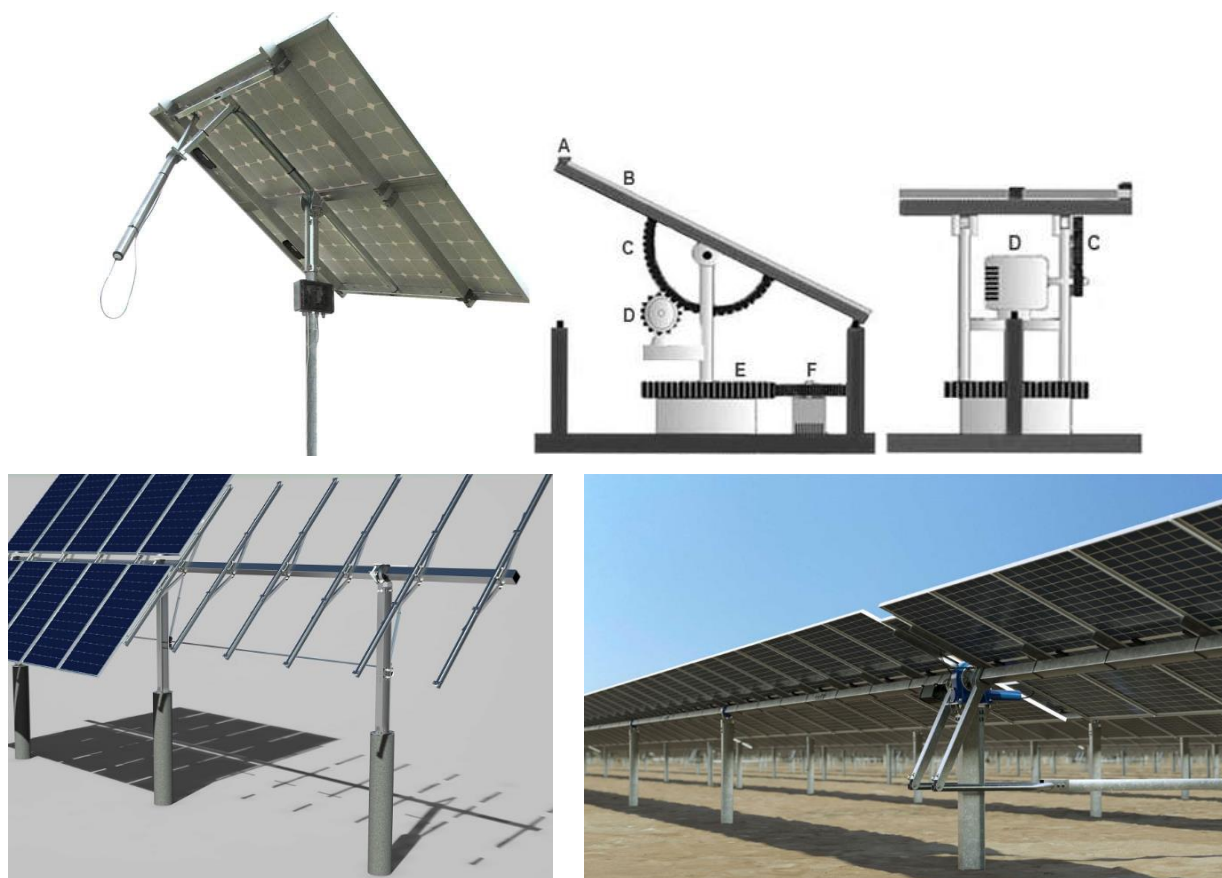


Figure 1.14 : Modèle d'un système de poursuite solaire à un seul axe

3.9.2. Systèmes de poursuite solaire à deux axes

Ces systèmes peuvent se déplacer sur deux axes, ce qui leur permet de suivre la trajectoire du soleil tout au long de la journée et des saisons. Ils fournissent un rendement énergétique le plus élevé, mais ils sont plus complexes et plus coûteux. La **Figure 1.15** montre que ce suiveur solaire ou tracker solaire est sous forme d'un bras motorisé qui tourne à mesure que le soleil avance. Les capteurs solaires vont pivoter de la même façon que les tournesols, du matin jusqu'au soir. On appelle cela le principe de l'héliostat.



Figure 1.15 : Modèle d'un système de poursuite solaire à double axes

4. Avantages et inconvénients des systèmes photovoltaïques autonomes

Le **Tableau 1.1** présente un aperçu général sur les avantages et les inconvénients d'un système photovoltaïque autonome.

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients d'un système photovoltaïque autonome [32]

Avantages	Inconvénients
Énergie renouvelable Le système repose sur le soleil, une source d'énergie gratuite et renouvelable.	Coûts initiaux élevés Un investissement initial important est nécessaire, incluant les panneaux solaires, les batteries de stockage, et l'équipement associé.
Indépendance du réseau électrique Le système fonctionne de manière autonome sans avoir besoin d'être connecté au réseau électrique.	Dépendance aux conditions météorologiques La production d'énergie varie selon la météo (nuages, pluie, ou nuit). Elle dépend aussi de l'ensoleillement, ce qui peut être problématique en cas de mauvais temps prolongé ou dans les régions à faible ensoleillement.
Respect de l'environnement Réduit les émissions de carbone par rapport aux sources d'énergie traditionnelles.	Maintenance régulière nécessaire Des entretiens réguliers des panneaux solaires et des batteries sont nécessaires pour garantir une efficacité optimale.
Écologique L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable et propre, ce qui contribue à réduire l'empreinte carbone et à lutter contre le changement climatique.	Encombrement des équipements Certaines installations nécessitent un grand espace pour installer les panneaux solaires.
Réduction des factures d'électricité Réduit les coûts de consommation d'électricité du réseau.	Durée de vie limitée des batteries Les batteries ont une durée de vie limitée et doivent être remplacées après un certain temps.

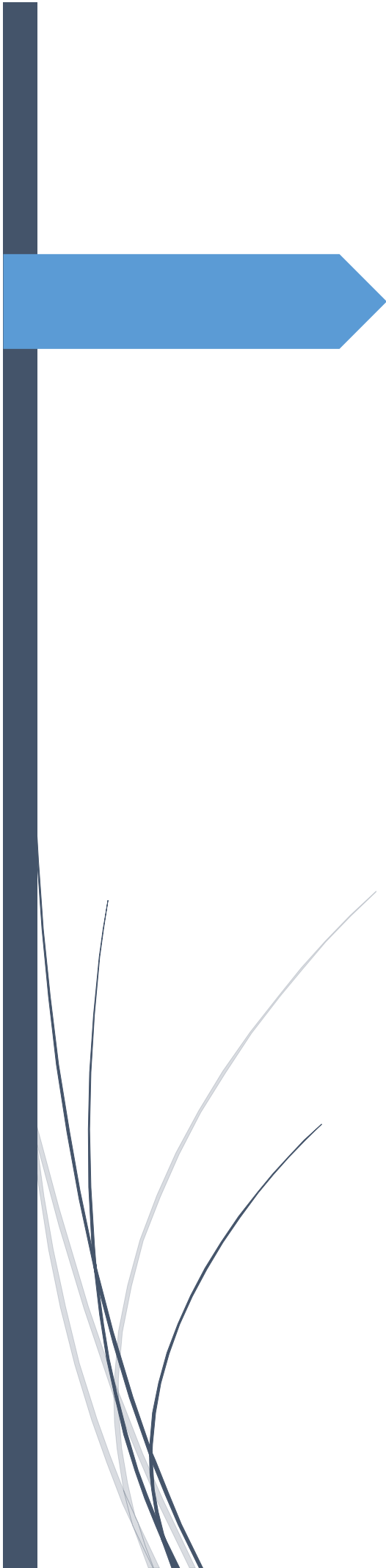
Système évolutif et flexibilité

Il est possible d'ajouter des panneaux solaires supplémentaires selon les besoins. Les systèmes peuvent être dimensionnés en fonction des besoins spécifiques de l'utilisateur, permettant une personnalisation selon la consommation d'énergie.

5. Conclusion

Les systèmes photovoltaïques autonomes représentent une solution prometteuse pour la production d'énergie renouvelable et offrent une réponse efficace aux besoins énergétiques dans les zones éloignées, en permettant une production d'électricité propre et indépendante. Leur adoption croissante est facilitée par des avantages écologiques et économiques à long terme. Pour garantir leur succès, un choix judicieux des composants, un bon dimensionnement et un entretien régulier sont cruciaux. Ces solutions, bien que nécessitant, un investissement initial, contribuent à un avenir énergétique plus vert et plus indépendant.

Leur développement continu et leur intégration dans des solutions énergétiques plus larges sont essentiels pour maximiser leur potentiel et contribuer à une transition énergétique réussie.



Chapitre 2 : Grandeurs radiométriques solaires

Chapitre 2

1. Introduction

Le Soleil génère une quantité d'énergie considérable, connue sous le nom d'énergie solaire ou rayonnement solaire. Malgré l'énorme distance qui le sépare de la Terre, notre planète reçoit une puissance énergétique immense, estimée à environ 180 000 TW. Pour donner un ordre de grandeur, cette énergie équivaut à 200 000 fois la puissance électrique installée en Europe. En une seule minute, la Terre absorbe une quantité d'énergie correspondant à la consommation annuelle d'électricité de tout le continent européen.

Parmi toutes les sources d'énergie naturelles, le rayonnement solaire domine largement. Les autres formes d'énergie, telles que la chaleur issue des profondeurs terrestres, la radioactivité naturelle ou encore le rayonnement cosmique, représentent une fraction infime en comparaison. En effet, leur contribution combinée ne dépasse pas 1 % de l'énergie totale transmise par le Soleil.

Grâce à son rôle prépondérant en tant que principal fournisseur d'énergie pour la Terre, le rayonnement solaire influence une multitude de phénomènes naturels et joue un rôle fondamental dans divers aspects de la vie et du développement humain. L'un des exemples les plus marquants est le climat terrestre. Contrairement au Soleil, l'espace intersidéral entourant la planète est d'une froideur extrême, avoisinant les -270 °C . Il absorbe l'énergie que la Terre émet, sans en restituer. Ainsi, le climat est déterminé par l'équilibre entre l'énergie solaire reçue et celle renvoyée vers l'espace. Une partie du rayonnement est directement absorbée par l'atmosphère, les surfaces continentales et les océans. Pour maintenir cet équilibre, l'énergie accumulée est ensuite restituée sous forme de chaleur ou réémise sous forme de rayonnement, mais à des longueurs d'onde plus élevées. Cette redistribution énergétique est assurée par les océans et l'atmosphère, transportant chaleur et énergie cinétique des zones à fort ensoleillement, comme l'équateur, vers les régions plus froides, comme les pôles. Ces transferts s'opèrent sur différentes échelles de temps et d'espace, influençant de nombreux processus atmosphériques tels que la convection, l'évaporation, la formation des nuages, les vents et les précipitations. Ce chapitre est consacré donc à l'estimation des irradiances solaires journalières qui expriment l'énergie produite par le générateur photovoltaïque.

2. Méthodes de calcul du rayonnement solaire

Il existe plusieurs méthodes permettant de calculer le rayonnement solaire, qui varient en termes de complexité et de précision.

Les méthodes empiriques reposent sur des relations empiriques basées sur des données historiques et des observations. Elles sont souvent utilisées pour des estimations rapides [33].

Les méthodes déployées par la NASA [34, 35] permettent d'obtenir des estimations précises et fiables de l'éclairement solaire, essentielles pour la recherche scientifique et les applications pratiques. Elle se base généralement sur les satellites d'observation de la Terre, les stations de mesure au sol, les données historiques et climatologiques et les modèles climatiques globaux qui intègrent des données sur l'éclairement solaire.

Les modèles de régression [36] utilisent des données météorologiques pour établir des relations avec le rayonnement solaire.

Les modèles physiques prennent en compte les principes physiques du rayonnement solaire et de l'atmosphère. La loi de Beer-Lambert par exemple estime l'atténuation du rayonnement solaire à travers l'atmosphère en fonction de l'angle d'incidence et de la composition atmosphérique [37]. Les modèles de transfert radiatif sont plus complexes et simulent le passage du rayonnement à travers l'atmosphère en tenant compte des nuages, de l'aérosol et d'autres facteurs [38].

Les modèles de simulation sous forme de logiciels ou d'outils de simulation peuvent être utilisés pour modéliser le rayonnement solaire. Nous citons à titre indicatif les logiciels PVsyst (PhotoVoltaic System) [39-42] et SAM (Software Asset Management) qui simulent la production d'énergie solaire en tenant compte des caractéristiques géographiques et climatiques.

Pour le cas de notre application, les calculs menés se sont fondés sur un des modèles basés sur la position du soleil. Le modèle solaire de Perrin-Brichambaut développé par Cabderou associe des études ou des projets liés à l'énergie solaire, à l'architecture solaire, bioclimatique et durable [43].

3. Coordonnées solaires

Ces coordonnées sont utilisées en astronomie et en météorologie pour décrire la position du soleil dans le ciel à un moment donné (**Figure 2.1**). Elles varient au cours de l'année en raison de l'inclinaison de l'axe terrestre et de l'orbite elliptique de la Terre autour du Soleil. Ces variations sont à l'origine des saisons et des changements dans la durée du jour.

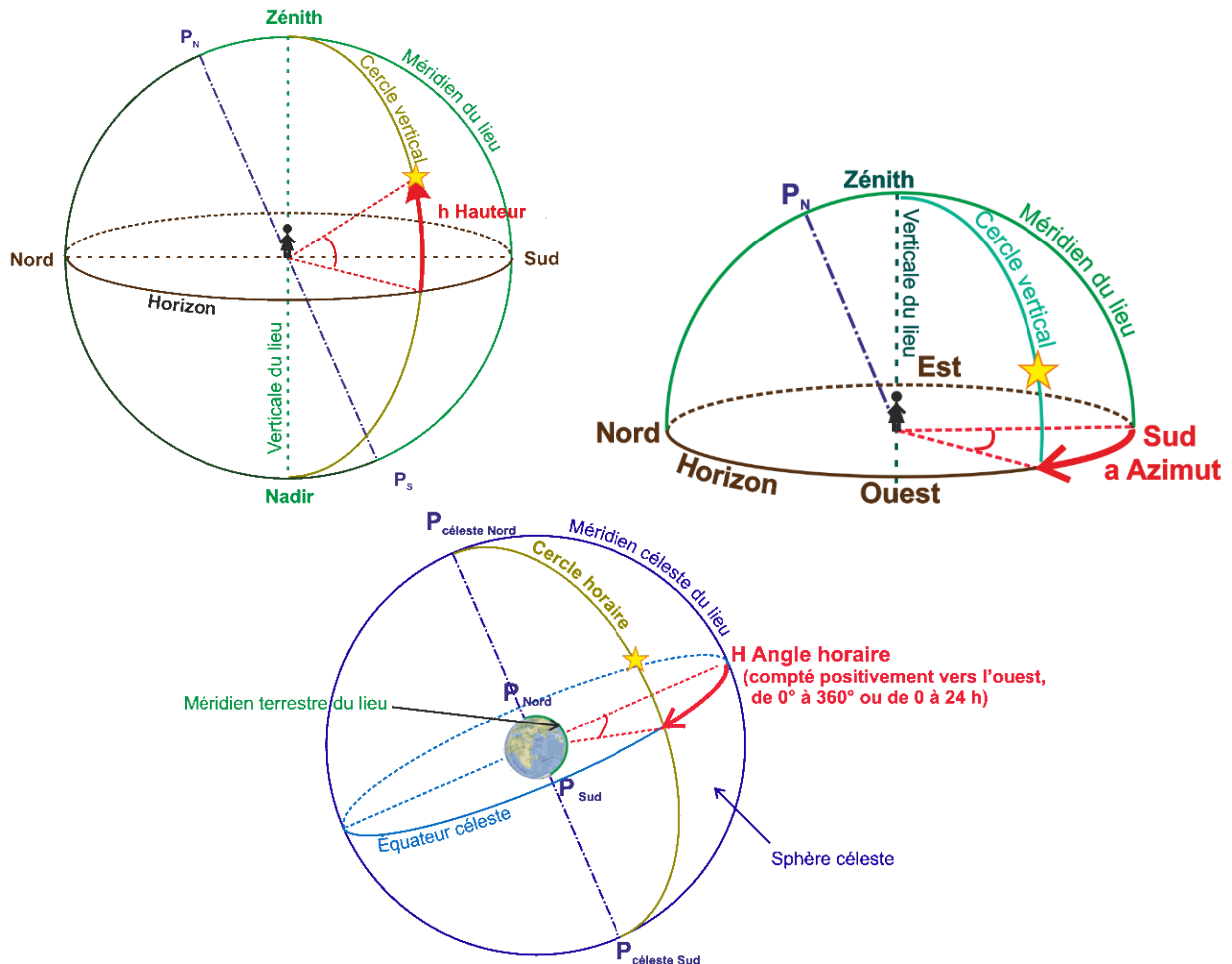


Figure 2.1 : Schémas indiquant les principaux repères de la position du soleil [44]

3.1. Latitude de lieu

La latitude d'un lieu est une mesure géographique qui indique la position d'un point sur la surface de la Terre par rapport à l'équateur. Elle est exprimée en degrés ($^{\circ}$), allant de 0° à 90° au Nord (latitude Nord) et de 0° à 90° au Sud (latitude Sud). L'équateur, qui est la ligne imaginaire qui divise la Terre en hémisphères Nord et Sud, Est à 0° de latitude. Les latitudes au Nord de l'équateur sont positives, tandis que celles au Sud sont négatives.

3.2. Longitude de lieu

La longitude d'un lieu est une mesure géographique qui indique la position d'un point sur la surface de la Terre par rapport au méridien de Greenwich, qui est considéré comme le méridien de référence (0° de longitude). La longitude est exprimée en degrés ($^{\circ}$), et elle peut être mesurée à l'Est ou à l'Ouest du méridien de Greenwich.

3.3. Angle de déclinaison solaire

Par définition, c'est l'angle compris entre les rayons solaires et le plan de l'équateur terrestre. Il varie tout au long de l'année en fonction de la position de la Terre sur son orbite autour du soleil,

allant de $-23.7'$ (solstice d'hiver) à $+23,7'$ (solstice d'été). Si la Terre n'est pas inclinée sur son axe de rotation, la déclinaison s'annule aux équinoxes de printemps et d'automne [45, 46].

$$d = \arcsin \left[0.389 \sin \left[\frac{360}{365} (N - 82) + 2 \sin \left(\frac{360}{365} (N - 2) \right) \right] \right] \quad (2.1)$$

N représente le numéro du jour de l'année à compter du premier janvier.

3.4. Angle horaire

C'est l'angle qui mesure le temps écoulé depuis le midi solaire, exprimé en degrés. Il est de 0° à 180° pour l'après-midi et de 0° à -180° pour le matin. Un degré correspond quatre minutes, soit quinze degrés par heure [45, 46].

$$H = 15 (TSV - 12) \quad (2.2)$$

$$TSV = TL - DE + \left(\frac{Et + 4\lambda}{60} \right) \quad (2.3)$$

$$Et = 9.87 \sin \left(\frac{720}{365} (N - 82) \right) - 7.53 \cos \left(\frac{360}{365} (N - 82) \right) - 1.5 \sin \left(\frac{360}{365} (N - 82) \right) \quad (2.4)$$

TSV représente le temps solaire vrai qui est une mesure du temps basée sur la position réelle du soleil dans le ciel, sachant que le temps moyen (le temps universel coordonné UTC à titre d'exemple) est une approximation uniforme qui ne tient pas compte des variations saisonnières.

Le temps solaire vrai varie donc au cours de l'année en raison de l'orbite elliptique de la Terre et de l'inclinaison de son axe. Il est, par définition, au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude référence. La valeur de l'angle horaire H égale à 0° à midi, 90° à 18 heures et -90° à 6 heures en heure solaire vraie.

DE représente le décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich.

TL le temps légal donné par une montre.

Et la correction de l'équation du temps.

3.5. Hauteur du soleil

La hauteur du soleil, également appelée "hauteur solaire" ou "angle d'élévation du soleil", est l'angle entre le soleil et l'horizon, mesuré en degrés. Cet angle change au cours de la journée et de la saison en fonction de la position géographique. La hauteur du soleil est maximale à midi solaire vu que le soleil est plus haut dans le ciel. Au lever et au coucher du soleil, le soleil est à l'horizon, donc la hauteur solaire est de 0 degré. Elle est également utilisée dans le calcul des angles d'incidence des rayons solaires sur des surfaces, ce qui est crucial pour des applications telles que la conception de panneaux solaires. Elle influence, en conséquence, l'éclairage naturel, la température et l'ombre projetée par les objets [45, 46].

$$\sin(h) = \cos(d) \cos(\varphi) \cos(H) + \sin(\varphi) \sin(d) \quad (2.5)$$

3.6. Azimut du soleil

L'azimut du soleil est un angle qui mesure la position du soleil par rapport à un point de référence. Il est compris entre la projection des rayons du soleil et une ligne plein Sud ou plein Nord [45, 46].

$$\sin(a) = \frac{\cos(d) \sin(H)}{\cos(h)} \quad (2.6)$$

Il est exprimé en degrés, allant de 0° à 360°. Un azimut de 90° indique que le soleil est à l'Est, 180° signifie qu'il est au Sud, et 270° indique qu'il est à l'Ouest.

3.7. Azimut du plan

L'azimut d'un plan "a_p" fait référence à l'orientation de ce plan par rapport au Nord. Cet angle est statique et dépend de l'orientation de ce plan. Leurs valeurs en fonction des différentes orientations sont données par le **Tableau 2.1**.

Tableau 2.1 : L'azimut du plan suivant les différentes orientations [46]

Orientation	Nord	Nord-Est	Est	Sud-Est	Sud	Sud-Ouest	Ouest	Nord-Ouest
A _p (°)	180	- 135	- 90	- 45	0	45	90	135
	- 180	225	270	315	360	- 315	- 270	- 225

3.8. Angle d'incidence sur un plan

C'est l'angle formé entre la direction d'un rayon solaire incident et la normale. La normale est une ligne imaginaire perpendiculaire à la surface au point d'incidence. Un angle d'incidence de 0° signifie que le rayon solaire frappe la surface perpendiculairement, tandis qu'un angle de 90° signifie que le rayon est parallèle à la surface. L'angle d'incidence solaire (θ) peut être calculé à partir de l'élévation et de l'azimut du soleil, ainsi que de l'inclinaison et de l'azimut du plan. Sa formule est exprimée par l'équation suivante [47] :

$$\cos(\theta) = \sin(H) \sin(\beta) + \cos(H) \cos(\beta) \cos(a - a_p) \quad (2.7)$$

4. Modèle d'estimation du rayonnement solaire terrestre (modèle de Capderou)

Le modèle Capderou est un outil précieux pour évaluer le potentiel de l'énergie solaire. C'est un cadre théorique utilisé pour analyser et évaluer le potentiel solaire d'une région donnée, en l'occurrence l'Algérie. Il permet de formuler des recommandations pour le développement durable de cette ressource, en tenant compte des spécificités locales et des enjeux globaux liés à la transition énergétique. En 1987, Capderou a proposé un modèle mathématique permettant de calculer les

composants du rayonnement solaire basé sur le calcul du facteur de trouble atmosphérique. Ce facteur a fait généralement référence à des éléments ou des conditions qui perturbent l'atmosphère, affectant ainsi la qualité de l'air, le climat ou les conditions météorologiques. Son expression est donnée par l'équation suivante [47, 48] :

$$T_L^* = T_0 + T_1 + T_2 \quad (2.8)$$

T_0 est le facteur de turbidité due à l'absorption gazeuse par la vapeur d'eau

$$T_0 = 2.4 - 0.9 \sin(\varphi) + 0.1 \left(2 + \sin(\varphi) \right) \sin \left(\frac{360}{365} (j - 121) \right) - 0.2 z - \left(1.22 + 0.14 \sin \left(\frac{360}{365} (j - 121) \right) \right) (1 - \sin(h)) \quad (2.9)$$

z : l'altitude de lieu (km).

T_1 : le facteur de trouble lié à l'absorption par les gaz de l'atmosphère (O_2 , CO_2 , et O_3) et à la diffusion moléculaire de Rayleigh.

$$T_1 = 0.89^z \quad (2.10)$$

T_2 est défini comme étant le facteur de trouble dû à la diffusion par les aérosols couplés à une légère absorption. Il est en fonction, à la fois, de la nature et de la quantité des aérosols.

$$T_2 = \left(0.9 - 0.4 \sin \left(\frac{360}{365} (j - 121) \right) \right) 0.63^z \quad (2.11)$$

4.1. Calcul de l'éclairement solaire sur un plan horizontal

Par définition, il correspond à la mesure de la puissance du rayonnement solaire reçu par unité de surface (W/m^2) sur un plan horizontal. Il est également appelé irradiance. Il prend en considération la lumière qui atteint une surface à la fois directement du soleil et celle qui provient de la diffusion de la lumière par les nuages, les particules de l'air, etc.

L'éclairement solaire direct, formulé par l'équation 2.12 fait référence à la lumière du soleil qui atteint directement une surface sans être diffusée ou réfléchi par l'atmosphère ou d'autres objets. Cela se produit lorsque le soleil est visible dans le ciel, sans nuages ou obstacles qui pourraient atténuer ou disperser la lumière [47, 48].

$$Dir_{hor} = I_0 \sin(h) C_{t-s} e^{-T_L^* \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89^z} \sin(h) \right)^{-1}} \quad (2.12)$$

La constante solaire I_0 représente la quantité d'énergie solaire reçue par unité de surface, perpendiculaire aux rayons du soleil, à une distance d'une unité astronomique (environ 149.6 millions de kilomètres) de celui-ci. Sa valeur moyenne, retenue est d'environ $1367 W/m^2$. Cela signifie qu'à cette distance, chaque mètre carré de surface perpendiculaire aux rayons du soleil reçoit en moyenne 1367 watts d'énergie solaire. Mais la quantité d'énergie reçue peut varier en fonction de l'orbite de la

Terre, de l'inclinaison de son axe et des conditions atmosphériques. Pour cette raison, il a été proposé une constante solaire corrigée définie par le terme multiplicatif $I_0 C_{t-s}$ avec [47, 48] :

$$C_{t-s} = 1 + 0.034 \cos\left(\frac{360}{365}(j - 2)\right) \quad (2.13)$$

L'éclairement diffus fait référence à la manière réfléchi par des surfaces. Il se produit lorsque la lumière est diffusée dans toutes les directions par des surfaces rugueuses ou non-réfléchissantes. Dans ce cas, il dépend de la valeur du facteur de turbidité de Linke et de l'angle d'élévation du soleil [47, 48].

$$\text{Diff}_{\text{hor}} = I_0 C_{t-s} e^{-1+1.06 \log(\sin(h))} + 1.1 - \sqrt{1.21 + b^2} \quad (2.14)$$

$$b = \log(T_L^* - T_0) - 2.8 + 1.02 (1 - \sin(h))^2 \quad (2.15)$$

L'éclairement solaire global est la somme de ces deux composants. Il peut atteindre et parfois dépasser la valeur de 1000 W/m² par temps clair et sans nuage.

$$\text{Glob}_{\text{hor}} = \text{Dir}_{\text{hor}} + \text{Diff}_{\text{hor}} \quad (2.16)$$

4.2. Calcul de l'éclairement solaire sur un plan quelconque

Pour une estimation précise de l'éclairement solaire sur un plan d'inclinaison et d'orientation quelconque, un modèle plus complexe, qui prend en compte les variations saisonnières, les conditions atmosphériques, et la position géographique, est requis.

4.2.1. L'éclairement direct

L'éclairement direct, défini par la projection de la composante normale sur un plan incliné, est calculé par la formule suivante [47, 48] :

$$\text{Dir}_{\text{inc}} = I_{\text{nor}} \cos(i) = I_0 \cos(i) C_{t-s} e^{-T_L^* \left(0.9 + \frac{9.4}{0.89z} \sin(h)\right)^{-1}} \quad (2.17)$$

I_{nor} représente l'éclairement solaire direct à incidence normale.

4.2.2. L'éclairement diffus

L'éclairement solaire diffus détermine le rayonnement solaire atteint au sol dispersé par un composant atmosphérique tel que les molécules d'air, la poussière ou les nuages. Il est composé de trois termes :

4.2.2.1. La composante circumsolaire

Le rayonnement circumsolaire fait référence à l'énergie émise par le Soleil qui se propage dans l'espace environnant. Ce rayonnement comprend une large gamme de longueurs d'onde, allant des rayons gamma et des rayons X aux ultraviolets, à la lumière visible, aux infrarouges et aux ondes radio. En astrophysique, le terme peut également être utilisé pour décrire le rayonnement provenant

d'autres étoiles ou objets célestes dans un contexte similaire, mais il est principalement associé à notre Soleil et à son impact sur le système solaire [47, 48].

$$\delta_d = I_0 C_{t-s} e^{-2.48 + \sin(h) + a - \sqrt{aa^2 + 4 bb^2}} \quad (2.18)$$

$$aa = 3.1 - 0.4 bb \quad (2.19)$$

$$bb = \log(T_L^* - T_0) - 2.28 - 0.5 \log(\sin(h)) \quad (2.20)$$

4.2.2.2. La composante isotrope

La composante isotrope fait référence à la partie du rayonnement solaire qui est diffusée dans toutes les directions de manière uniforme. C'est exactement la portion de la lumière solaire qui, après avoir été diffusée par des particules dans l'atmosphère (comme des molécules d'air, des gouttes d'eau ou des particules de poussière), arrive à un point donné sur la surface de la Terre de manière égale, peu importe l'angle d'incidence [47, 48].

$$\delta_i = D_{hor} - \delta_d \sin(h) \quad (2.21)$$

4.2.2.3. La composante du cercle de l'horizon

Même lorsque le soleil est en dessous de l'horizon, une partie de la lumière peut encore être visible grâce à la diffusion atmosphérique. Cela peut créer des effets de lumière intéressants, comme le crépuscule, où le ciel peut être illuminé par la lumière diffusée même après le coucher du soleil. Elle prend l'expression suivante [47, 48] :

$$\delta_h = I_0 C_{t-s} \frac{-0.02 aaa}{aaa^2 + aaa bbb + 1.8} e^{\sin(h)} \quad (2.22)$$

$$aaa = \log(T_L^* - T_0) - 3.1 - \log(\sin(h)) \quad (2.23)$$

$$bbb = e^{0.2 + 1.75 \log(\sin(h))} \quad (2.24)$$

L'éclairement diffus incident en provenance du ciel sera donc formulé par l'équation suivante [47, 48] :

$$d_{ciel} = \delta_d \cos(i) + \delta_i \frac{1 + \sin(90 - \beta)}{2} + \delta_h \cos(90 - \beta) \quad (2.25)$$

β : l'inclinaison du plan d'incidence

L'éclairement diffus du sol, en lien avec la réflexion, fait référence à la manière dont la lumière est réfléchiée par la surface d'un sol ou d'un matériau. Il est en fonction de son albédo qui révèle la réflexion du flux solaire incident [47, 48] :

$$d_{sol} = \rho G_{hor} \frac{1 - \sin(90 - \beta)}{2} \quad (2.26)$$

ρ représente l'albédo du sol.

L'éclairement diffus rétrodiffusé fait référence à la lumière réfléchiée dans toutes les directions après avoir frappé une surface rugueuse ou non-lisse [47, 48].

$$d_{\text{rétr}} = 0.9 (\rho - 0.2) G_{\text{hor}} e^{-\frac{4}{\sqrt{T_L^* - T_0}}} \quad (2.27)$$

L'éclairement solaire diffus incident sur un plan incliné est donné par l'équation suivante :

$$\text{Diff}_{\text{inc}} = d_{\text{ciel}} + d_{\text{sol}} + d_{\text{rétr}} \frac{1 + \sin(90 - \beta)}{2} \quad (2.28)$$

L'éclairement solaire global incliné à un instant donné est comme suit :

$$\text{Glob}_{\text{inc}} = \text{Dir}_{\text{inc}} + \text{Diff}_{\text{inc}} \quad (2.29)$$

5. L'inclinaison optimale

La maximisation de la production d'énergie sur une période donnée recommande un ajustement de l'angle en fonction des périodes et des saisons. Cet angle dépend de la latitude du site d'installation, la saison, et l'orientation géographique. Pour une inclinaison optimale journalière, on peut utiliser la formule [47] :

$$\beta_{\text{opt}} = \varphi - d \quad (2.30)$$

$$d = \frac{0.33 - 22.18 \cos(0.984 j) - 0.35 \cos(1.968 j) - 0.14 \cos(2.952 j)}{+3.787 \sin(0.984 j) + 0.032 \sin(1.968 j) + 0.072 \sin(2.952 j)} \quad (2.31)$$

En hiver, un angle plus élevé peut être préférable pour capter le soleil bas dans le ciel.

En été, un angle plus faible peut être plus efficace pour capter le soleil haut dans le ciel.

6. Régime climatique de Ghardaïa

La **figure 2.2** montre que Ghardaïa est une ville située dans la région Sud de l'Algérie, au cœur de la vallée du M'zab, qui est une région classée au patrimoine mondial de l'UNESCO. La ville se trouve à environ 600 kilomètres au Sud d'Alger, la capitale du pays, entourée de paysages désertiques, de montagnes et de palmeraies. Elle est située dans un environnement désertique, avec une géographie qui a influencé son développement et son mode de vie. Sa situation géographique est à 32°27'N de latitude et 3°40'E de longitude. Selon la carte, elle est à une altitude d'environ 600 mètres au-dessus du niveau de la mer [49].

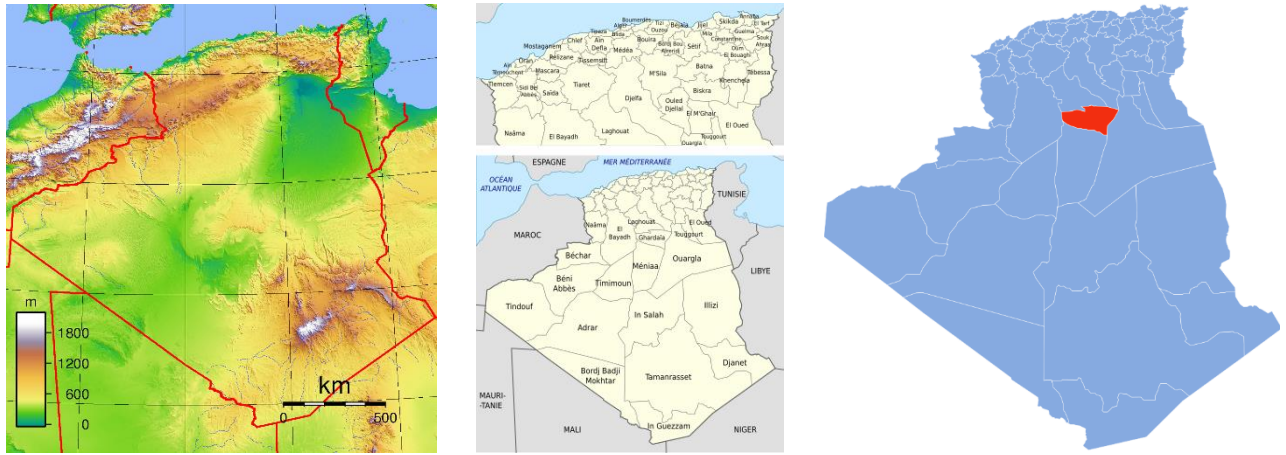


Figure 2.2 : Altitude et localisation de la Wilaya de Ghardaïa [49]

Selon la classification de Köppen, le climat de Ghardaïa est caractérisé principalement par un climat désertique chaud (BWh). Les étés sont très chauds, avec des températures pouvant dépasser 40 °C en juillet et août. Les hivers sont plus doux, avec des températures diurnes autour de 15 à 20 °C en décembre et janvier, mais les nuits peuvent être fraîches, parfois proches de 0 °C. L'humidité est généralement faible, parfois très faible, ce qui contribue à la sensation de chaleur intense en été. Les vents sont chauds en été, apporte de la chaleur et de la poussière du désert [50].

A Ghardaïa, l'indice de clarté varie sensiblement selon les mois. Le mois le plus clair de l'année où le ciel est généralement dégagé est celui d'Août. La période la plus claire de l'année dure presque trois mois et commence généralement au début du mois de juin. Le mois le plus nuageux de l'année durant lequel le ciel est généralement couvert ou nuageux environ 79.47% du temps est celui d'Octobre. Le taux de clarté annuel est très élevé, estimé à 88.87% [51].

7. Calcul de l'irradiation solaire

L'intégration des systèmes photovoltaïques peut se faire selon plusieurs typologies. Le principal type concerne l'intégration au bâti (BIPV - Building Integrated Photovoltaics). Les panneaux photovoltaïques dans ce cas peuvent être intégrés directement dans les éléments de construction, comme les toits qu'ils soient inclinés ou plats, les sols, les façades ou les fenêtres. Les inclinaisons peuvent varier donc en fonction de l'élément de construction de cette typologie.

Les panneaux intégrés au toit sont installés souvent avec une inclinaison correspondant à celle du toit. Cela permet une intégration esthétique, mais l'angle peut ne pas être optimal pour la production d'énergie. Si les panneaux sont en surimposition, c'est-à-dire, s'ils sont installés avec un angle d'inclinaison fixe qui peut être ajusté pour maximiser l'exposition au soleil. En général, un angle égal à la latitude du lieu est un bon point de départ. Pour les systèmes de façade, les panneaux photovoltaïques peuvent être intégrés dans les façades des bâtiments. L'inclinaison peut varier, mais

elle est souvent verticale. Selon ce constat, nous devons étudier les orientations et les inclinaisons suivantes :

- L'orientation est recommandée en absence des contraintes architecturales. Les panneaux doivent d'abord idéalement être orientés vers le Sud dans l'hémisphère Nord. Une orientation Sud-Est ou Sud-Ouest peut également être acceptable, mais cela peut réduire la production.
- Pour maximiser la production d'énergie tout au long de l'année, une inclinaison à la latitude de l'emplacement est requise.
- Pour les systèmes de façades, les études doivent inclure aussi les différentes orientations pour une inclinaison verticale.

Dans ce chapitre, le modèle de Capderou, valide pour un ciel totalement clair, a été utilisé pour le calcul de l'éclairement solaire (l'irradiance solaire) défini comme étant un flux exprimé en W/m^2 . Nous déduisons par la suite l'irradiation solaire en calculant soit l'intégrale sur la durée d'ensoleillement (duré du jour), soit en multipliant la valeur moyenne journalière (pendant 24 heures) de l'éclairement solaire instantané par 24. L'irradiation solaire est une grandeur radiométrique qui mesure la quantité d'énergie solaire reçue par unité de surface. Elle sera exprimée en wattheures par mètre carré (Wh/m^2). Elle caractérise principalement le gisement solaire et elle sera utilisée dans les calculs de dimensionnement des systèmes photovoltaïques.

Le choix des journées de simulation a été porté sur les jours types journaliers pour le traçage des éclairements solaires instantanés. Les jours types dans le gisement solaire sont des représentations standardisées qui aident à évaluer et à planifier l'utilisation de l'énergie solaire dans une région donnée. On peut définir des jours types saisonniers (printemps, été, automne, hiver) en tenant compte des variations de l'ensoleillement et de l'angle d'incidence du rayonnement solaire. Pour ce faire, l'étude a été basée sur des données couvrant une période allant du 1^{er} janvier 2004 au 31 décembre 2015, représentant une année standard divisée en 12 mois typiques. Le **Tableau 2.2** donne en degrés les valeurs correspondantes des inclinaisons optimales mensuelles calculées par les équations 2.30 et 2.31. Les résultats concernent aussi une estimation des irradiances solaires journalières en fonction des différentes typologies.

Le premier exemple, représenté par la **Figure 2.3**, correspond au 5 janvier au chef-lieu de Ghardaïa qui est, une journée, courte et typique en raison de l'hiver. Les courbes obtenues s'accordent avec l'ensemble des typologies d'intégration des systèmes photovoltaïques.

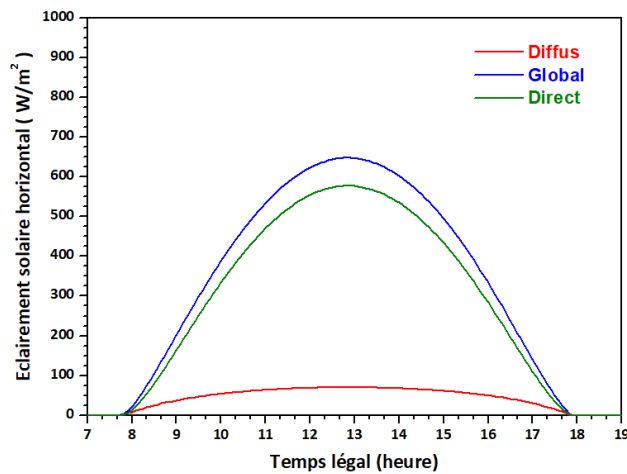
La figure montre que l'éclairement solaire varie au cours de la journée. Le soleil est plus haut dans le ciel autour de midi, ce qui entraîne un éclairement maximal, tandis qu'il est plus bas le matin et le soir.

Le deuxième exemple concerne la journée du 19 avril (**Figure 2.4**) qui correspond à un éclairage solaire pendant l'intersaison qui varie en fonction de l'inclinaison et de l'heure de la journée. Pendant cette période (intersaison), le Soleil se déplace entre les positions extrêmes de l'été et de l'hiver. Au printemps, il monte progressivement dans le ciel. Cela affecte l'angle d'incidence des rayons solaires sur les surfaces orientées au Sud. Les jours s'allongent au printemps. Cela signifie qu'il y a plus d'heures d'ensoleillement au printemps, ce qui augmente l'éclairage solaire total reçu par les surfaces orientées au Sud.

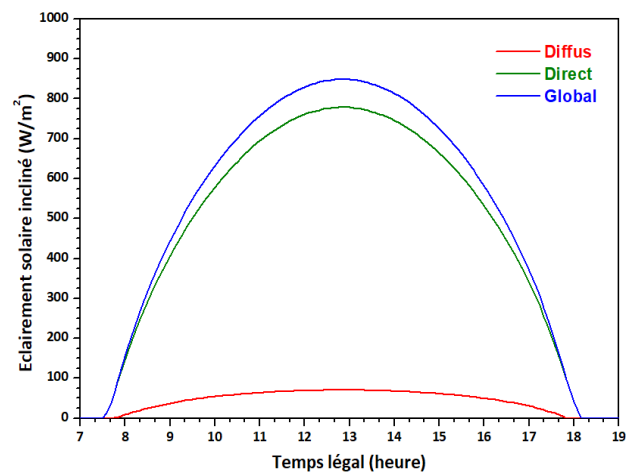
La courbe de l'éclairage solaire, en août et en été en général, représente la variation de l'intensité du rayonnement solaire reçu à la surface de la Terre au cours de la journée comme l'indique la **Figure 2.5**. Le rayonnement solaire atteint son maximum autour de midi TSV lorsque le soleil est au zénith. Cela signifie que les rayons du soleil frappent la surface de la Terre de manière plus directe, ce qui augmente l'intensité du rayonnement. Les journées sont plus longues.

Tableau 2.2 : Estimation des irradiances solaires journalières " $I_{r \text{ Sol Jour}}$ " en fonction des typologies d'intégration architecturale

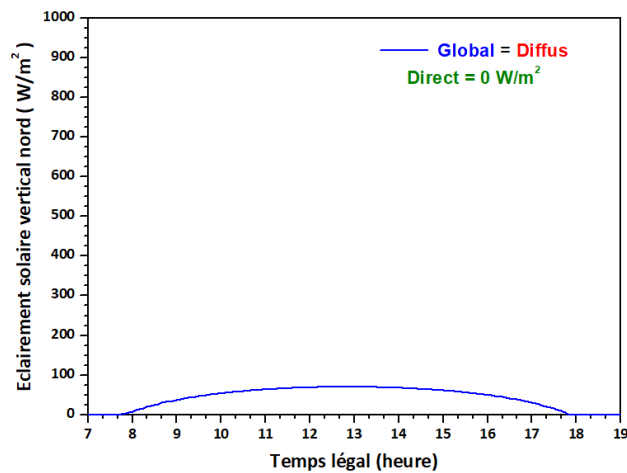
Mois	Indice de clarté (%)	Jour type	Inclinaison optimale mensuelle (°)	Irradiances solaires (Wh)									
				Horizontales		Vertical Sud		Vertical Est / Vertical Ouest		Verticale Nord		Incliné Sud à 32°	
				Ciel clair	Ciel observé	Ciel clair	Ciel observé	Ciel clair	Ciel observé	Ciel clair	Ciel observé	Ciel clair	Ciel observé
Janvier	84.76	5	52.43	3976.45	3370.44	6179.86	5238.04	2476.92	2099.43	511.26	433.34	6453.16	5469.69
Février	88.81	8	44.83	4986.57	4428.57	5997.31	5326.21	2950.38	2620.23	582.19	517.04	7181.90	6378.24
Mars	83.64	15	34.22	6497.62	5434.61	4862.10	4066.66	3602.75	3013.34	744.15	622.41	7805.36	6528.40
Avril	87.25	19	23.02	7722.26	6737.67	3213.70	2803.95	4040.23	3525.10	1073.82	936.91	7837.60	6838.31
Mai	88.08	20	14.24	8272.56	7286.47	2264.76	1994.80	4193.01	3693.20	1612.65	1420.42	7569.16	6666.91
Juin	93.45	07	10.01	8370.40	7822.14	2027.68	1894.86	4203.91	3928.55	1848.84	1727.74	7421.83	6935.70
Juillet	95.95	21	11.89	8067.93	7741.17	2251.56	2160.37	4104.09	3937.87	1718.64	1649.04	7345.79	7048.29
Août	96.88	25	19.10	7307.72	7079.71	3198.43	3098.64	3850.31	3730.18	1218.94	1180.91	7423.79	7192.17
Septembre	87.80	16	29.49	6628.29	5819.63	4022.52	3531.77	3595.34	3156.71	1009.31	886.17	7370.13	6470.98
Octobre	93.64	30	40.70	4898.24	4586.71	5501.23	5151.35	2864.99	2682.77	716.39	670.83	6798.34	6365.96
Novembre	86.72	26	50.04	4117.32	3570.53	5885.75	5104.12	2500.76	2168.66	584.52	506.89	6389.65	5541.10
Décembre	79.47	28	54.60	3877.77	3081.66	6123.29	4866.18	2400.61	1907.76	510.84	405.96	6340.31	5038.64



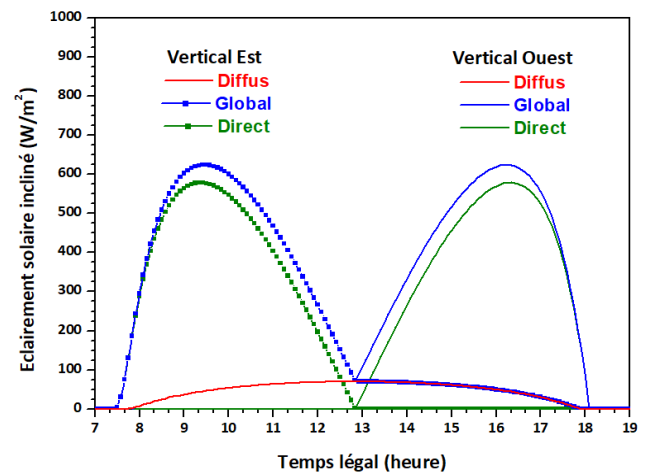
Sur un plan horizontal
 $Ir_{\text{Sol Jour}} = 3976.45 \text{ Wh/m}^2$



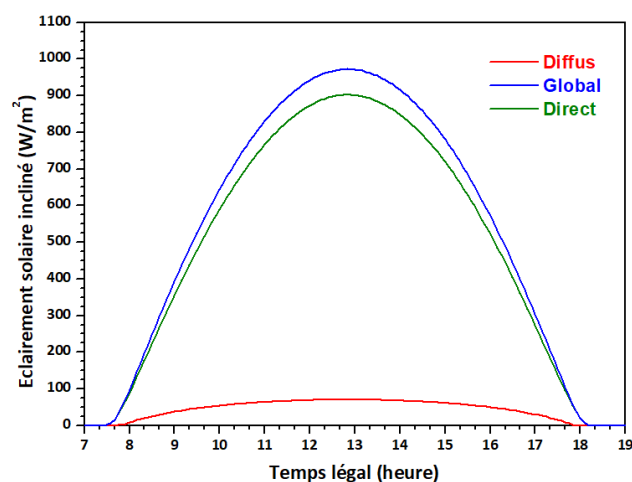
Sur un plan vertical Sud
 $Ir_{\text{Sol Jour}} = 6179.86 \text{ Wh/m}^2$



Sur un plan vertical Nord
 $Ir_{\text{Sol Jour}} = 511.26 \text{ Wh/m}^2$

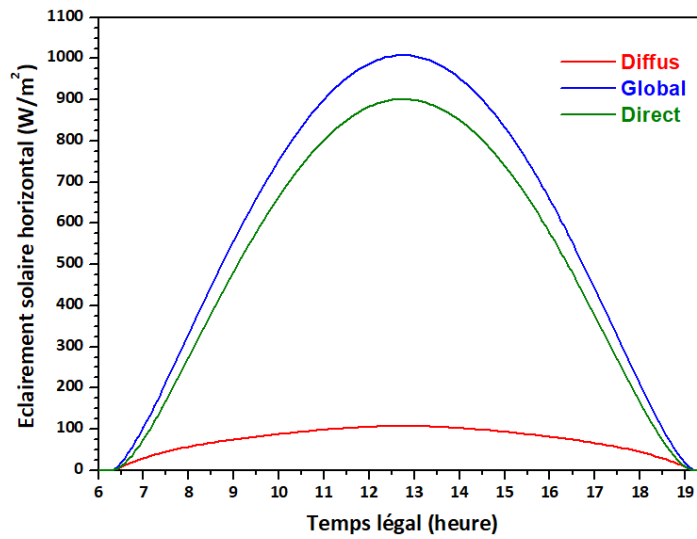


Sur un plan vertical Est et Ouest
 $Ir_{\text{Sol Jour}} = 2476.92 \text{ Wh/m}^2$

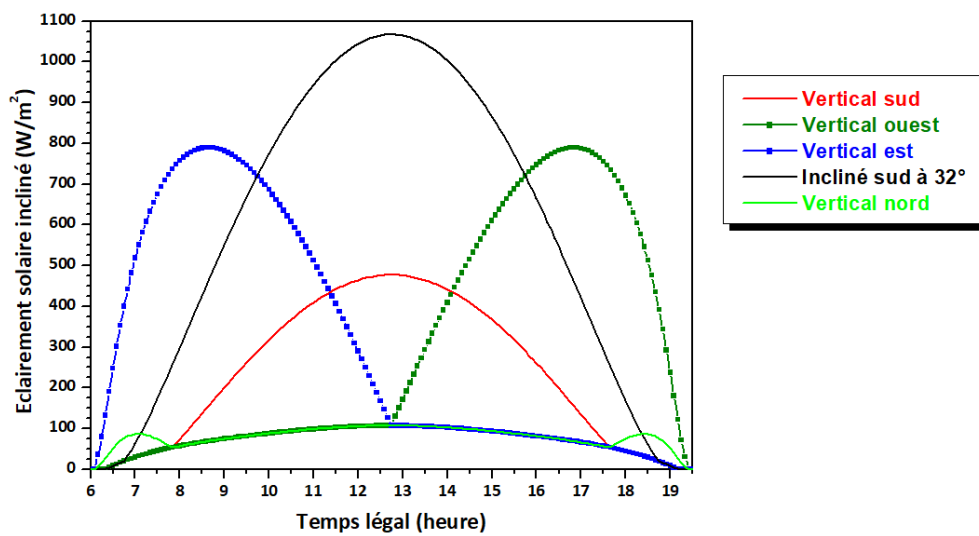


Sur un plan incliné à latitude de lieux (32°) orienté au Sud
 $Ir_{\text{Sol Jour}} = 6453.16 \text{ Wh/m}^2$

Figure 2.3 : Courbes des éclairements solaires (global, diffus et directe), cas de la journée du 5 janvier

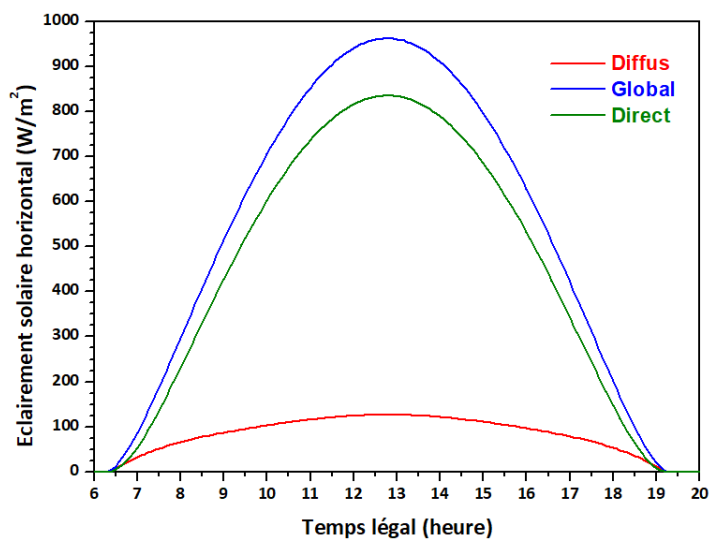


Sur un plan horizontal $I_{r \text{ Sol Jour}} = 7722.23 \text{ Wh/m}^2$

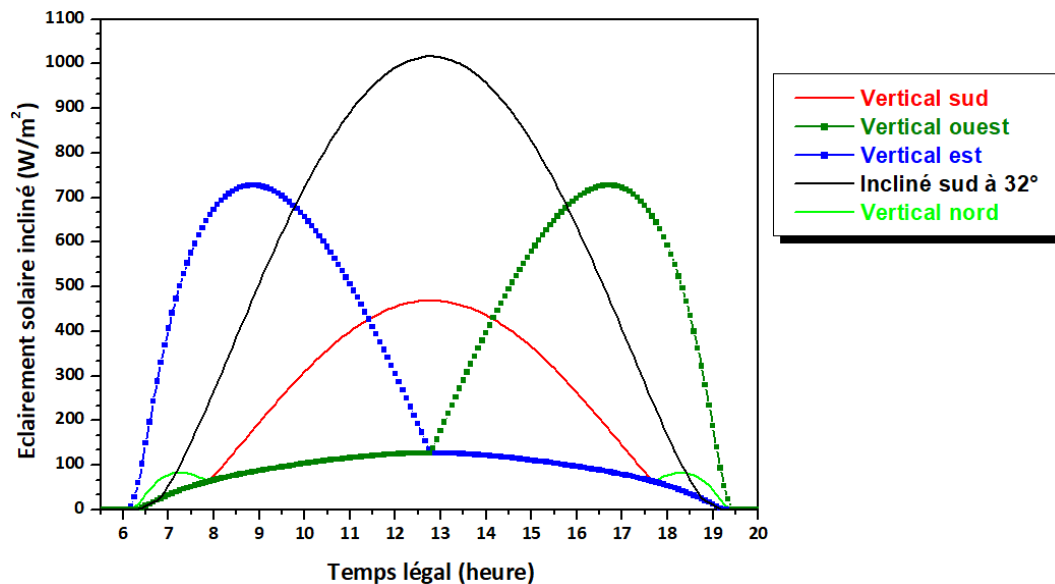


$I_{r \text{ Sol Jour vertical Sud}} = 3213.70 \text{ Wh/m}^2$, $I_{r \text{ Sol Jour vertical Est/Ouest}} = 4049.08 \text{ Wh/m}^2$, $I_{r \text{ Sol Jour vertical Nord}} = 1077.89 \text{ Wh/m}^2$, $I_{r \text{ Sol Jour incliné Sud à } 32^\circ} = 7837.60 \text{ Wh/m}^2$

Figure 2.4 : Courbes des éclairements solaires (global, diffus et directe), cas de la journée du 19 avril



Sur un plan horizontal $I_{r \text{ Sol Jour}} = 7307.73 \text{ Wh/m}^2$



$$I_{r \text{ Sol Jour vertical Sud}} = 3198.43 \text{ Wh/m}^2, I_{r \text{ Sol Jour vertical Est/Ouest}} = 3855.19 \text{ Wh/m}^2, I_{r \text{ Sol Jour vertical Nord}} = 1221.04 \text{ Wh/m}^2, I_{r \text{ Sol Jour incliné Sud à } 32^\circ} = 7423.80 \text{ Wh/m}^2$$

Figure 2.5 : Courbes des éclairagements solaires (global, diffus et directe), cas de la journée du 25 Août

D'autre part, les chiffres enregistrés montrent que l'irradiation horizontale atteint son maximum en juin (8370.40 Wh/m^2), et diminue en décembre (3877.77 Wh/m^2) en raison de l'inclinaison de l'axe de la Terre et de la position du soleil dans le ciel. En été, le soleil est plus haut dans le ciel, ce qui signifie que les rayons solaires frappent la surface de la Terre de manière plus directe. Cela entraîne une intensité de rayonnement solaire plus élevée. Les journées sont plus longues, ce qui permet une plus grande accumulation d'énergie solaire tout au long de la journée. En hiver, le soleil est plus bas dans le ciel, ce qui signifie que les rayons solaires frappent la surface de la Terre à un angle plus oblique. Cela réduit l'intensité du rayonnement solaire. Les journées sont plus courtes, ce qui limite le temps d'exposition au soleil et donc la quantité totale d'énergie solaire reçue. En résumé, la différence entre les courbes de rayonnement solaire horizontal, de point de vue éclairement et irradiation journalière, en été et en hiver est principalement due à l'angle d'incidence des rayons solaires et à la durée d'ensoleillement.

Concernant les surfaces verticales, contrairement à l'orientation Nord, l'orientation Sud reçoit les niveaux d'irradiation les plus élevés en hiver, maximisant ainsi l'efficacité des systèmes photovoltaïques. Les orientations Est et Ouest offrent une répartition équilibrée, avec une irradiation plus élevée le matin à l'Est et l'après-midi à l'Ouest. Par ailleurs, les surfaces inclinées à 32° vers le Sud montrent une meilleure performance tout au long de l'année, notamment pour le mois de mars qui est caractérisé par une inclinaison optimal mensuelle très proche de latitude de Ghardaïa (32°).

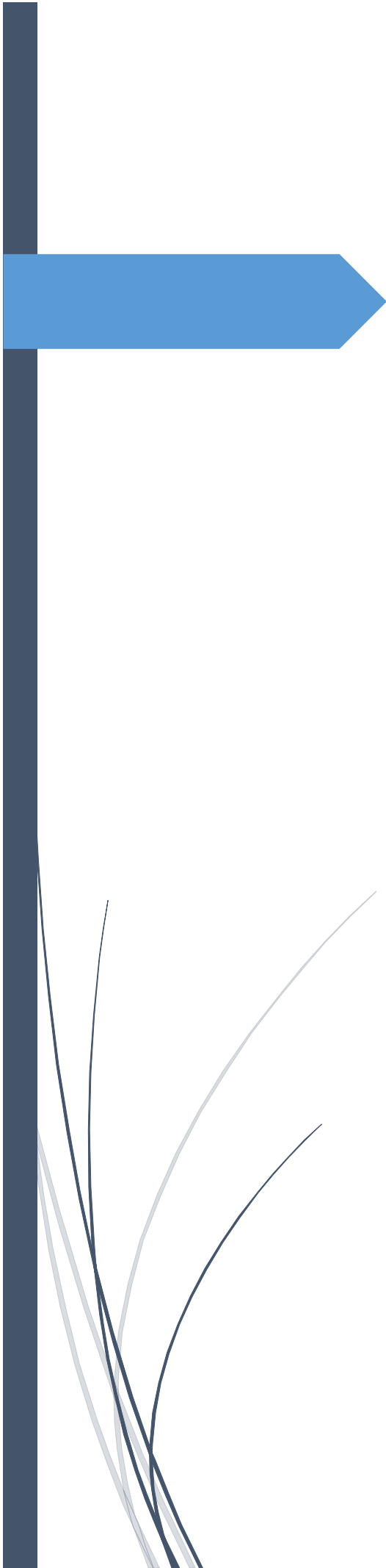
Le rayonnement solaire est donc fondamental pour le fonctionnement des systèmes à énergie solaire. Son intensité sera en fait un facteur clé dans la conception, l'installation et l'exploitation de ces systèmes.

8. Conclusion

Le rayonnement solaire joue un rôle crucial dans le fonctionnement des systèmes photovoltaïques. La production d'électricité par un système photovoltaïque sera influencée par plusieurs facteurs liés au rayonnement solaire :

- Plus l'intensité du rayonnement est élevée, plus la production d'électricité est importante.
- L'angle sous lequel la lumière du soleil frappe les panneaux affecte l'efficacité de la conversion.
Un angle optimal ou proche de l'angle optimal maximisera l'absorption de la lumière.
- Avant d'installer un système photovoltaïque, il est essentiel d'évaluer le potentiel solaire d'un site ou d'une typologie d'intégration. Cela inclut l'analyse de la durée d'ensoleillement et les ombres potentielles qui pourraient affecter la performance des panneaux photovoltaïques.

Bien que l'énergie solaire représente une source d'énergie propre et inépuisable, son exploitation nécessite une analyse rigoureuse et des choix techniques adaptés. Les modèles développés permettent d'améliorer la précision des prévisions et d'optimiser les performances des systèmes solaires.



Chapitre 3 : Mise en œuvre des systèmes photovoltaïques autonomes en fonction des types d'intégration

Chapitre 3

1. Introduction

Les systèmes photovoltaïques autonomes, également appelés systèmes solaires autonomes, sont des installations qui produisent de l'électricité à partir de l'énergie solaire sans être connectées au réseau électrique. Les systèmes photovoltaïques peuvent réduire les coûts à long terme en évitant les dépenses liées à l'extension du réseau électrique ou à l'achat de combustibles fossiles. Ces systèmes permettent aux utilisateurs de produire leur propre électricité, ce qui leur confère une plus grande indépendance énergétique et une résilience face aux fluctuations des prix de l'énergie.

La mise en œuvre de systèmes photovoltaïques autonomes nécessite une attention particulière aux bonnes pratiques, qui varient en fonction des types d'intégration. L'intégration de systèmes photovoltaïques autonomes doit être soigneusement planifiée et exécutée en tenant compte des spécificités de chaque type d'intégration. En suivant ces bonnes pratiques, il est possible d'optimiser la performance, la durabilité et l'acceptabilité des systèmes photovoltaïques.

L'objectif est de se focaliser sur le choix du meilleur type d'intégration qui dépend de divers facteurs, notamment l'emplacement de l'installation en tenant en considération les contraintes architecturales et les objectifs énergétiques. La méthode est basée sur les résultats du chapitre 2 qui traitent l'évaluation de l'ensoleillement, l'orientation et l'ombrage potentiel pour maximiser la production d'énergie.

2. Méthode de dimensionnement

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome nécessite une approche méthodique pour garantir que le système répond aux besoins énergétiques tout en étant efficace et rentable. La principale différence avec un système photovoltaïque connecté au réseau est la présence de batteries. C'est un processus complexe qui nécessite une bonne compréhension des besoins énergétiques, des conditions environnementales et des composants du système. Il se compose principalement des éléments suivants :

- Un générateur photovoltaïque constitué d'une association série / parallèle de modules photovoltaïques
- Un système de régulation (régulateur de charge)
- Un système de conversion DC/AC (onduleur)
- Un système de stockage électrochimique (batteries)

Le schéma général du système photovoltaïque autonome est présenté à la **Figure 3.1**. Il peut varier en fonction des besoins spécifiques et des configurations de chaque installation.

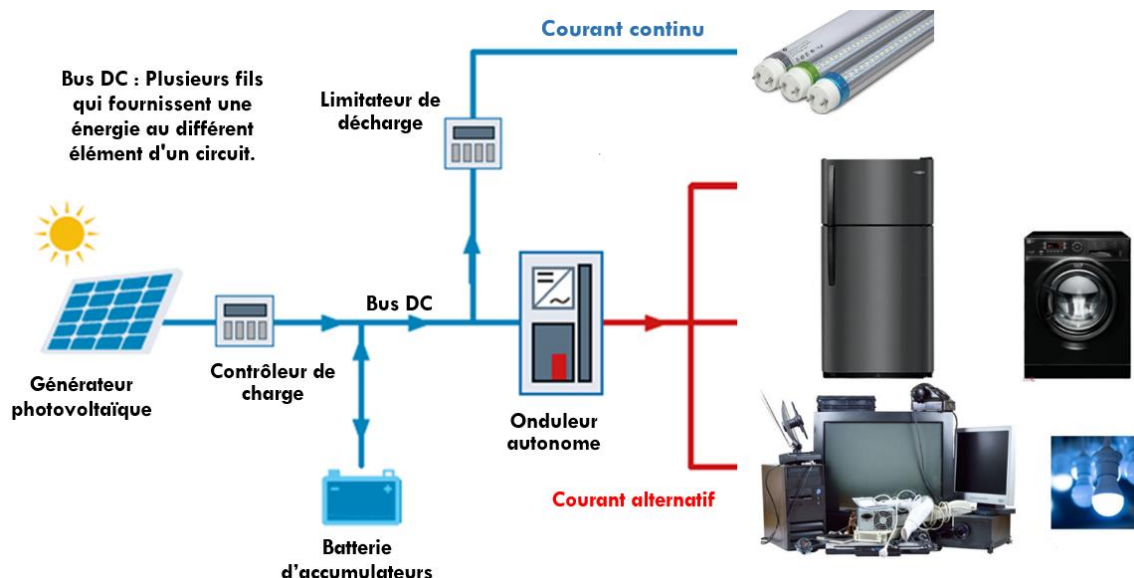


Figure 3.1 : Constitution d'un système photovoltaïque autonome [46]

Les étapes de dimensionnement d'un tel système reposent sur :

2.1. L'évaluation des besoins énergétiques

Nous commençons d'abord par le calcul de la consommation quotidienne après le listing des appareils électriques qui seront alimentés par le système photovoltaïque. Le dimensionnement s'articule sur la détermination la consommation totale quotidienne. L'énergie produite par les panneaux photovoltaïques sera majorée par 30% de l'énergie quotidienne à consommer [46, 51].

2.2. La tension du fonctionnement recommandée $U_{\text{système}}$

Généralement, sa valeur retenue est déterminée en fonction du profil des puissances, c'est-à-dire, la puissance totale instantanée de la charge à alimenter. Elle peut être déterminée aussi en fonction de la valeur de la tension en circuit ouvert V_{oc} . Les systèmes photovoltaïques autonomes peuvent fonctionner à différentes tensions, mais les configurations les plus courantes sont [46, 51]:

C'est une tension standard pour les petits systèmes, la puissance totale est inférieure à 12 V : 1000W.

V_{oc} est comprise entre 19 et 29 V

Cette tension est souvent utilisée pour des systèmes de taille moyenne, la puissance totale 24 V : correspondante est comprise entre 1000 et 2000W

Elle est retenue si la tension V_{oc} est comprise entre 29 et 43V

Utilisée dans les systèmes plus grands, cette tension permet de gérer des charges 48 V : plus élevées et d'améliorer l'efficacité globale du système. Cette valeur est recommandée pour des puissances supérieures à 2000W ou une tension V_{oc} supérieure à 43 V.

Tous les composants du système (panneaux solaires, régulateurs de charge, batteries, onduleur) devront être compatibles avec la tension choisie.

2.3. Le dimensionnement du banc de batteries

La capacité de stockage nécessaire pour stocker l'énergie produite et garantir une autonomie suffisante (généralement 2 à 3 jours d'autonomie) nécessite de prêter attention à la capacité (Ah) des batteries connectées. Elle est calculée par la formule suivante [46, 51] :

$$C_{\text{Stockage}} = \frac{\text{Énergie produite} \times \text{Nombre de jours d'autonomie}}{\text{Profondeur de décharge} \times U_{\text{système}}} \quad (3.1)$$

Pour notre cas, la valeur retenue du nombre de jours d'autonomie est de 3 jours.

Selon cette formule, l'autonomie de fonctionnement du système photovoltaïque dépend principalement des batteries qui sont liées à :

- La tension du fonctionnement recommandée du système
- La consommation d'énergie qui définit la quantité d'énergie consommée par les appareils et les systèmes connectés au système photovoltaïque.
- L'énergie produite par le générateur photovoltaïque qui dépend de l'ensoleillement, l'orientation et l'inclinaison des panneaux et la période de l'année.
- La profondeur de décharge des batteries qui fait référence au pourcentage de la capacité totale de la batterie qui a été utilisée, en d'autres termes, qui a été extraite par rapport à sa capacité totale. Pour cette étude, la valeur retenue est de 0.7, ce qui signifie que 70 % de la capacité de la batterie a été utilisée, ceci implique que 30 % de la capacité reste disponible.
- L'efficacité du système : les pertes d'énergie dans le système, dues à des composants tels que l'onduleur, le régulateur de charge et les câbles, peuvent affecter l'autonomie. Un système bien conçu et optimisé minimisera ces pertes.
- Les variations saisonnières et météorologiques qui peuvent influencer la production d'énergie solaire.
- Type de batterie : les caractéristiques de décharge et de la durée de vie peuvent influencer l'autonomie. Les batteries au plomb-acide, c'est-à-dire, les batteries à électrolyte liquide ou les batteries AGM (Absorbent Glass Mat), ont généralement une durée de vie de 3 à 5 ans, bien que certaines puissent durer jusqu'à 7 ans avec un bon entretien. Cependant, les batteries lithium-ion sont de plus en plus populaires en raison de leur efficacité et de leur durée de vie plus longue. Elles peuvent durer entre 10 et 15 ans, voire plus, selon la qualité et l'utilisation.

Le nombre et la configuration d'un banc de batteries dépend de l'application prévue, la capacité requise, la tension de fonctionnement, et les spécifications des batteries elles-mêmes. Les batteries

peuvent être configurées en série ou en parallèle pour atteindre la tension souhaitée. Par exemple, pour obtenir 48V, il faut utiliser 4 batteries de 12V en série. Les batteries seront connectées en série pour augmenter la tension et en parallèle pour augmenter la capacité (Ah). Par exemple, deux bancs de 12V 100Ah en parallèle donneront 12V 200Ah. Une combinaison des deux, permettant d'augmenter à la fois la tension et la capacité. Par exemple, 4 batteries de 12V 100Ah en série pour obtenir 48V, puis deux de ces séries en parallèle pour obtenir 48V 200Ah.

$$\text{Nombre de batteries} = \frac{C_{\text{Stockage}}(\text{Ah})}{C_{\text{Stockage_batterie}}(\text{Ah})} \quad (3.2)$$

$C_{\text{Stockage_batterie}}$: capacité du stockage d'une seule batterie (Ah)

Le nombre de batteries en série dans une rangée de batteries est calculé par l'équation ci-dessous :

$$\text{Nombre de batteries en série} = \frac{U_{\text{Système}}(\text{V})}{U_{b_{nm}}(\text{V})} \quad (3.3)$$

$U_{b_{nm}}$: la tension nominale de la batterie. Il est à noter que la capacité du stockage des batteries ne s'ajoute pas si ces derniers sont en série.

2.4. Le dimensionnement des panneaux solaires

Les principales étapes et les considérations à prendre en compte lors du dimensionnement se basent premièrement sur le calcul de la puissance crête équivalente de l'installation photovoltaïque, toute entière [46, 51].

$$P_{\text{Crête}} = \frac{1000(Wc) \quad \text{Énergie produite (kWh)}}{I_r \quad (\text{kWh})} \quad (3.4)$$

I_r : coefficient d'irradiation solaire (kWh/m^2) qui fait référence à la quantité d'énergie solaire reçue par unité de surface sur une période donnée. La valeur retenue dans cette étude pour le site de Ghardaïa sera en fonction des types d'intégration.

E_{Produite} : énergie produite (Wh) par le système photovoltaïque. Elle est équivalente à la somme de la charge électrique (l'énergie consommée) et 30% de cette énergie.

$$\text{Nombre de modules photovoltaïques} = \frac{P_{\text{Système Photovoltaïque}}(Wc)}{P_{\text{Crête}} \text{ du module photovoltaïque } (Wc)} \quad (3.5)$$

Le nombre de modules en série dans la rangée est exprimé par la formule ci-dessous :

$$\text{Nombre de modules photovoltaïques en série} = \frac{U_{\text{Système}}(\text{V})}{U_{m_{nm}}(\text{V})} \quad (3.6)$$

$U_{m_{nm}}$: tension nominale du module photovoltaïque

Le nombre de rangées de modules photovoltaïques est calculé par l'équation 3.7 :

$$\text{Nombre de rangées photovoltaïques} = \frac{\text{Nombre de modules photovoltaïques}}{\text{Nombre de modules PVs en série}} \quad (3.7)$$

2.5. Le choix du régulateur

Un régulateur de charge doit gérer le courant maximal généré par les panneaux. En d'autres termes, il doit être sélectionné pour l'adaptation de la puissance des panneaux solaires et à la capacité des batteries. Il est chargé de surveiller et de protéger les batteries. Ses principales fonctions consistent à s'assurer de la bonne gestion et de la qualité de l'exploitation. Il empêche la surcharge et la décharge excessive des batteries, ce qui peut endommager et réduire leur durée de vie. Il maintient aussi les niveaux de tension et de courant dans des limites sûres. Il régule le flux d'énergie provenant des panneaux solaires ou d'autres sources d'énergie vers les batteries, en ajustant la puissance en fonction de l'état de charge des batteries et des conditions environnementales. La capacité du régulateur de charge est déterminée par l'équation 3.8 [46, 51] :

$$\text{Capacité du régulateur de charge} = \frac{P_{\text{Système Photovoltaïque}} (W_c)}{U_{\text{Système}} (V)} \quad (3.8)$$

Les valeurs maximales du courant I_{cc} et de la tension V_{oc} produites par les modules photovoltaïques sont connues pour déterminer la capacité du régulateur de charge [46, 51].

$$I_{cc} = I_{cc - \text{Module PV}} \times \text{Nombre de rangées de modules PVs} \quad (3.9)$$

$$V_{oc} = V_{oc - \text{Module PV}} \times \text{Nombre de modules PVs en série} \quad (3.10)$$

2.6. Le choix de l'onduleur

Certains critères sont à considérer lors de sa sélection. L'onduleur doit être dimensionné en fonction de la puissance totale des panneaux solaires et doit assurer une bonne compatibilité avec les systèmes de stockage. Il doit être muni par des protections intégrées contre les surtensions, les surcharges et les courts-circuits. Si la production d'énergie des panneaux est inférieure à la puissance minimale, l'onduleur ne s'allumera pas et ne pourra pas alimenter le réseau ou les appareils connectés.

Selon la littérature, la puissance de l'onduleur doit être comprise entre 80% et 120% de la puissance crête des panneaux [46, 51].

3. Évaluation des coûts en fonction des types d'intégration

Le coût d'un système photovoltaïque autonome et sa rentabilité économique peuvent être influencés par plusieurs facteurs, plus particulièrement :

- L'énergie requise ou la capacité requise du système photovoltaïque tout entier. Un système plus grand nécessitera plus de panneaux, d'onduleurs et d'autres composants.
- Les conditions climatiques et d'ensoleillement : les performances des panneaux solaires dépendent des conditions climatiques locales. Avec un ensoleillement limité, un système plus grand et plus coûteux sera nécessaire pour satisfaire aux besoins énergétiques.

- La technologie utilisée, la marque et les spécificités techniques des composants.
 - Les panneaux photovoltaïques varient en termes de technologie, ce qui affecte leur coût, leur efficacité et leur durée de vie.
 - De même pour les batteries, la capacité et la technologie peuvent considérablement influencer le coût du système de stockage
 - Le choix de l'onduleur, sa capacité et sa technologie peuvent également impacter le coût.
 - Les autres accessoires et des équipements supplémentaires comme les régulateurs de charge, les systèmes de montage, les câbles et les dispositifs de sécurité s'ajoutent au coût total.
 - Les frais d'installation et la complexité des raccordements peuvent varier en fonction de la complexité de l'installation, de la localisation géographique et des tarifs des installateurs. Des installations sur des toits difficiles d'accès ou des terrains escarpés peuvent coûter plus cher.
- Le coût de l'électricité conventionnelle : si le coût de l'électricité provenant du réseau est élevé, cela rend l'autoproduction d'électricité via un système photovoltaïque plus attrayante économiquement. Les économies réalisées sur les factures d'électricité peuvent compenser rapidement l'investissement initial. Une hausse des tarifs peut rendre un système photovoltaïque plus rentable sur le long terme.
- Investissement initial : le coût d'installation d'un système photovoltaïque peut être élevé, mais il est souvent amorti par les économies réalisées sur les factures d'électricité, surtout si le coût de l'électricité conventionnelle est élevé.
- Durée de vie et entretien : avec une durée de vie acceptable et un coût d'entretien faible. Cela signifie que les économies réalisées sur le long terme peuvent être substantielles.

La méthode déployée dans cette contribution repose sur une approche de sélection combinant l'évaluation du coût des composants et leurs performances techniques. L'objectif principal est d'optimiser le coût global de l'installation en s'appuyant sur un recensement actualisé des prix des principaux éléments du système. Pour ce faire, nous avons analysé une liste de prix, convertis en dinars algériens, de panneaux solaires monocristallins, des régulateurs MPPT, des batteries solaires et des onduleurs. La configuration retenue sera celle qui garantit un équilibre optimal entre performance et coût, en privilégiant la solution la plus économiquement avantageuse.

Dans cette étude, l'irradiation solaire minimale a été retenue afin d'assurer la fiabilité du système tout au long de l'année. L'autonomie de fonctionnement des batteries retenue est de 3 jours. Le taux de pertes est fixé à 0.3. Les tableaux et les courbes tracées donnent des estimations financières relatives au système photovoltaïque en fonction de la charge choisie par le propriétaire. La tension recommandée du système est de 48V. Les calculs ont été achevés en utilisant le logiciel de programmation "Matlab R2023b" qui propose une plateforme de calcul numérique et de

programmation permettant d'analyser des données, développer des algorithmes et créer de nouveaux modèles.

3.1. Montage d'une installation photovoltaïque de types cheminée ou brise soleil, en façade ou en allège

Les panneaux photovoltaïques peuvent être intégrés de manière esthétique dans la façade, utilisant des matériaux qui s'harmonisent avec l'architecture du bâtiment. Un système photovoltaïque autonome intégré dans une façade verticale va être testé pour voir s'il présente une solution durable pour la production d'énergie dans les environnements urbains, alliant efficacité énergétique, esthétique et respect de l'environnement. Un exemple indiquant ce type de pose est représenté par la **Figure 3.2**.



Figure 3.1 : Pose d'un générateur photovoltaïque en façade [52, 53]

3.1.1. Pose du générateur photovoltaïque en façade, de type cheminée ou en allège, cas des orientations Sud, Est et Ouest

Les panneaux solaires en façade, orientés vers le sud, peuvent constituer une bonne alternative lorsque la toiture s'avère inadaptée à la pose ou lorsque l'espace au sol est limité. Pour cette étude, afin d'assurer une fiabilité garantie du système photovoltaïque, tout au long de l'année, nous retenons la valeur minimale du coefficient d'irradiation journalière qui correspond, par définition, à la valeur de l'irradiation journalière calculée par unité de surface. Selon le **Tableau 2.2**, sa valeur est enregistrée le mois de juin, elle s'est arrêtée à 1894.86 Wh/m^2 . Les résultats affichés ont montré aussi que cette valeur est très proche de la valeur minimale de l'irradiation journalière surfacique qui s'élève à 1907.76 Wh/m^2 le mois de décembre pour les orientations verticale Est et verticale Ouest. Les tableaux énumérés ci-après (**Tableaux 3.1-3.9**) et figurant dans cette section apportent de manière détaillée le coût du système photovoltaïque pour une charge quotidienne allant du 0.5 kWh au 6 kWh pour les trois orientations.

Tableau 3.1 : Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de **0.5 kWh**

Système de stockage électrique									
Capacité du stockage	Marque des batteries solaires	Tension nominale & Capacité de la batterie	Nombre de rangées de batteries solaires en parallèle	Nombre de batteries solaires montées en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)				
58.04 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 1.08kWh	12V & 90Ah	1	4	186 707.20				
Panneaux solaires									
Marque des panneaux PV	Puissance Nominale P _{MPP} & Tension nominale	Courant à puissance maximale I _{MPP}	Puissance crête des panneaux PV	Nombre de rangées de panneaux PV en parallèle	Nombre de panneaux PV montés en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)			
VICTRON 90Wc - 12V	90 Wc & 12 V	4.59 A	360 Wc	1	4	77 689.60			
Régulateur solaire MPPT									
Si chaque rangée de batteries en série est connectée à un régulateur solaire			Si le banc de batteries solaires est branché à un seul régulateur solaire			Prix (en dinar algérien)			
Nombre de rangées de batteries en parallèle	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur	Marque et type du régulateur				
1	360 W	7.50 A	360 W	20 A	MPPT BlueSolar VICTRON 100/20 (100V)	23 339.20			
Onduleur solaire									
Puissance	Marque et type de l'onduleur	Puissance de crête	Puissance P et protection recommandée des batteries				Tension et Fréquence de sortie	Plage de la tension d'alimentation	Prix (en dinar algérien)
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	P de sortie à 40°C	P de sortie à 65°C			
288 / 432 W	Phoenix Inverter 48/500 230V VE.Direct SCHUKO Victron (48V / 500VA)	900 Wc	400/350W	/	/	/	210V à 245V 50Hz ou 60 Hz	36.8 à 62 V	39 168.00
Structure porteuse du générateur photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
20% par rapport au coût total des panneaux solaires									15 537.92
Main-d'œuvre et accessoires (câbles, disjoncteurs et fusibles, boîte de jonction, accessoires de mise à la terre, équipements de nettoyage de l'installation photovoltaïque)									Prix (en dinar algérien)
10% par rapport aux coûts des composants solaires									32 690.4
Devis total de l'installation photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
									375 132.32

Tableau 3.2 : Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 1 kWh

Système de stockage électrique									
Capacité du stockage	Marque des batteries solaires	Tension nominale & Capacité de la batterie	Nombre de rangées de batteries solaires en parallèle	Nombre de batteries solaires montées en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)				
116.07 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 1.32kW	12V & 110Ah	1	4	231 756.80				
Panneaux solaires									
Marque des panneaux PV	Puissance Nominale P _{MPP} & Tension nominale	Courant à puissance maximale I _{MPP}	Puissance crête des panneaux PV	Nombre de rangées de panneaux PV en parallèle	Nombre de panneaux PV montés en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)			
Mono series 4b VICTRON	360 Wc & 24 V	9.38 A	720 Wc	1	2	114 572.80			
Régulateur solaire MPPT									
Si chaque rangée de batteries en série est connectée à un régulateur solaire			Si le banc de batteries solaires est branché à un seul régulateur solaire		Marque et type du régulateur	Prix (en dinar algérien)			
Nombre de rangées de batteries en parallèle	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur					
1	720 W	15 A	720 W	20 A	MPPT BlueSolar VICTRON 100/20 (100V)	23 339.20			
Onduleur solaire									
Puissance	Marque et type de l'onduleur	Puissance de crête	Puissance P et protection recommandée des batteries				Tension et Fréquence de sortie	Plage de la tension d'alimentation	Prix (en dinar algérien)
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	40°C	65°C			
576 / 864 W	Phoenix Inverter 48/1200 230V VE.Direct SCHUKO Victron (48V / 1200VA)	2200 W	1000/850W	/	/	/	210V à 245V 50Hz ou 60 Hz	36.8 à 62 V	85 518.40
Structure porteuse du générateur photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
20% par rapport au coût total des panneaux solaires									22 914.56
Main-d'œuvre et accessoires (câbles, disjoncteurs et fusibles, boîte de jonction, accessoires de mise à la terre, équipements de nettoyage de l'installation photovoltaïque)									Prix (en dinar algérien)
10% par rapport aux coûts des composants solaires									45 518.72
Devis total de l'installation photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
									523 620.48

Tableau 3.3 : Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 1.5 kWh

Système de stockage électrique									
Capacité du stockage	Marque des batteries solaires	Tension nominale & Capacité de la batterie	Nombre de rangées de batteries solaires en parallèle	Nombre de batteries solaires montées en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)				
174.11 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 1.98kWh	12V & 165Ah	2	4	349 907.00				
Panneaux solaires									
Marque des panneaux PV	Puissance Nominale P _{MPP} & Tension nominale	Courant à puissance maximale I _{MPP}	Puissance crête des panneaux PV	Nombre de rangées de panneaux PV en parallèle	Nombre de panneaux PV montés en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)			
Mono series 4b VICTRON	360 Wc & 24V	9.38 A	1440 Wc	2	2	229 145.60			
Régulateur solaire MPPT									
Si chaque rangée de batteries en série est connectée à un régulateur solaire			Si le banc de batteries solaires est branché à un seul régulateur solaire		Marque et type du régulateur	Prix (en dinar algérien)			
Nombre de rangées de batteries en parallèle	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur	Puissance requise du régulateur				Courant de charge requis du régulateur		
2	720 W	15 A	1440 W		35 A	VICTRON BlueSolar MPPT 150/35 (150V) 53 857.60			
Onduleur solaire									
Puissance	Marque et type de l'onduleur	Puissance de crête	Puissance P et protection recommandée des batteries				Tension et Fréquence de sortie	Plage de la tension d'alimentation	Prix (en dinar algérien)
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	P de sortie à 40°C	P de sortie à 65°C			
1152 / 1728 W	Phoenix Inverter 48/1600 230V Smart Victron (48V / 1600VA)	3000 W	/	1600 / 1300 W	1200 W	800 W		37.2 - 68 V	134 971.20
Structure porteuse du générateur photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
20% par rapport au coût total des panneaux solaires									45 829.12
Main-d'œuvre et accessoires (câbles, disjoncteurs et fusibles, boîte de jonction, accessoires de mise à la terre, équipements de nettoyage de l'installation photovoltaïque)									Prix (en dinar algérien)
10% par rapport aux coûts des composants solaires									76 788.14
Devis total de l'installation photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
									890 498.66

Tableau 3.4 : Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 2 kWh

Système de stockage électrique									
Capacité du stockage	Marque des batteries solaires	Tension nominale & Capacité de la batterie	Nombre de rangées de batteries solaires en parallèle	Nombre de batteries solaires montées en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)				
232.14 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 2.64kWh	12V & 220Ah	1	4	428 243.20				
Panneaux solaires									
Marque des panneaux PV	Puissance Nominale P _{MPP} & Tension nominale	Courant à puissance maximale I _{MPP}	Puissance crête des panneaux PV	Nombre de rangées de panneaux PV en parallèle	Nombre de panneaux PV montés en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)			
Mono series 4b VICTRON	360 Wc & 24 V	9.38 A	1440 Wc	2	2	229 145.60			
Régulateur solaire MPPT									
Si chaque rangée de batteries en série est connectée à un régulateur solaire			Si le banc de batteries solaires est branché à un seul régulateur solaire		Marque et type du régulateur	Prix (en dinar algérien)			
Nombre de rangées de batteries en parallèle	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur					
1	1440 W	30 A	1440 W	35 A	VICTRON BlueSolar MPPT 150/35 (150V)	53 857.60			
Onduleur solaire									
Puissance	Marque et type de l'onduleur	Puissance de crête	Puissance P et protection recommandée des batteries				Tension et Fréquence de sortie	Plage de la tension d'alimentation	Prix (en dinar algérien)
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	40°C	65°C			
1152 / 1728 W	Phoenix Inverter 48/1600 230V Smart Victron (48V / 1600VA)	3000 VA	/	1600 VA	1200 W	800 W		37.2 - 68 V	134 971.20
Structure porteuse du générateur photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
20% par rapport au coût total des panneaux solaires									45 829.12
Main-d'œuvre et accessoires (câbles, disjoncteurs et fusibles, boîte de jonction, accessoires de mise à la terre, équipements de nettoyage de l'installation photovoltaïque)									Prix (en dinar algérien)
10% par rapport aux coûts des composants solaires									84 621.76
Devis total de l'installation photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
									976 668.48

Tableau 3.5 : Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 3 kWh

Système de stockage électrique									
Capacité du stockage	Marque des batteries solaires	Tension nominale & Capacité de la batterie	Nombre de rangées de batteries solaires en parallèle	Nombre de batteries solaires montées en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)				
348.21 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 1.56kWh	12V & 130Ah	3	4	814 713.60				
Panneaux solaires									
Marque des panneaux PV	Puissance Nominale P _{MPP} & Tension nominale	Courant à puissance maximale I _{MPP}	Puissance crête des panneaux PV	Nombre de rangées de panneaux PV en parallèle	Nombre de panneaux PV montés en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)			
Mono series 4b VICTRON	360 Wc & 24 V	9.38 A	2400 Wc	3	2	343 718.40			
Régulateur solaire MPPT									
Si chaque rangée de batteries en série est connectée à un régulateur solaire			Si le banc de batteries solaires est branché à un seul régulateur solaire		Marque et type du régulateur	Prix (en dinar algérien)			
Nombre de rangées de batteries en parallèle	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur	Puissance requise du régulateur				Courant de charge requis du régulateur		
3	720 W	15 A	2160 W		45 A	VICTRON BlueSolar MPPT 150/45 (150V)) 64 628.80			
Onduleur solaire									
Puissance	Marque et type de l'onduleur	Puissance de crête	Puissance P et protection recommandée des batteries				Tension et Fréquence de sortie	Plage de la tension d'alimentation	Prix (en dinar algérien)
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	40°C	65°C			
1920 / 2880 W	Phoenix Inverter 48/3000 230V Smart Victron (48V / 3000VA)	6000 VA	/	3000 VA	2200 W	1700 W	210 - 245 V 50 Hz ou 60 Hz	37.2 - 68 V	184 584.00
Structure porteuse du générateur photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
20% par rapport au coût total des panneaux solaires									68 743.68
Main-d'œuvre et accessoires (câbles, disjoncteurs et fusibles, boîte de jonction, accessoires de mise à la terre, équipements de nettoyage de l'installation photovoltaïque)									Prix (en dinar algérien)
10% par rapport aux coûts des composants solaires									140 764.48
Devis total de l'installation photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
									1 617 152.96

Tableau 3.6 : Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 3.5 kWh

Système de stockage électrique									
Capacité du stockage	Marque des batteries solaires	Tension nominale & Capacité de la batterie	Nombre de rangées de batteries solaires en parallèle	Nombre de batteries solaires montées en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)				
406.25Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 2.64kWh	12V & 220Ah	2	4	856 486.40				
Panneaux solaires									
Marque des panneaux PV	Puissance Nominale P _{MPP} & Tension nominale	Courant à puissance maximale I _{MPP}	Puissance crête des panneaux PV	Nombre de rangées de panneaux PV en parallèle	Nombre de panneaux PV montés en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)			
Mono series 4b VICTRON	360 Wc & 24 V	9.38 A	2400 Wc	4	2	458 291.20			
Régulateur solaire MPPT									
Si chaque rangée de batteries en série est connectée à un régulateur solaire			Si le banc de batteries solaires est branché à un seul régulateur solaire		Marque et type du régulateur	Prix (en dinar algérien)			
Nombre de rangées de batteries en parallèle	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur					
2	1440 W	30 A	2880 W	60 A	SmartSolar MPPT 150/60-Tr Victron)	85 518.40			
Onduleur solaire									
Puissance	Marque et type de l'onduleur	Puissance de crête	Puissance P et protection recommandée des batteries				Tension et Fréquence de sortie	Plage de la tension d'alimentation	Prix (en dinar algérien)
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	40°C	65°C			
1920 / 2880 W	Phoenix Inverter 48/3000 230V Smart Victron (48V / 3000VA)	6000 VA	/	3000 VA	2200 W	1700 W	210 – 245 V 50 Hz ou 60 Hz	37.2 - 68 V	184 584.00
Structure porteuse du générateur photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
20% par rapport au coût total des panneaux solaires									91 658.24
Main-d'œuvre et accessoires (câbles, disjoncteurs et fusibles, boîte de jonction, accessoires de mise à la terre, équipements de nettoyage de l'installation photovoltaïque)									Prix (en dinar algérien)
10% par rapport aux coûts des composants solaires									158 488.00
Devis total de l'installation photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
									1 835 026.24

Tableau 3.7 : Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 4 kWh

Système de stockage électrique									
Capacité du stockage	Marque des batteries solaires	Tension nominale & Capacité de la batterie	Nombre de rangées de batteries solaires en parallèle	Nombre de batteries solaires montées en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)				
464.28 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 1.98kWh	12V & 165Ah	3	4	1 049 721.60				
Panneaux solaires									
Marque des panneaux PV	Puissance Nominale P_{MPP} & Tension nominale	Courant à puissance maximale I_{MPP}	Puissance crête des panneaux PV	Nombre de rangées de panneaux PV en parallèle	Nombre de panneaux PV montés en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)			
Mono series 4b VICTRON	360 Wc & 24 V	9.38 A	2800 Wc	4	2	458 291.20			
Régulateur solaire MPPT									
Si chaque rangée de batteries en série est connectée à un régulateur solaire			Si le banc de batteries solaires est branché à un seul régulateur solaire		Marque et type du régulateur	Prix (en dinar algérien)			
Nombre de rangées de batteries en parallèle	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur					
3	960 W	20 A	2880 W	60 A	SmartSolar MPPT 150/60-Tr Victron)	85 518.40			
Onduleur solaire									
Puissance	Marque et type de l'onduleur	Puissance de crête	Puissance P et protection recommandée des batteries				Tension et Fréquence de sortie	Plage de la tension d'alimentation	Prix (en dinar algérien)
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	40°C	65°C			
2304 / 3456 W	Phoenix Inverter 48/3000 230V Smart Victron (48V / 3000VA)	6000 VA	/	3000 VA	2200 W	1700 W	210 - 245 V 50 Hz ou 60 Hz	37.2 - 68 V	184 584.00
Structure porteuse du générateur photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
20% par rapport au coût total des panneaux solaires									91 658.24
Main-d'œuvre et accessoires (câbles, disjoncteurs et fusibles, boîte de jonction, accessoires de mise à la terre, équipements de nettoyage de l'installation photovoltaïque)									Prix (en dinar algérien)
10% par rapport aux coûts des composants solaires									177 811.52
Devis total de l'installation photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
									2 047 584.96

Tableau 3.8 : Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 5 kWh

Système de stockage électrique									
Capacité du stockage	Marque des batteries solaires	Tension nominale & Capacité de la batterie	Nombre de rangées de batteries solaires en parallèle	Nombre de batteries solaires montées en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)				
580.35 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 2.64kWh	12V & 220Ah	3	4	1 284 729.60				
Panneaux solaires									
Marque des panneaux PV	Puissance Nominale P _{MPP} & Tension nominale	Courant à puissance maximale I _{MPP}	Puissance crête des panneaux PV	Nombre de rangées de panneaux PV en parallèle	Nombre de panneaux PV montés en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)			
Mono series 4b VICTRON	360 Wc & 24 V	9.38 A	3600 Wc	5	2	572 864.00			
Régulateur solaire MPPT									
Si chaque rangée de batteries en série est connectée à un régulateur solaire			Si le banc de batteries solaires est branché à un seul régulateur solaire		Marque et type du régulateur	Prix (en dinar algérien)			
Nombre de rangées de batteries en parallèle	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur					
3	1200 W	25 A	3600 W	85 A	SmartSolar MPPT 150/85-Tr VE.Can Victron)	127 460.80			
Onduleur solaire									
Puissance	Marque et type de l'onduleur	Puissance de crête	Puissance P et protection recommandée des batteries				Tension et Fréquence de sortie	Plage de la tension d'alimentation	Prix (en dinar algérien)
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	40°C	65°C			
2880 / 4320 W	Phoenix Inverter 48/5000 230V Smart Victron (48V / 5000VA	10000 VA	/	5000 VA	3700 W	2800 W	210 – 245 V 50 Hz ou 60 Hz	37.2 - 68 V	276 630.40
Structure porteuse du générateur photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
20% par rapport au coût total des panneaux solaires									114 572.80
Main-d'œuvre et accessoires (câbles, disjoncteurs et fusibles, boîte de jonction, accessoires de mise à la terre, équipements de nettoyage de l'installation photovoltaïque)									Prix (en dinar algérien)
10% par rapport aux coûts des composants solaires									226 168.48
Devis total de l'installation photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
									2 602 426.00

Tableau 3.9 : Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 6 kWh

Système de stockage électrique									
Capacité du stockage	Marque des batteries solaires	Tension nominale & Capacité de la batterie	Nombre de rangées de batteries solaires en parallèle	Nombre de batteries solaires montées en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)				
696.42 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 1.08kWh	12V & 90Ah	8	4	1 493 657.60				
Panneaux solaires									
Marque des panneaux PV	Puissance Nominale P_{MPP} & Tension nominale	Courant à puissance maximale I_{MPP}	Puissance crête des panneaux PV	Nombre de rangées de panneaux PV en parallèle	Nombre de panneaux PV montés en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)			
Mono series 4b VICTRON	360 Wc & 24 V	9.38 A	4320 Wc	6	2	687 436.80			
Régulateur solaire MPPT									
Si chaque rangée de batteries en série est connectée à un régulateur solaire			Si le banc de batteries solaires est branché à un seul régulateur solaire		Marque et type du régulateur	Prix (en dinar algérien)			
Nombre de rangées de batteries en parallèle	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur					
8	540 W	11.25 A	4320 W	100 A	SmartSolar MPPT 150/100-Tr VE.Can Victron	145 416.00			
Onduleur solaire									
Puissance	Marque et type de l'onduleur	Puissance de crête	Puissance P et protection recommandée des batteries				Tension et Fréquence de sortie	Plage de la tension d'alimentation	Prix (en dinar algérien)
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	40°C	65°C			
3456 / 5184W	Phoenix Inverter 48/5000 230V Smart Victron (48V / 5000VA)	6000 VA	/	5000 VA	3700 W	2800 W	210 – 245 V 50 Hz ou 60 Hz	37.2 - 68 V	276 630.40
Structure porteuse du générateur photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
20% par rapport au coût total des panneaux solaires									137 487.36
Main-d'œuvre et accessoires (câbles, disjoncteurs et fusibles, boîte de jonction, accessoires de mise à la terre, équipements de nettoyage de l'installation photovoltaïque)									Prix (en dinar algérien)
10% par rapport aux coûts des composants solaires									260 314.08
Devis total de l'installation photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
									3 000 942.24

3.1.2. Pose du générateur photovoltaïque en façade, de type cheminée ou en allège, cas d'une orientation Nord

Une orientation Nord capte moins de lumière directe du soleil, notamment pendant les mois d'hiver, ce qui affaiblit fortement leur efficacité et leur production d'énergie tout au long de l'année. Pour cette orientation, il est nécessaire d'ajuster l'inclinaison pour compenser la perte d'ensoleillement.

Selon le **Tableau 2.2**, l'irradiation journalière minimale correspond à une valeur très faible évaluée à 405.96 Wh/m². Les **Tableaux 3.10** et **3.11** indiquent que, pour des faibles quantités d'énergie solaire, la production d'énergie des panneaux photovoltaïques sera inutile et insignifiante. Dans ce cas, les coûts sont plus élevés pour plusieurs raisons. Les faibles intensités du rayonnement solaire ont un impact significatif sur la production d'énergie des systèmes photovoltaïques. Les mauvaises orientations et inclinaisons réduisent sensiblement, en conséquence, leur efficacité. Malgré cette contrainte flagrante, il est possible de monter des installations coûteuses, mais à très faibles charges.

Le coût du système photovoltaïque dans ce cas est considéré comme "flagrant" puisque le coût de l'énergie photovoltaïque produite est incomparable par rapport à d'autres sources d'énergie comme les combustibles fossiles.

L'ensoleillement est très limité, la production d'énergie solaire est insuffisante pour justifier l'investissement. En plus, à une inclinaison verticale, l'orientation nord rend le plan d'incidence ombragé, cela réduit l'efficacité des panneaux solaires.

Pour un projet spécifique, il est recommandé de réaliser une étude de faisabilité par un professionnel qui pourra évaluer les besoins énergétiques, l'ensoleillement local et les coûts associés.

Pour cette situation, le devis total d'une installation photovoltaïque pour des charges de 0.25 kWh est à environ 528 961.28 dinar algérien. En augmentant la capacité du système tout entier par seulement 0.25 kWh, un montant de près de 802 590.40 dinar algérien doit être additionné. Cet engagement est absolument non-intéressant. La faisabilité de ce genre de projet est, sans aucun doute, non justifiée.

Tableau 3.10 : Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 0.25 kWh

Système de stockage électrique									
Capacité du stockage	Marque des batteries solaires	Tension nominale & Capacité de la batterie	Nombre de rangées de batteries solaires en parallèle	Nombre de batteries solaires montées en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)				
29.02 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 1.08kWh	12V & 90Ah	1	4	186 707.20				
Panneaux solaires									
Marque des panneaux PV	Puissance Nominale P _{MPP} & Tension nominale	Courant à puissance maximale I _{MPP}	Puissance crête des panneaux PV	Nombre de rangées de panneaux PV en parallèle	Nombre de panneaux PV montés en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)			
UNISUN 200.24 M	200 Wc & 24 V	5.62 A	200 Wc	2	2	156 800.00			
Régulateur solaire MPPT									
Si chaque rangée de batteries en série est connectée à un régulateur solaire			Si le banc de batteries solaires est branché à un seul régulateur solaire		Marque et type du régulateur	Prix (en dinar algérien)			
Nombre de rangées de batteries en parallèle	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur					
1	800 W	16.67 A	800 W	20 A	MPPT BlueSolar VICTRON 100/20 (100V)	23 339.20			
Onduleur solaire									
Puissance	Marque et type de l'onduleur	Puissance de crête	Puissance P et protection recommandée des batteries				Tension et Fréquence de sortie	Plage de la tension d'alimentation	Prix (en dinar algérien)
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	40°C	65°C			
640 / 960 W	Phoenix Inverter 48/500 230V VE.Direct SCHUKO Victron (48V / 500VA)	2200 Wc	400 / 350 W	/	/	/	210 – 245 V 50 Hz ou 60 Hz	36.8 - 62 V	85 518.40
Structure porteuse du générateur photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
20% par rapport au coût total des panneaux solaires									31 360.00
Main-d'œuvre et accessoires (câbles, disjoncteurs et fusibles, boîte de jonction, accessoires de mise à la terre, équipements de nettoyage de l'installation photovoltaïque)									Prix (en dinar algérien)
10% par rapport aux coûts des composants solaires									45 236.48
Devis total de l'installation photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
									528 961.28

Tableau 3.11 : Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 0.5 kWh

Système de stockage électrique									
Capacité du stockage	Marque des batteries solaires	Tension nominale & Capacité de la batterie	Nombre de rangées de batteries solaires en parallèle	Nombre de batteries solaires montées en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)				
58.03 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 1.08kWh	12V / 90Ah	1	4	186 707.20				
Panneaux solaires									
Marque des panneaux PV	Puissance Nominale P _{MPP} & Tension nominale	Courant à puissance maximale I _{MPP}	Puissance crête des panneaux PV	Nombre de rangées de panneaux PV en parallèle	Nombre de panneaux PV montés en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)			
VICTRON 140W	140 Wc & 12 V	5.62 A	1680 Wc	3	4	299 616.00			
Régulateur solaire MPPT									
Si chaque rangée de batteries en série est connectée à un régulateur solaire			Si le banc de batteries solaires est branché à un seul régulateur solaire		Marque et type du régulateur	Prix (en dinar algérien)			
Nombre de rangées de batteries en parallèle	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur	Puissance requise du régulateur				Courant de charge requis du régulateur		
1	1680 W	35 A	1680 W		35 A	VICTRON BlueSolar MPPT 150/35 (150V) 53 857.60			
Onduleur solaire									
Puissance	Marque et type de l'onduleur	Puissance de crête	Puissance P et protection recommandée des batteries				Tension et Fréquence de sortie	Plage de la tension d'alimentation	Prix (en dinar algérien)
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	40°C	65°C			
1344 / 2016 W	Phoenix Inverter 48/1600 230V Smart Victron (48V / 1600VA)	3000 VA	/	1600 VA	1200 W	800 W	210V à 245V 50Hz ou 60 Hz	37.2 - 68 V	134 971.20
Structure porteuse du générateur photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
20% par rapport au coût total des panneaux solaires									59 923.20
Main-d'œuvre et accessoires (câbles, disjoncteurs et fusibles, boîte de jonction, accessoires de mise à la terre, équipements de nettoyage de l'installation photovoltaïque)									Prix (en dinar algérien)
10% par rapport aux coûts des composants solaires									67 515.20
Devis total de l'installation photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
									802 590.40

3.2. Pose du générateur photovoltaïque sur la toiture d'un bâtiment, une véranda ou au sol, cas de l'orientation Sud inclinée à latitude du lieu 32°

En général, pour maximiser la production d'énergie sur une année entière, l'inclinaison optimale est souvent approximativement égale à la latitude du lieu. Dans ce cas, on se limitera à seulement deux exemples (**Tableaux 3.12** et **3.13**) puisque, selon des études documentées antérieures, la variation du coût total du système photovoltaïque est souvent linéaire par rapport à la charge d'alimentation électrique.

En se référant au **Tableau 2.2**, Ghardaïa bénéficie d'un ensoleillement très important, l'irradiation solaire journalière peut varier entre 5038.64 et 7192.17 Wh/m²/jour en moyenne.

Après avoir examiné les données de l'éclairement solaire, similairement aux cas précédents, nous recommandons toujours de se baser sur l'irradiation journalière mensuelle minimale plutôt que sur l'irradiation moyenne.

En utilisant la valeur minimale (5038.64 Wh/m²), on s'assure que le système sera capable de répondre aux besoins énergétiques dans toutes les situations et à n'importe quel moment, ce qui est crucial pour garantir une fourniture d'énergie fiable.

Investir dans des batteries supplémentaires permet de conserver l'énergie excédentaire produite pendant les périodes de forte irradiation pour l'utiliser pour d'autres applications spécifiques, comme le chauffage de l'eau ou le chauffage de la maison. Le suivi et l'ajustement en utilisant des outils de suivi permettront d'ajuster la stratégie à suivre en fonction des variations saisonnières de l'irradiation.

Tableau 3.12 : Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 3 kWh

Système de stockage électrique									
Capacité du stockage	Marque des batteries solaires	Tension nominale & Capacité de la batterie	Nombre de rangées de batteries solaires en parallèle	Nombre de batteries solaires montées en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)				
348.21 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 1.08kWh	12V / 90Ah	4	4	746 828.80				
Panneaux solaires									
Marque des panneaux PV	Puissance Nominale P_{MPP} & Tension nominale	Courant à puissance maximale I_{MPP}	Puissance crête des panneaux PV	Nombre de rangées de panneaux PV en parallèle	Nombre de panneaux PV montés en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)			
VICTRON 115W	115 Wc & 12 V	6.04 A	920 Wc	2	4	160 844.80			
Régulateur solaire MPPT									
Si chaque rangée de batteries en série est connectée à un régulateur solaire			Si le banc de batteries solaires est branché à un seul régulateur solaire		Marque et type du régulateur	Prix (en dinar algérien)			
Nombre de rangées de batteries en parallèle	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur					
4	230 W	4.79 A	920 W	20 A	MPPT BlueSolar VICTRON 100/20 (100V)	23 339.20			
Onduleur solaire									
Puissance	Marque et type de l'onduleur	Puissance de crête	Puissance P et protection recommandée des batteries				Tension et Fréquence de sortie	Plage de la tension d'alimentation	Prix (en dinar algérien)
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	40°C	65°C			
736 / 1104 W	Phoenix Inverter 48/1600 230V Smart Victron (48V / 1600VA)	3000 VA	/	1600 VA	1200 W	800 W	/	37.2 - 68 V	134 971.20
Structure porteuse du générateur photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
20% par rapport au coût total des panneaux solaires									32 168.96
Main-d'œuvre et accessoires (câbles, disjoncteurs et fusibles, boîte de jonction, accessoires de mise à la terre, équipements de nettoyage de l'installation photovoltaïque)									Prix (en dinar algérien)
10% par rapport aux coûts des composants solaires									106 598.40
Devis total de l'installation photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
									1 204 751.36

Tableau 3.13 : Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 6 kWh

Système de stockage électrique									
Capacité du stockage	Marque des batteries solaires	Tension nominale & Capacité de la batterie	Nombre de rangées de batteries solaires en parallèle	Nombre de batteries solaires montées en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)				
696.43 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 1.08kWh	12V / 90Ah	8	4	1 493 657.60				
Panneaux solaires									
Marque des panneaux PV	Puissance Nominale P _{MPP} & Tension nominale	Courant à puissance maximale I _{MPP}	Puissance crête des panneaux PV	Nombre de rangées de panneaux PV en parallèle	Nombre de panneaux PV montés en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)			
Mono series 4b VICTRON	360 Wc & 24 V	9.38 A	2160 Wc	3	2	343 718.40			
Régulateur solaire MPPT									
Si chaque rangée de batteries en série est connectée à un régulateur solaire			Si le banc de batteries solaires est branché à un seul régulateur solaire		Marque et type du régulateur	Prix (en dinar algérien)			
Nombre de rangées de batteries en parallèle	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur					
8	270 W	5.62 A	2160 W	45 A	VICTRON BlueSolar MPPT 150/45 (150V)	64 628.80			
Onduleur solaire									
Puissance	Marque et type de l'onduleur	Puissance de crête	Puissance P et protection recommandée des batteries				Tension et Fréquence de sortie	Plage de la tension d'alimentation	Prix (en dinar algérien)
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	P de sortie à 40°C	P de sortie à 65°C			
1728 / 2592 W	Phoenix Inverter 48/3000 230V Smart Victron (48V / 3000VA)	6000 VA	/	3000 VA 2400 W	2200 W	1700 W	210 - 245 V 50 Hz ou 60 Hz	37.2 - 68 V	184 584.00
Structure porteuse du générateur photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
20% par rapport au coût total des panneaux solaires									68 743.68
Main-d'œuvre et accessoires (câbles, disjoncteurs et fusibles, boîte de jonction, accessoires de mise à la terre, équipements de nettoyage de l'installation photovoltaïque)									Prix (en dinar algérien)
10% par rapport aux coûts des composants solaires									208 674.848
Devis total de l'installation photovoltaïque									Prix (en dinar algérien)
									2 364 167.01

3.3. Pose du générateur photovoltaïque sur la toiture d'un bâtiment, une véranda ou au sol, cas de l'orientation Sud à inclinaison mensuelle optimale

L'inclinaison optimale mensuelle des panneaux solaires orientés au sud est une autre règle de base. L'adoption des ajustements mensuels sera plus avantageuse par rapport à un ajustement annuel. Pour ce faire, il est recommandé d'utiliser des formules qui prennent en compte la variation de la position du soleil au cours de la journée comme celle de l'équation 2.30. La valeur moyenne de l'inclinaison journalière du mois en question sera retenue pour réaliser ce genre de travaux. En général, pour une installation solaire à Ghardaïa :

- Pour maximiser la production annuelle, une inclinaison de 32° degrés est recommandée.
- Pour maximiser la production en hiver, une inclinaison plus élevée, autour de 46.80° , exactement de 32.70° à 55.05° degrés, peut-être plus efficace.
- Pour optimiser la production en printemps, une inclinaison nettement plus inférieure, autour de 18.17° , de 9.74° à 32.32° degrés, peut-être plus judicieuse.
- Pour maximiser la production en été, une inclinaison plus faible, autour de 9.73° à 31.13° degrés, peut-être préférable avec une valeur tolérée de 17.52° degrés.
- Enfin pour ajuster au maximum la production en automne, une inclinaison plus élevée, à environ 45.97° , plus exactement entre 31.51° à 55.03° degrés, peut-être plus intéressante.

Similairement à l'exemple précédent, nous présentons seulement deux **Tableaux (3.14 et 3.15)** qui présentent, comme il est prouvé auparavant, une variation linéaire du coût total du système photovoltaïque par rapport à la charge d'alimentation électrique. Dans ces conditions, Ghardaïa va bénéficier d'un ensoleillement plus important par rapport au cas précédent. L'irradiation solaire journalière à retenir sera toujours supérieure à $5.7 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$ toute au long de l'année pour que le système puisse être capable de répondre aux besoins énergétiques annuels sans rupture.

La même chose pour cette situation, il sera optionnelle d'investir encore en achetant des batteries supplémentaires qui permettent de stocker l'énergie excédentaire produite pendant les périodes de forte irradiation.

Tableau 3.14 : Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de **3 kWh**

Système de stockage électrique								
Capacité du stockage	Marque des batteries solaires	Tension nominale & Capacité de la batterie	Nombre de rangées de batteries solaires en parallèle	Nombre de batteries solaires montées en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)			
348.21 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 1.08kWh	12V / 90Ah	4	4	746 828.80			
Panneaux solaires								
Marque des panneaux PV	Puissance Nominale P_{MPP} & Tension nominale	Courant à puissance maximale I_{MPP}	Puissance crête des panneaux PV	Nombre de rangées de panneaux PV en parallèle	Nombre de panneaux PV montés en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)		
Mono series 4b VICTRON	360 Wc & 24 V	9.38 A	720 Wc	1	2	114 572.80		
Régulateur solaire MPPT								
Si chaque rangée de batteries en série est connectée à un régulateur solaire			Si le banc de batteries solaires est branché à un seul régulateur solaire		Marque et type du régulateur	Prix (en dinar algérien)		
Nombre de rangées de batteries en parallèle	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur				
4	180 W	3.75 A	720 W	20 A	MPPT BlueSolar VICTRON 100/20 (100V)	23 339.20		
Onduleur solaire								
Puissance	Marque et type de l'onduleur	Puissance de crête	Puissance P et protection recommandée des batteries			Tension et Fréquence de sortie	Plage de la tension d'alimentation	Prix (en dinar algérien)
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	40°C			
576 / 864 W	Phoenix Inverter 48/1200 230V VE.Direct SCHUKO Victron (48V / 1200VA)	2200 W	1000/850W			210V à 245V 50Hz ou 60 Hz	36.8 - 62 V	85 518.40
Structure porteuse du générateur photovoltaïque								Prix (en dinar algérien)
20% par rapport au coût total des panneaux solaires								22 914.56
Main-d'œuvre et accessoires (câbles, disjoncteurs et fusibles, boîte de jonction, accessoires de mise à la terre, équipements de nettoyage de l'installation photovoltaïque)								Prix (en dinar algérien)
10% par rapport aux coûts des composants solaires								97 025.92
Devis total de l'installation photovoltaïque								Prix (en dinar algérien)
								109 0199.68

Tableau 3.15 : Coût prévu d'un système photovoltaïque autonome alimentant une charge électrique quotidienne de 6 kWh

Système de stockage électrique								
Capacité du stockage	Marque des batteries solaires	Tension nominale & Capacité de la batterie	Nombre de rangées de batteries solaires en parallèle	Nombre de batteries solaires montées en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)			
696.43 Ah	Batterie VICTRON étanche Gel 1.08kWh	12V / 90Ah	8	4	1 493 657.60			
Panneaux solaires								
Marque des panneaux PV	Puissance Nominale P _{MPP} & Tension nominale	Courant à puissance maximale I _{MPP}	Puissance crête des panneaux PV	Nombre de rangées de panneaux PV en parallèle	Nombre de panneaux PV montés en série dans une seule rangée	Prix (en dinar algérien)		
Mono series 4b VICTRON	360 Wc & 24 V	9.38 A	2160 Wc	2	2	229 145.60		
Régulateur solaire MPPT								
Si chaque rangée de batteries en série est connectée à un régulateur solaire			Si le banc de batteries solaires est branché à un seul régulateur solaire		Marque et type du régulateur	Prix (en dinar algérien)		
Nombre de rangées de batteries en parallèle	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur	Puissance requise du régulateur	Courant de charge requis du régulateur				
8	180 W	3.75 A	1440 W	35 A	VICTRON BlueSolar MPPT 150/35 (150V)	53 857.60		
Onduleur solaire								
Puissance	Marque et type de l'onduleur	Puissance de crête	Puissance P et protection recommandée des batteries			Tension et Fréquence de sortie	Plage de la tension d'alimentation	Prix (en dinar algérien)
			P continue à 25/40 °C	P de sortie à 25°C	P de sortie à 40°C			
1152 / 1728 W	Phoenix Inverter 48/1600 230V Smart Victron (48V / 1600VA)	3000 VA	1600 VA	1200 W	800 W	/	37.2 - 68 V	134 971.20
Structure porteuse du générateur photovoltaïque								Prix (en dinar algérien)
20% par rapport au coût total des panneaux solaires								45 829.12
Main-d'œuvre et accessoires (câbles, disjoncteurs et fusibles, boîte de jonction, accessoires de mise à la terre, équipements de nettoyage de l'installation photovoltaïque)								Prix (en dinar algérien)
10% par rapport aux coûts des composants solaires								191 163.20
Devis total de l'installation photovoltaïque								Prix (en dinar algérien)
								2 148 624.32

La méthode la plus efficace pour ajuster l'inclinaison mensuelle à Ghardaïa se base sur les données suivantes :

Janvier :	Latitude (32°) + 20° , entre 49.30° et 54.65°
Février :	Latitude (32°) + 13° , entre 40.24° et 49.03°
Mars :	Latitude (32°) + 2° , entre 28.53° et 39.88°
Avril :	Latitude (32°) - 9° , entre 18.25° et 28.16°
Mai :	Latitude (32°) - 18° , entre 11.27° et 17.95°
Juin :	Latitude (32°) - 22° , entre 09.73° et 11.14°
Juillet :	Latitude (32°) - 20° , entre 10.02° et 14.62°
Août :	Latitude (32°) - 13° , entre 14.85° et 23.86°
Septembre :	Latitude (32°) - 3° , entre 24.21° et 34.89°
Octobre :	Latitude (32°) + 9° , entre 35.27° et 45.86°
Novembre :	Latitude (32°) + 18° , entre 46.17° et 53.21°
Décembre :	Latitude (32°) + 22° , entre 53.37° et 55.05°

3.4. Quantification des résultats

3.4.1. Comparaison des tarifs

Généralement, le coût pour ajouter une capacité de 1 kWh photovoltaïque à un système photovoltaïque autonome peut varier en fonction de plusieurs facteurs :

1. Le type de panneaux solaires

Le coût peut varier en fonction de leur efficacité, leur marque et leur technologie (monocristallin, polycristallin, l'amorphe, etc.). Pour notre cas, nous avons retenu les panneaux solaires de type monocristallin qui sont plus chers que les autres types connus, mais qui sont de meilleure qualité et délivrent un meilleur rendement.

2. Le coût du système d'installation

Le devis des installations varie souvent selon la région, le pays, la complexité du système à l'installation et les tarifs des installateurs.

3. Le coût des batteries et d'équipements associés

La même chose, le coût des batteries et d'équipements varie en fonction de la région. La capacité et la durée de vie des batteries, le choix de l'onduleur, les coûts des câbles, des dispositifs de protection (fusibles, disjoncteurs) influencent et peuvent affecter le coût total.

En général, renforcer un système par une capacité de 1 kWh, cela pourrait représenter un coût très variable d'environ 1 000 à 2 500 euros.

Pour le cas de cette étude, le coût relatif à 1 kWh est équivalent à :

- 492 240 dinars algériens en intégrant le système photovoltaïque autonome au vertical Sud, Est ou Ouest,
- 1 205 500 dinars algériens en intégrant le système photovoltaïque autonome au vertical Nord,
- 386 470 dinars algériens en intégrant le système photovoltaïque autonome à une structure inclinée à Latitude du lieu 32° et
- 352 810 dinars algériens en intégrant le système photovoltaïque autonome à une structure d'une inclinaison mensuelle optimale, soit une réduction de 8.71% par rapport au cas d'une structure inclinée à Latitude du lieu 32°

Les courbes de régression linéaire sont représentées dans la **Figure 3.3** suivante.

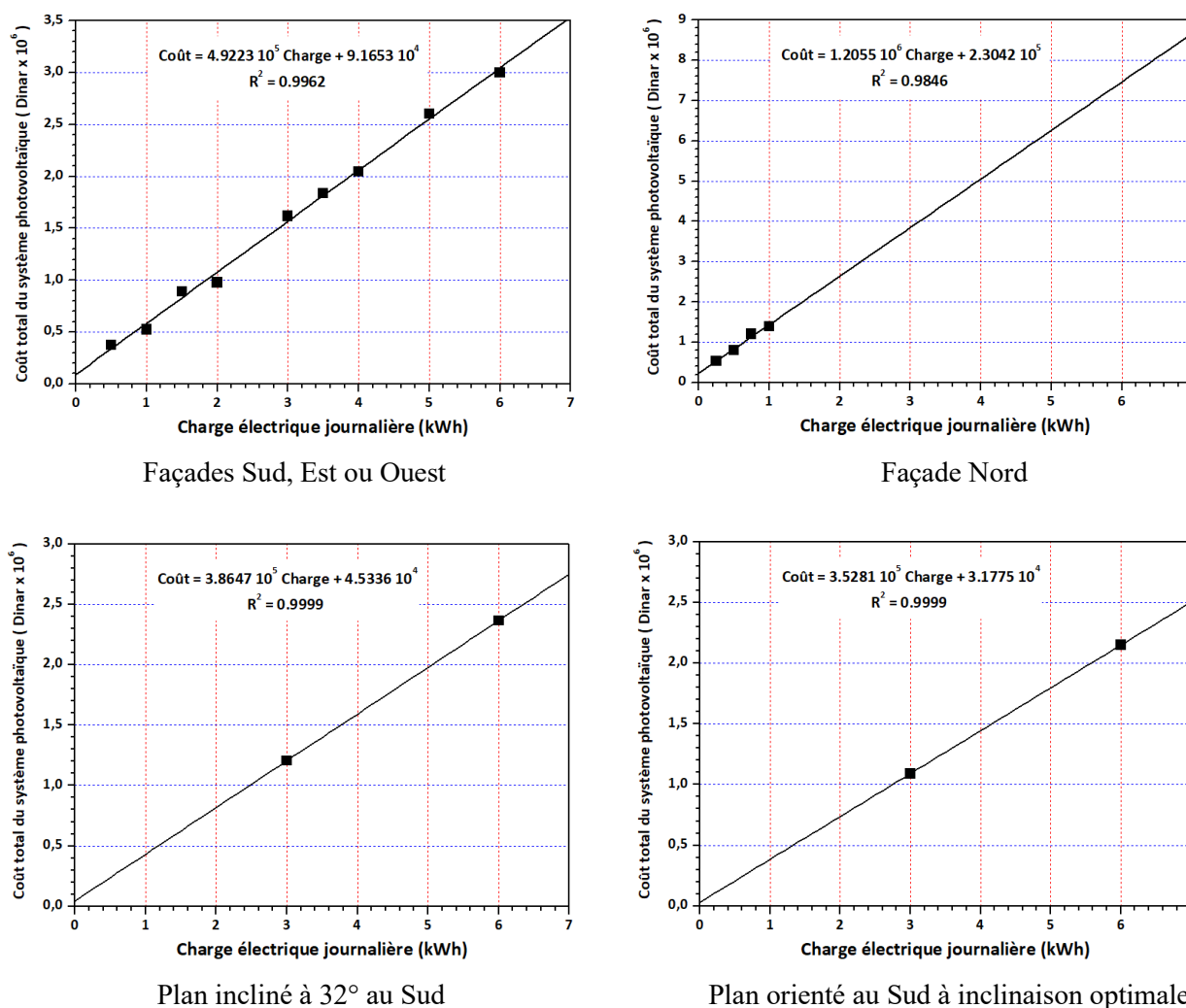


Figure 3.3 : Coût total de l'installation photovoltaïque en fonction de la charge d'alimentation électrique en considérant les différents types d'intégration

La **Figure 3.4** montre, par comparaison, que le coût des systèmes photovoltaïques autonomes dépend, en conséquence, de l'efficacité du générateur photovoltaïque qui peut varier en fonction de l'emplacement (type d'intégration) et de l'intensité du flux solaire journalier.

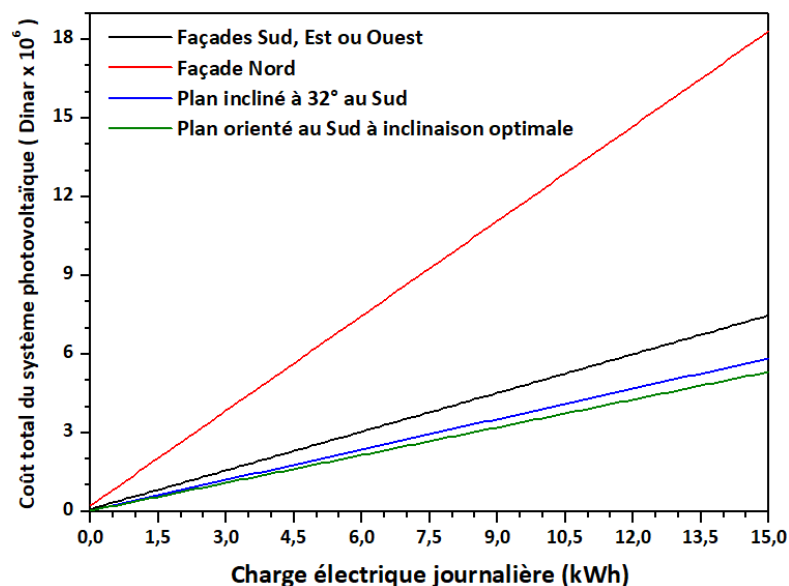


Figure 3.4 : Coût total de l'installation photovoltaïque en fonction de la charge d'alimentation électrique en considérant les différents types d'intégration

Par ailleurs, le gain financier dû à l'intégration d'un générateur photovoltaïque installé sur une structure orientée au Sud à inclinaison optimale par rapport à un générateur photovoltaïque incliné à latitude du lieu 32° est décrit selon la courbe tracée dans la **Figure 3.5**.

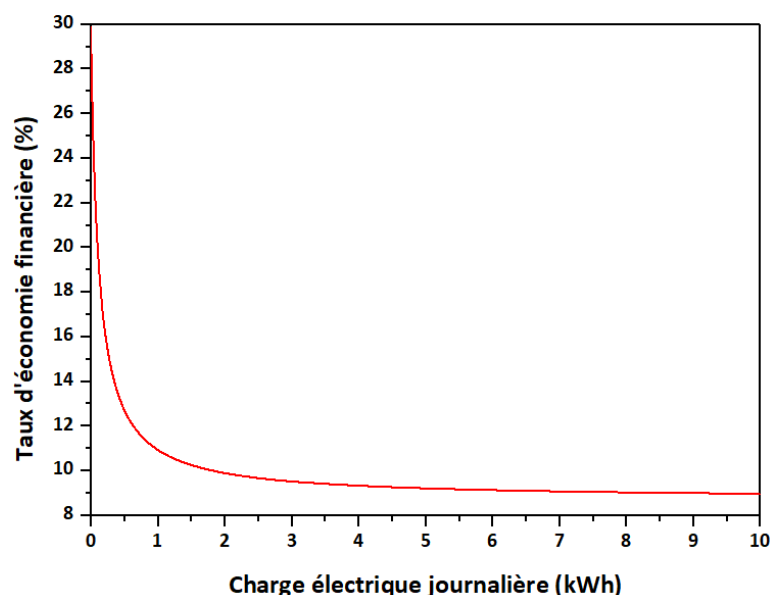


Figure 3.5 : Économie financière due à l'intégration d'un générateur photovoltaïque installé sur une structure orientée au Sud à inclinaison optimale par rapport à un générateur photovoltaïque incliné à latitude du lieu 32°

De même pour le taux d'économie dû à l'intégration d'un système autonome photovoltaïque par rapport à un générateur photovoltaïque installé sur une façade Sud, la **Figure 3.6** montre clairement

l'écart résultant en cas d'un générateur photovoltaïque installé à latitude du lieu 32° et des panneaux orientés au Sud à inclinaison optimale.

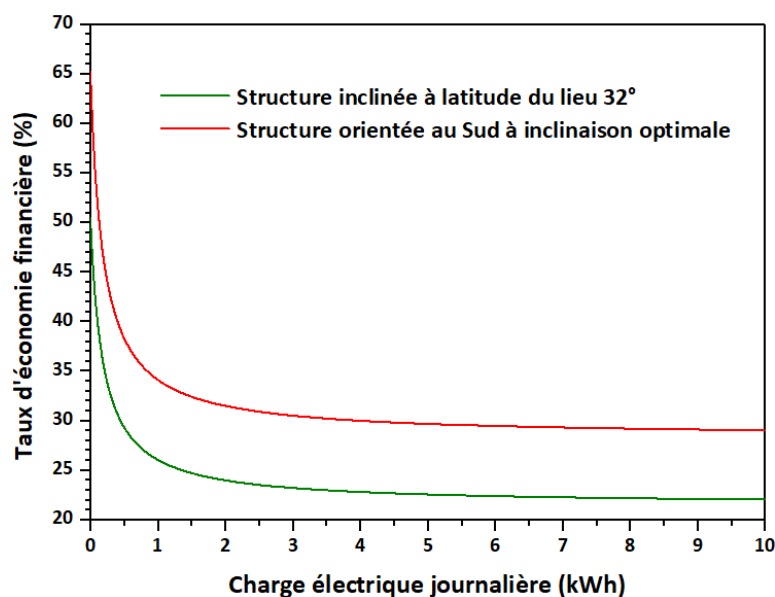


Figure 3.6 : Économie financière due à l'intégration des générateurs photovoltaïques orientés vers le Sud et inclinés à latitude du lieu 32° et des panneaux installés sur une structure orientée au Sud à inclinaison optimale par rapport à un générateur installé sur une façade Sud

Une orientation au Sud avec une inclinaison optimale mensuelle pour un générateur photovoltaïque est considérée comme la plus favorable. Le gain financier est plus important par rapport à un générateur photovoltaïque orienté vers le Sud et incliné à latitude du lieu 32° . Sa valeur diminue à mesure que la charge électrique à alimenter par cette source énergétique augmente. Elle peut atteindre une valeur minimale extrême, estimée à 8.96 %, pour des systèmes de grande capacité (10 kWh). Ce même type d'installation favorise une diminution très considérable par rapport à un système intégré sur une façade Sud. La même chose, la valeur du gain financier diminue à mesure que la charge électrique à alimenter augmente. Elle est arrêtée à 29% pour une capacité de 10 kWh. Cependant, cette valeur correspond à une diminution de 22.02 % pour cette même capacité si les générateurs photovoltaïques sont orientés vers le Sud et inclinés à latitude du lieu 32° .

3.4.2. Étude de rentabilité

Pour calculer la rentabilité d'un système photovoltaïque autonome, il est important de faire le point sur plusieurs concepts :

- Évaluation des coûts initiaux du système photovoltaïque
- Estimation des coûts d'exploitation : la maintenance et le remplacement des batteries puisqu'elles ont une durée de vie limitée
- Calcul des économies réalisées en estimant combien nous pouvons économiser la facture d'électricité annuelle en utilisant l'énergie solaire photovoltaïque

- Estimation de la production d'énergie : le dimensionnement et les calculs de base menés assurent que le système peut alimenter la charge électrique durant la période la plus défavorable, correspondante au mois de décembre. En conséquence, il est apte à assurer une charge d'alimentation plus élevée par rapport à la charge de base (celles qui figurent dans les titres des tableaux estimatifs) issue de l'irradiation journalière la plus faible durant l'année (celle du mois de décembre). Nous nous intéressons donc à la quantité d'énergie produite par le système photovoltaïque chaque année.
- Le calcul du retour sur investissement (ROI) ou le délai de récupération pour obtenir une vision claire de la rentabilité et aider à prendre une décision éclairée sur l'investissement

La production énergétique d'un système photovoltaïque autonome peut être estimée par l'équation suivante [51] :

$$E_{\text{Générateur PV}} = A_{\text{Générateur PV}} \eta_{\text{Panneaux PV}} E_{\text{Soleil}} \quad (3.11)$$

Pour cette étude, nous nous intéressons à la production énergétique moyenne mensuelle du système photovoltaïque pour déduire ensuite la production énergétique annuelle.

$A_{\text{Générateur PV}}$: surface totale des panneaux solaires ou du générateur photovoltaïque (m^2)

E_{Soleil} : l'énergie solaire incidente sur les panneaux photovoltaïques par unité de surface (Wh/m^2)

$\eta_{\text{Panneaux PV}}$: le rendement du générateur photovoltaïque, en pourcentage, exprimé sous forme décimale, c'est la fraction de l'énergie solaire convertie en électricité. Le rendement des panneaux monocristallins se situe généralement entre 15 % et 22 %, bien que certains modèles haut de gamme puissent atteindre des rendements supérieurs à 23 %.

Le **Tableau 3.16** donne les valeurs mesurées de la moyenne mensuelle des irradiances solaires journalières qui représentent l'énergie solaire incidente sur les panneaux photovoltaïques pour deux types d'intégration, un générateur incliné à latitude du lieu (32°) et un générateur à inclinaison mensuelle optimale. Les deux autres colonnes sont consacrées aux valeurs calculées de l'énergie photovoltaïque produite. Nous supposons un système photovoltaïque ayant les caractéristiques suivantes :

Taille du système photovoltaïque	3 kWh
Marque du module	8 modules de type VICTRON 115Wc / 12V pour une inclinaison à 32° 2 modules de type Mono series 4b VICTRON 360Wc / 24V pour une inclinaison mensuelle optimale
Dimensions du module	1030 x 668 x 30 mm^3 pour une inclinaison à 32° 1980 x 1002 x 40 mm^3 pour une inclinaison mensuelle optimale
Surface des panneaux	5.50 m^2 pour une inclinaison à 32°

3.97 m² pour une inclinaison mensuelle optimale

Rendement des panneaux photovoltaïques 0.18

Tableau 3.16 : Irradiations solaires mesurées (réelles) incidentes sur un capteur incliné à latitude du lieu (32°) et à inclinaison optimale mensuelle orienté au Sud et calcul des énergies photovoltaïques produites

Mois	Inclinaison à latitude du lieu (32°)		Inclinaison mensuelle optimale	
	Irradiations mesurées kWh/m ²	Énergie PV produite kWh	Irradiations mesurées kWh/m ²	Énergie PV produite kWh
Janvier	5.4697	5.4150	6.6124	4.7252
Février	6.3782	6.3144	6.6126	4.7254
Mars	6.5284	6.4631	6.5935	4.7117
Avril	6.8383	6.7699	6.9840	4.9908
Mai	6.6669	6.6002	7.2980	5.2152
Juin	6.9357	6.8663	7.7126	5.5114
Juillet	7.0483	6.9778	7.6242	5.4482
Août	7.1922	7.1203	7.3012	5.2174
Septembre	6.4710	6.4063	6.4979	4.6434
Octobre	6.3660	6.3023	6.5069	4.6498
Novembre	5.5411	5.4857	5.9505	4.2522
Décembre	5.0386	4.9882	5.5783	3.9863

Selon les résultats obtenus, l'énergie photovoltaïque produite est nettement plus intéressante dans le premier cas. Elle est de 2302.53 kWh/an contre seulement 1766.81 kWh/an pour le second cas. Ceci se justifie par le fait que la capacité de la production du générateur extraite de deux panneaux photovoltaïques de marque Mono series 4b VICTRON 360Wc / 24V pour le deuxième cas, qui correspond à une inclinaison mensuelle optimale, ne suffit pas pour assurer la mise en marche du système photovoltaïque tout entier d'une capacité de 3 kWh correspondant au cas d'une inclinaison à latitude du lieu (32°). C'est pour cette raison que le coût du système photovoltaïque tout entier correspondant à la deuxième configuration est le plus convenable. D'autant plus, en raison de son fort captage de l'énergie solaire, il nécessite donc moins de panneaux et moins de surfaces qui engendrent donc une énergie plus faible par rapport à la première configuration correspondante à une inclinaison de 32°.

L'étude de la rentabilité financière relative à cette mesure d'efficacité énergétique exige le calcul du temps de retour qui est le temps nécessaire pour récupérer l'investissement initial grâce aux économies réalisées. Il se calcule en divisant le coût de l'investissement par les économies annuelles. Les économies financières se déduisent donc de la consommation initiale d'un ménage par exemple.

La consommation électrique des bâtiments est un sujet crucial dans le contexte de la transition énergétique et de la lutte contre le changement climatique. À cet effet, nous considérons une

habitation qui consomme 4000 kWh par année. Les économies réalisées exigent alors une estimation précise du taux d'intégration du système photovoltaïque dans les bâtiments. Selon le tableau, la valeur de l'énergie économisée est équivalente à l'énergie photovoltaïque produite. Elles montrent que ce système actif offre un potentiel significatif pour améliorer la durabilité et l'efficacité énergétique des constructions modernes. Il présente une économie de 57.56 % dans le cas d'une inclinaison à latitude du lieu (32°) et 44.17% pour une inclinaison mensuelle optimale, sachant que l'objectif initial était d'assurer 3 kWh/jour, soit donc une énergie photovoltaïque produite de 1095 kWh/an, c'est-à-dire un taux d'intégration de seulement 27.37%.

Dans ce même contexte, on suppose que le montant des factures d'électricité issu du réseau restera le même au fil des années. En revanche, le coût d'un système photovoltaïque augmente avec le temps en raison de la durée de vie des batteries solaires qui est limitée. La méthode à déployer consiste à déterminer le point d'intersection de deux courbes qui identifie mathématiquement le délai de récupération. La première courbe indique le montant total de la facture d'électricité cumulée sur une période donnée, et ce, sans aucun investissement. L'équation suivante permet de calculer la facture d'électricité ordinaire, c'est-à-dire avant l'investissement, au cours des années.

$$\begin{aligned} \text{Facture d'électricité cumulée sans système PV} &= \\ \text{Facture d'électricité annuelle sans système PV} \times \text{Temps} \end{aligned} \quad (3.12)$$

La seconde représente la somme de la facture d'électricité cumulée après l'investissement, ainsi que le coût de l'ensemble du système photovoltaïque au cours des années à venir. L'équation suivante permet de calculer le coût total, qui inclut le coût du système photovoltaïque ainsi que la facture d'électricité cumulative des années après l'investissement.

$$\text{Coût total} = \text{Coût système PV} + \text{Facture d'électricité annuelle après l'investissement} \quad (3.13)$$

$$\begin{aligned} \text{Facture d'électricité annuelle après l'investissement} &= \\ \text{Facture d'électricité annuelle après l'investissement} \times \text{Temps} \end{aligned} \quad (3.14)$$

La valeur nulle, soustraite de la différence entre ces deux fonctions, correspond au temps de retour de l'investissement. Si cette différence est croissante et toujours positive au fil des années, cela signifie que le retour sur investissement ne pourra pas être réalisé, ce qui rend l'installation non-rentable. À l'inverse, des valeurs négatives signalent la possibilité d'un retour, et par conséquent, d'un gain financier positif à long terme.

3.4.2.1. Cas d'une inclinaison à latitude du lieu 32°

L'évolution du coût du système photovoltaïque de 3 kWh de capacité, année par année, est représentée dans la **Figure 3.7**.

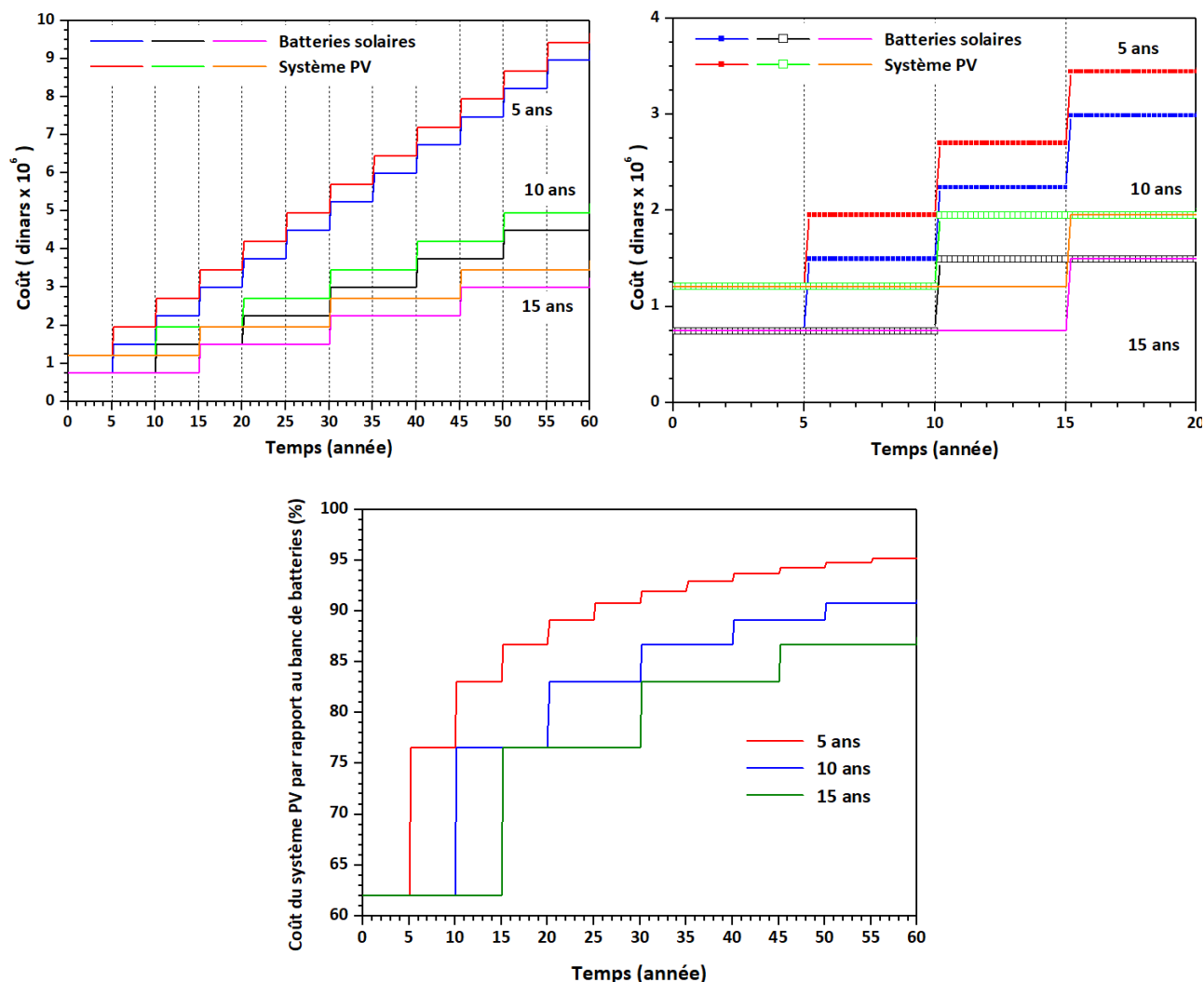


Figure 3.7 : La part du coût des batteries par rapport au système photovoltaïque autonome, cas d'une inclinaison à latitude du lieu 32°

Cette figure montre que le coût des batteries du stockage varie considérablement par rapport au coût d'un système photovoltaïque autonome selon la durée de vie de ces derniers.

La **Figure 3.8** montre l'évolution du coût additionné du système photovoltaïque et sa facture électrique relative comparé à la facture énergétique avant son intégration (sans système photovoltaïque) sur une période de plusieurs années, offrant une vue d'ensemble des tendances et des fluctuations des dépenses au fil du temps. Le coût unitaire de l'énergie issue du réseau conventionnel est supposé 16.5 dinars par kilowattheure.

Les courbes ont montré que l'investissement n'a pas généré de bénéfices ou de gains financiers quelle que soit la durée de vie du banc de batteries. Cela peut être le résultat de divers facteurs, tels que les conditions de marché défavorables (le coût faible du kilowattheure issu du réseau conventionnel). Cela signifie qu'il est nécessaire de réévaluer la stratégie d'investissement ou de prendre des mesures correctives.

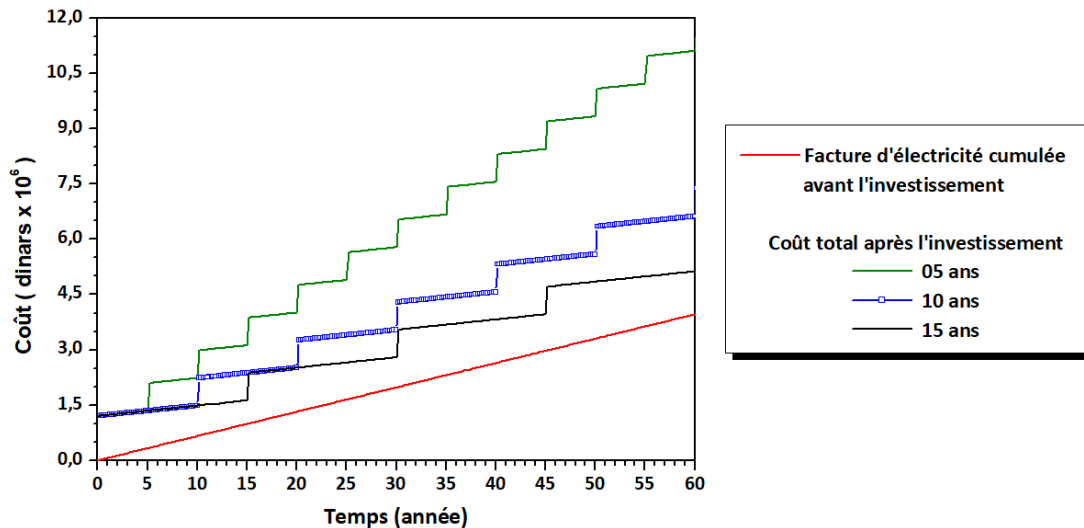


Figure 3.8 : Coût additionné du système photovoltaïque et de sa facture électrique relative comparé à la facture énergétique avant l'investissement qui s'élève à 16.5 dinars par kilowattheure, cas d'une inclinaison à latitude du lieu 32°

Le prix de l'électricité pour les consommateurs en Algérie est relativement très bas par rapport à d'autres pays. Mais le coût unitaire de l'énergie électrique varie largement d'un pays à l'autre et dépend de plusieurs conditions, notamment la source d'énergie utilisée (charbon, gaz, nucléaire), les infrastructures, les politiques gouvernementales, et les conditions du marché. En conséquence, les fluctuations des prix des matières premières, comme le pétrole et le gaz, affectent les coûts de production. Les investissements nécessaires pour le transport et la distribution d'électricité peuvent être élevés. La demande croissante de l'électricité peut exercer une pression sur les prix. En période de forte demande, les prix peuvent augmenter, surtout si l'offre est limitée. Les réglementations environnementales peuvent également imposer des coûts supplémentaires aux producteurs d'énergie. Ces facteurs, combinés, contribuent à la variabilité et à l'élévation des coûts unitaires de l'énergie électrique à l'échelle mondiale.

Selon la carte mondiale du prix de l'électricité par kWh collectés au troisième trimestre 2024 pour les ménages et qui concerne 148 pays, le prix de l'électricité pour ces ménages varie de 0.001 USD par kWh (Zimbabwe) à 0.472 USD par kWh (Bermudes) [54]. Le coût unitaire de l'énergie issue du réseau conventionnel est supposé être de 80 dinars par kilowattheure, ce qui est relativement cher.

La **Figure 3.9** décrit l'évolution du coût additionné du système photovoltaïque et sa facture électrique relative comparé à la facture énergétique avant son intégration sur une période de 60 années. Le comportement du gain financier, défini par la différence entre la valeur de l'investissement ajoutée à la facture électrique engendrée et la facture électrique initiale est donnée par la **Figure 3.10**.

Le délai de récupération financière, ou "payback period" en anglais, est toujours la méthode utilisée pour évaluer la rentabilité de cet investissement. Dans ce cas, le temps nécessaire pour récupérer le montant investi sera considéré plus bénéfique.

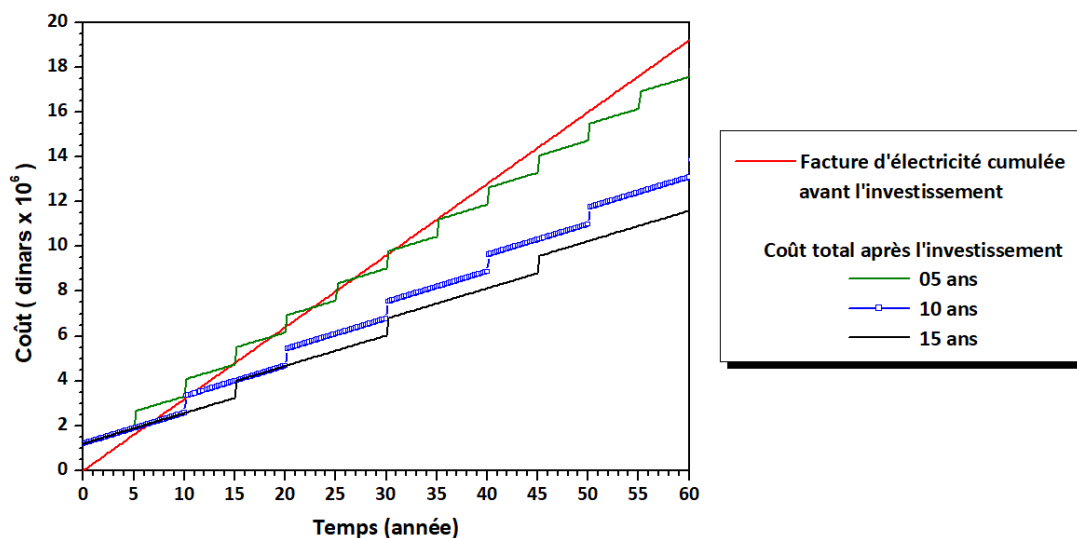


Figure 3.9 : Coût additionné du système photovoltaïque et de sa facture électrique relative comparé à la facture énergétique avant l'investissement qui s'élève à 80 dinars par kilowattheure, cas d'une inclinaison à latitude du lieu 32°

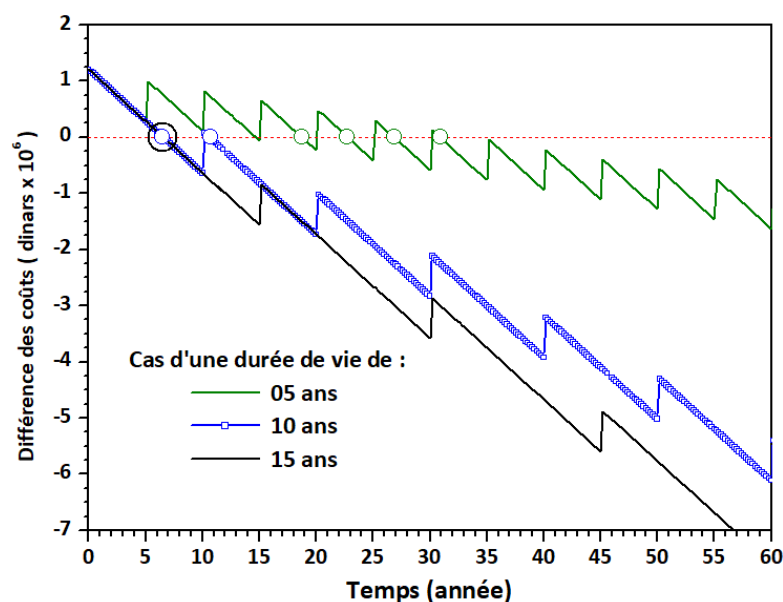


Figure 3.10 : Différence entre les valeurs des coûts, cas des factures d'électricité qui s'élèvent à 80 dinars par kilowattheure, cas d'une inclinaison à latitude du lieu 32°

En économie, généralement pour des objectifs à court terme, un horizon de 5 à 10 ans est considéré pertinent pour un investissement. Pour ce cas, le nombre d'années pour cet investissement financier dépend principalement de la durée de vie des batteries d'accumulateurs. Le délai de récupération financière qui est une mesure utilisée pour évaluer le temps nécessaire pour rattraper un investissement initial. Nous constatons que la récupération des dépenses financières s'obtient qu'après quatre cycles du vie (5 ans par cycle) des batteries. Le premier retour a été obtenu après 18 ans, 8 mois et 12 jours. Cependant, le délai final permettant une récupération financière définitive après 30 ans, 10 mois et 24 jours. Cette durée est estimée à 6 ans et demi pour un banc de batteries renouvelable chaque dix ans, le deuxième et définitif retour est prévu après 10 ans, 8 mois et 12 jours.

En ce qui concerne un banc de batteries renouvelable chaque 15 ans, le délai de la récupération des dépenses financières s'obtient après 6 ans et demi.

3.4.2.2. Cas d'une inclinaison mensuelle optimale

De la même manière que précédemment, la relation entre la durée de vie des batteries et le coût d'un système photovoltaïque autonome est complexe. Elle est influencée principalement par la charge et la durée de vie des batteries. La **Figure 3.11** montre clairement qu'une batterie qui dure plus longtemps réduit le besoin de remplacement fréquent, ce qui peut diminuer les coûts à long terme.

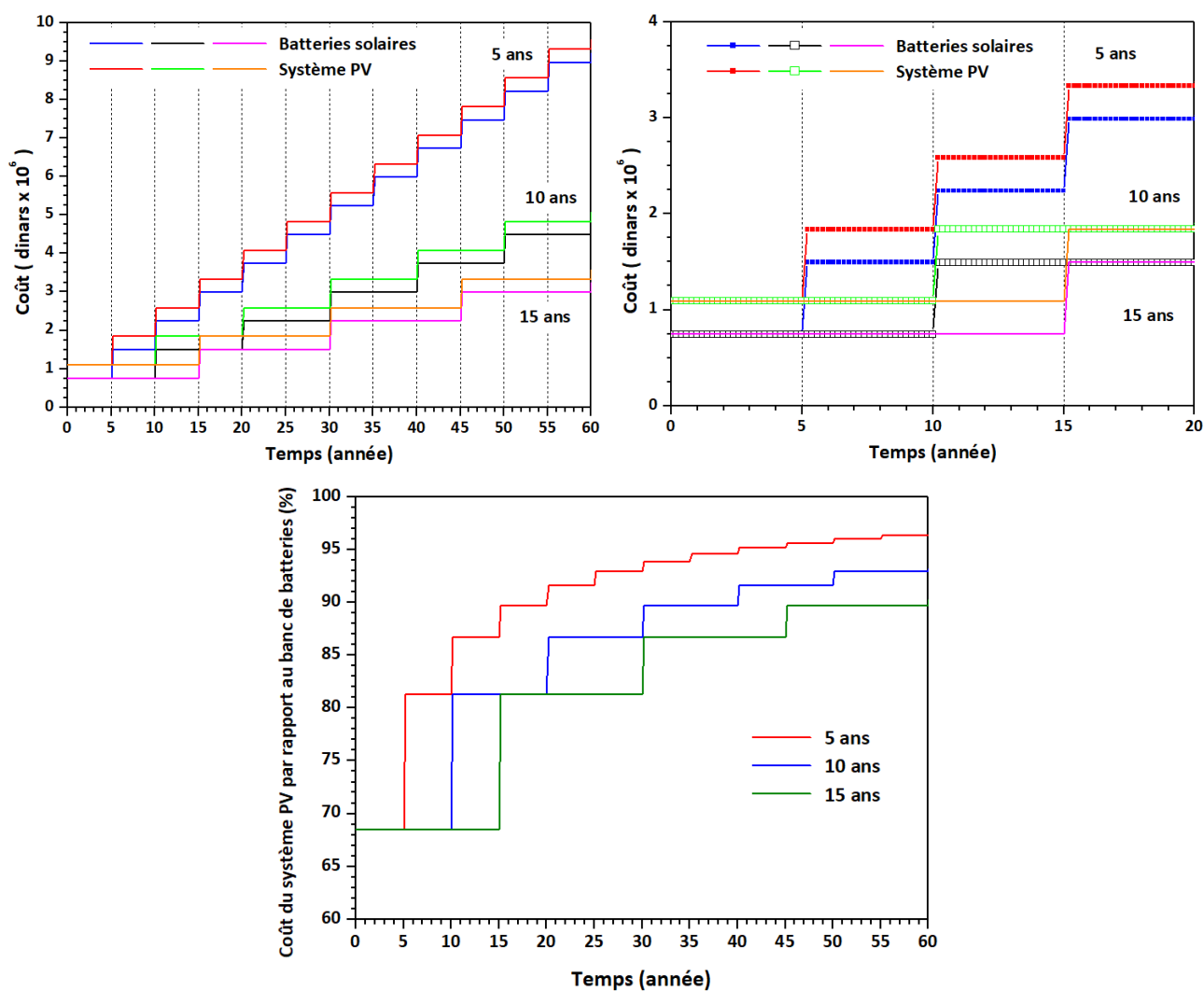


Figure 3.11 : La part du coût des batteries par rapport au système photovoltaïque autonome, cas d'une inclinaison mensuelle optimale

La **Figure 3.12** prouve que l'évaluation du coût additionné d'un système photovoltaïque et sa facture électrique relative sur une période de plusieurs années assure une comparaison avec les économies réalisées sur la facture d'électricité et les charges financière totales. Cette démarche qui correspond dans ce cas un coût de 16.5 dinars par kilowattheure d'électricité conventionnelle donne une idée claire sur la rentabilité de cette action financière.

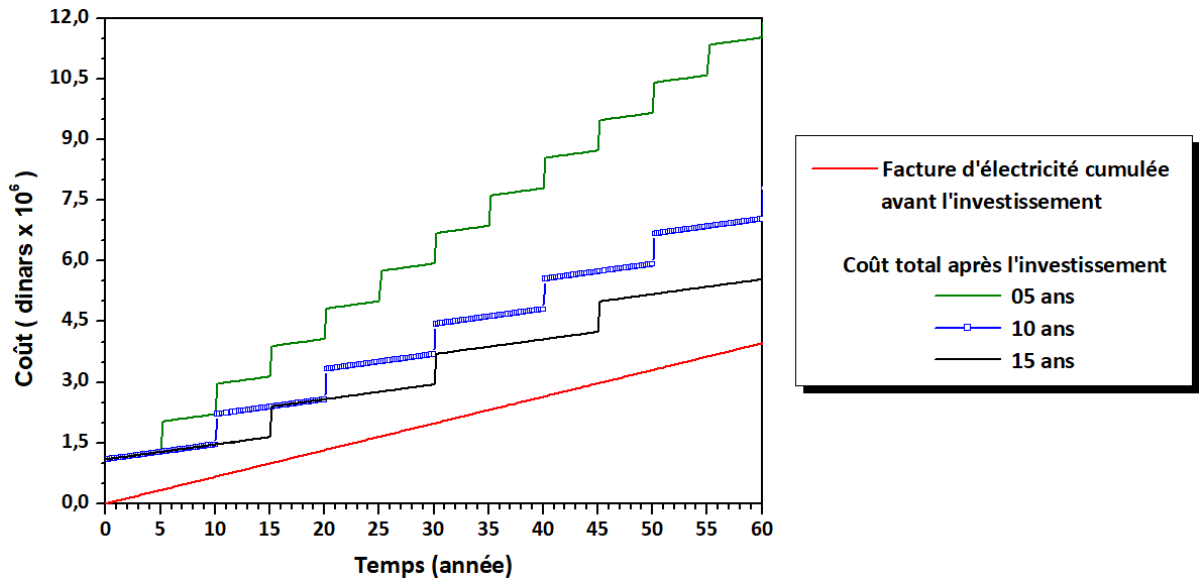


Figure 3.12 : Coût additionné du système photovoltaïque et de sa facture électrique relative comparé à la facture énergétique avant l'investissement qui s'élève à 16.5 dinars par kilowattheure, cas d'une inclinaison mensuelle optimale

La **Figure 3.13** illustre l'évolution du coût total du système photovoltaïque et de la facture électrique associée par rapport à la facture énergétique avant son intégration, sur une période de 60 ans. Le comportement du gain financier, défini par la différence entre la valeur de l'investissement ajoutée à la facture électrique engendrée et la facture électrique initiale, est illustré par la **Figure 3.14**. Le coût de l'énergie du réseau conventionnel est fixé à 80 dinars par kilowattheure.

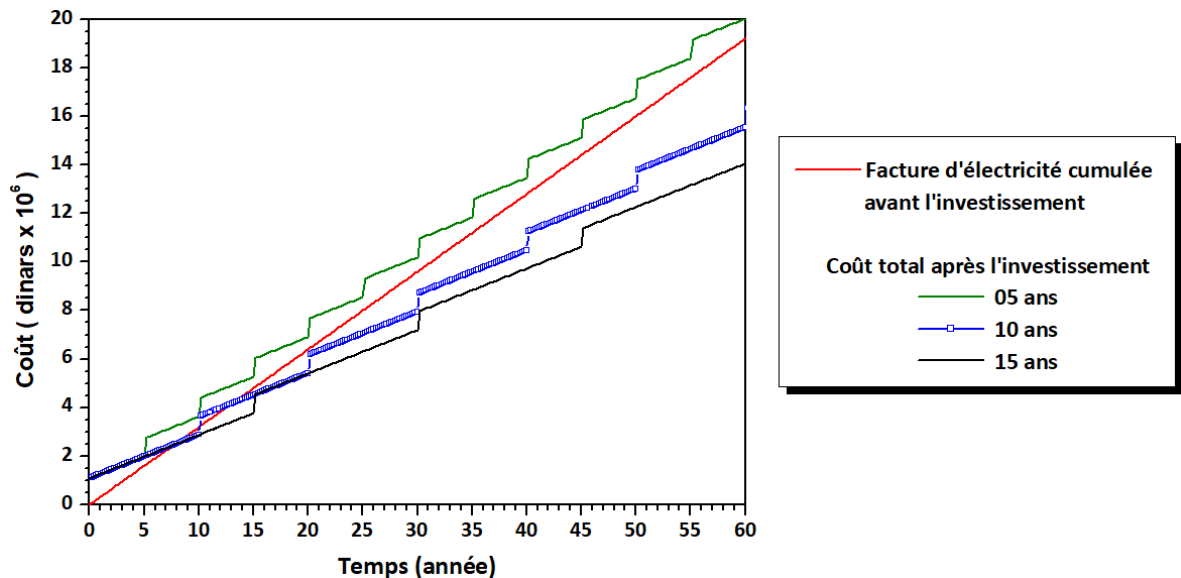


Figure 3.13 : Coût additionné du système photovoltaïque et de sa facture électrique relative comparé à la facture énergétique avant l'investissement qui s'élève à 80 dinars par kilowattheure, cas d'une inclinaison mensuelle optimale

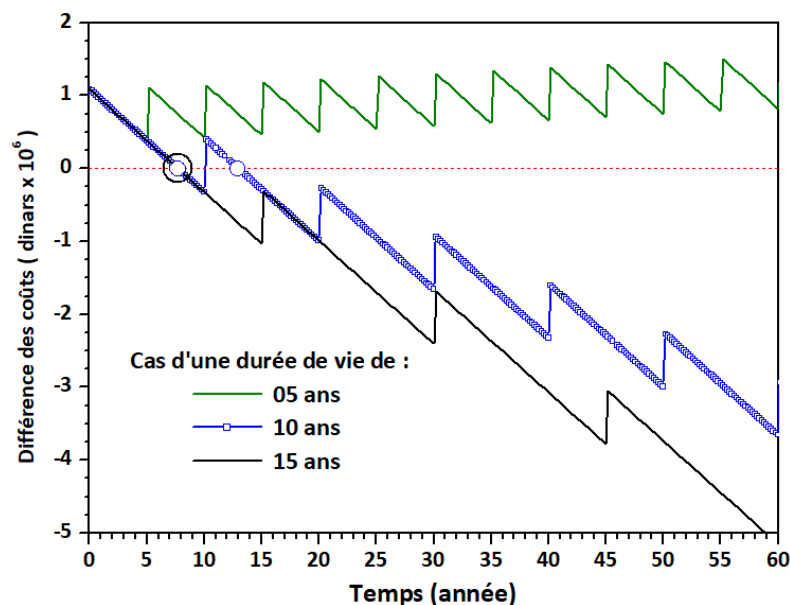


Figure 3.14 : Différence entre les valeurs des coûts, cas des factures d'électricité qui s'élèvent à 80 dinars par kilowattheure, cas d'une inclinaison mensuelle optimale

Les résultats tracés indiquent qu'il n'y a pas une récupération des dépenses financières au cours des années pour des batteries d'une durée de vie de 5 ans. Pour un banc de batteries renouvelable chaque dix ans, le délai de récupération non-définitif est prévu après 7 ans, 8 mois et 12 jours. Ce délai aurait dû être définitif si la durée de vie du banc de batteries est de 15 ans. Le délai de récupération définitif pour un banc de batteries renouvelable chaque dix ans est donc estimé à 12 ans, 10 mois et 24 jours.

3.4.2.3. Comparaison entre les deux types d'intégration

À travers les résultats présentés précédemment, nous avons réussi à déterminer l'influence du prix du kilowattheure électrique du réseau qui ne cesse d'augmenter pour les ménages et l'influence de la durée de vie du système de stockage électrique. Il reste encore l'influence du coût du système photovoltaïque qui varie d'un pays à l'autre. Pour ce faire, nous dressons le **Tableau 3.16** qui synthétise l'ensemble des résultats obtenus (le délai de récupération) en variant chaque fois le coût, la durée de vie et le type d'intégration du générateur photovoltaïque.

Tableau 3.16 : Influence du coût du système PV sur le délai de récupération (initial et définitif) et la rentabilité financière du système photovoltaïque d'une capacité de 3 kWh, le cas où le kilowattheure électrique du réseau est évalué à 80 dinars

Coût du système PV (dinars)			5 ans			10 ans			15 ans		
			Nombre d'années	Nombre de mois	Nombre de jours	Nombre d'années	Nombre de mois	Nombre de jours	Nombre d'années	Nombre de mois	Nombre de jours
Coût estimé	32°	Initial	14	7	24	6	6	14	6	6	14
		Final	30	10	12	10	7	2			
	Opt	Initial	/	/	/	7	8	16	7	8	16
		Final				12	11	29			
Réduit à 10%	32°	Initial	9	6	13	5	10	17	5	10	17
		Final	20	2	5						
	Opt	Initial	44	11	9	6	11	8	6	11	8
		Final	Plus de 80 ans			11	8	11			
Réduit à 20%	32°	Initial	8	5	21	5	2	23	5	2	23
		Final	11	8	19						
	Opt	Initial	14	7	15	6	2	1	6	2	1
		Final	35	9	3	10	4	23			
Réduit à 30%	32°	Initial	4	6	28	4	6	28	4	6	28
		Final	10	3	1						
	Opt	Initial	9	1	5	5	4	24	5	4	24
		Final	16	5	28						
Réduit à 40%	32°	Initial	3	11	3	3	11	3	3	11	3
		Final	6	4	8						
	Opt	Initial	4	7	16	4	7	16	4	7	16
		Final	10	11	19						

Les valeurs obtenues apportent un net avantage à l'inclinaison 32° en raison du gain financier annuel qui représente, dans le cas d'une inclinaison optimale, un bénéfice net généré moins intéressant. Les revenus et les économies de coûts sur une année sont plus intéressants dans le cas d'un générateur photovoltaïque incliné à latitude, bien que le coût total du système photovoltaïque est 10.51% supérieur en le comparant avec le coût total du système photovoltaïque incliné à l'angle optimal mensuel. Le gain financier annuel est donc un élément clé dans le calcul du retour sur investissement ROI. Pour le déterminer, il faut connaître le gain net (c'est-à-dire la facture de l'électricité annuelle avant l'investissement moins la facture de l'électricité annuelle après l'investissement), le coût initial de l'investissement et les charges financières totales. Un retour favorable indique que l'investissement génère un gain financier annuel important par rapport à son coût total. Inversement, un retour défavorable signale que l'investissement ne rapporte pas suffisamment par rapport à son coût.

L'importance de cette analyse mène et conduit à la justification des décisions d'investissement ou de désinvestissement. Comment avoir un système moins cher qui comprends un champ

photovoltaïque pourvu d'un flux solaire plus intense (exprimé en kWh/m²) et qui génère en même temps un gain financier annuel plus favorable, sachant que le taux d'intégration actuel de l'énergie photovoltaïque correspond seulement 1766.81 kWh/an contre 2302.53 kWh/an généré d'un champ photovoltaïque sous l'effet d'un flux solaire nettement moins intense ? La réponse est classique ; il vaut mieux renforcer le champ photovoltaïque par une rangée de panneaux solaires. Pour un système de 3 kWh (l'exemple correspondant au **Tableau 3.14**), cette démarche permet au propriétaire de premièrement doubler l'énergie photovoltaïque produite (1766.81 x 2 kWh/an) en ajoutant deux panneaux de type Mono series 4b VICTRON (360 Wc&24 V). Le coût total de la nouvelle configuration du système photovoltaïque tout entier devient 1 223 562.42 dinars, soit une hausse de 12.23%. Les coûts associés aux panneaux solaires, à la structure porteuse du générateur photovoltaïque et à la main-d'œuvre et accessoires augmentent et deviennent respectivement 22 914.56 dinars, 27 497.47 dinars et 111 232.95 dinars. Le calcul du retour sur investissement pour deux cas différents, en tenant en considération même une subvention potentielle du photovoltaïque donne le **Tableau 3.17** suivant :

Tableau 3.17 : Influence du coût du système PV renforcé sur le délai de récupération (initial et définitif) et la rentabilité financière du système photovoltaïque d'une capacité de 3 kWh, le cas où le kilowattheure électrique du réseau est évalué à 80 dinars

Coût du système PV (dinars)	5 ans			10 ans			15 ans		
	Nombre d'années	Nombre de mois	Nombre de jours	Nombre d'années	Nombre de mois	Nombre de jours	Nombre d'années	Nombre de mois	Nombre de jours
Coût estimé	32° Initial	14	7	24	6	6	14	6	6
	Final	30	10	12	10	7	2	14	14
	Opt Initial	4	3	28	4	3	28	4	3
	renf Final	6	11	19					
Réduit à 40%	32° Initial	3	11	3	3	11	3	11	3
	Final	6	4	8					
	Opt Initial	2	7	5	2	7	5	2	7
	renf Final								

Ces résultats prouvent que cette action menée est très bénéfique pour un propriétaire. Plus un système photovoltaïque produit d'énergie, plus il peut générer d'économies et de revenus, ce qui améliore le retour sur investissement. D'ailleurs, il est plus notable en assurant des incitations fiscales et subventions, elles peuvent améliorer encore le retour sur investissement.

4. Conclusion

La mise en œuvre de systèmes photovoltaïques autonomes nécessite une approche réfléchie et adaptée aux spécificités de chaque projet. En tenant compte des différents types d'intégration et des étapes clé de mise en œuvre, il est possible de créer des solutions durables et efficaces qui répondent

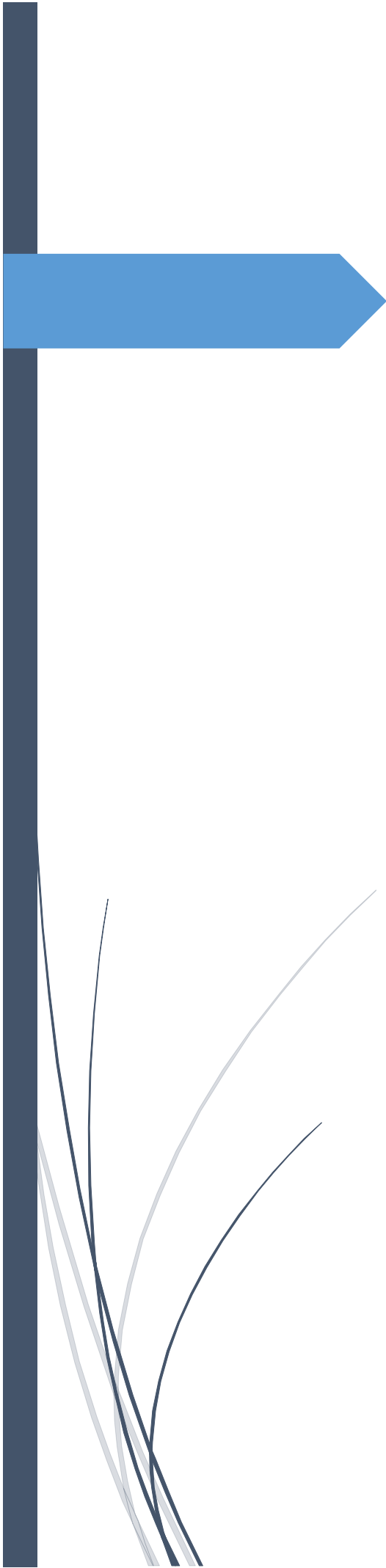
aux besoins énergétiques des utilisateurs, tout en contribuant à la transition énergétique. Pour un projet spécifique, il est recommandé de réaliser une étude de faisabilité par un professionnel qui pourra évaluer les besoins énergétiques, l'ensoleillement local et les coûts associés. Le suivi et l'ajustement en utilisant des outils de suivi permettront d'ajuster la stratégie à suivre en fonction des variations saisonnières de l'irradiation.

Dans notre contexte, le renforcement d'un système photovoltaïque autonome par une capacité de 1 kWh, cela pourrait représenter un coût très variable. Pour le cas de cette étude, le coût relatif à 1 kWh est équivalent à :

- 492 240 dinars algériens en intégrant le système photovoltaïque autonome au vertical Sud, Est ou Ouest,
- 1 205 500 dinars algériens en intégrant le système photovoltaïque autonome au vertical Nord (option non-justifiée),
- 386 470 dinars algériens en intégrant le système photovoltaïque autonome à une structure inclinée à Latitude du lieu 32° et,
- 352 810 dinars algériens en intégrant le système photovoltaïque autonome à une structure d'une inclinaison mensuelle optimale, soit une réduction de 8.71% par rapport au cas d'une structure inclinée à Latitude du lieu 32°

Le prix de l'électricité pour les consommateurs en Algérie est relativement très bas par rapport à d'autres pays. À 16.5 dinars par kilowattheure, l'investissement n'a pas généré de bénéfices ou de gains financiers quelle que soit la durée de vie du banc de batteries. Il est nécessaire, en conséquence, de réévaluer la stratégie des investissements ou de prendre des mesures correctives. Les délais de récupération des dépenses financières affichent des données plus motivantes pour une tarification de 80 dinars par kilowattheure. Des décisions d'investissement ou de désinvestissement devront être toujours proposées. Les actions menées qui s'accompagne peuvent être parfois très bénéfiques pour un propriétaire. Plus un système photovoltaïque produit d'énergie, plus il peut générer d'économies et de revenus, ce qui améliore le retour sur investissement. D'autant plus, il est plus important d'assurer des incitations fiscales et des subventions qui peuvent améliorer concrètement le retour sur investissement et, en même temps, conserver nos ressources énergétiques naturelles de notre pays.

Cette énergie est propre, renouvelable et a un impact environnemental minimal en contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, à diminution de la dépendance aux combustibles fossiles et de promouvoir un développement durable. Elle est souvent associée à des technologies innovantes et à des pratiques de gestion de l'énergie qui favorisent l'efficacité énergétique.



Conclusion générale

Conclusion générale

À l'issue des résultats obtenus, les systèmes photovoltaïques autonomes représentent une solution durable pour la production d'énergie, particulièrement dans des contextes où l'accès au réseau électrique est limité ou inexistant. Ils permettent aux utilisateurs de produire leur propre électricité, réduisant ainsi leur dépendance vis-à-vis des fournisseurs d'énergie et des fluctuations des prix de l'énergie. En exploitant au maximum l'énergie solaire, ces systèmes contribuent à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la lutte contre le changement climatique. Ils favorisent également une utilisation plus responsable des ressources naturelles.

Les avancées technologiques dans le domaine des panneaux solaires, des batteries de stockage et des systèmes de gestion de l'énergie peuvent améliorer l'efficacité et la rentabilité des systèmes photovoltaïques autonomes. Bien que le coût initial des systèmes photovoltaïques autonomes puisse être élevé, les économies réalisées sur le long terme, ainsi que les subventions et incitations gouvernementales, rendent ces systèmes de plus en plus accessibles. De plus, la baisse des prix des technologies solaires contribue à leur adoption croissante.

Malgré cela, le dimensionnement optimal du système tout entier doit prendre en compte les aspects économiques comme le coût initial et les économies potentielles sur les factures d'énergie. Des analyses de rentabilité, comme le retour sur investissement (ROI) ou la période de récupération, sont essentielles pour justifier l'investissement. Une planification minutieuse et une évaluation continue des performances sont essentielles pour garantir le succès à long terme de ces systèmes.

L'inclinaison et l'orientation du générateur photovoltaïque sont deux facteurs cruciaux qui influencent sensiblement l'efficacité de la production d'énergie solaire photovoltaïque. En fonction de la latitude et de la saison, un angle d'inclinaison approprié peut augmenter la quantité d'énergie captée. En général, un angle proche de la latitude du site est souvent recommandé, mais des ajustements peuvent être faits pour maximiser la production en fonction des besoins spécifiques. Un bon choix de l'inclinaison peut faire une différence significative dans le rendement du système.

En général, une inclinaison égale à la latitude du lieu est souvent recommandée pour maximiser la production d'énergie sur l'année. Cela permet de capter un maximum de soleil tout au long de l'année, car l'angle du soleil varie selon les saisons. Alors que l'inclinaison optimale mensuelle consiste à ajuster l'inclinaison des panneaux solaires chaque mois pour maximiser la production d'énergie en fonction de la position du soleil. Cela peut être plus complexe et nécessite un système de suivi, mais elle peut être plus avantageuse et peut potentiellement augmenter la production d'énergie, surtout dans les régions où l'ensoleillement varie considérablement d'un mois à l'autre.

Le coût des batteries représente une part significative du coût total d'un système photovoltaïque autonome, selon la capacité de stockage nécessaire et la durée d'autonomie souhaitée. Un système avec des batteries de longue durée peut offrir un meilleur retour sur investissement, même si le coût initial est plus élevé. Les économies réalisées sur les remplacements de batteries et les coûts d'exploitation peuvent compenser le coût initial sur la durée de vie du système. Si le délai de récupération d'un projet est plus court que celui d'autres opportunités d'investissement similaires, cela peut indiquer que le projet est plus attractif.

En général, un système photovoltaïque autonome peut devenir rentable en 5 à 10 ans, selon le coût d'installation, l'ensoleillement (les zones avec un bon ensoleillement permettent de produire plus d'énergie, ce qui augmente la rentabilité.), le coût de l'électricité (si le coût de l'électricité est élevé, un système photovoltaïque peut devenir rentable plus rapidement), les subventions et les incitations financières (les aides et les subventions peuvent réduire le coût initial et améliorer la rentabilité) et la durée de vie du système par rapport à son coût.

Références

1. U.S. Energy Information Administration, International Energy Outlook with projections to 2050, Page 92-September 24, 2019.
2. F. Hadjrioua, Systèmes photovoltaïques autonomes, applications et recommandations de conception, 54^{ème} édition du Bulletin des Énergies Renouvelables, Centre de Développement des Énergies Renouvelables CDER, Février 2023, Bouzareah Alger, Algérie.
3. B. Michael, in: Solar Electricity Handbook: A simple practical guide to solar energy-designing and installing photovoltaic solar electric systems, 6th Edition, Greenstream Publishing Ltd, 2012, 1-197. ISBN 978-1-907670-18-3, ISBN 978-1-907670-18-1.
4. I. Vechiu, Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome, Thèse de Doctorat en Génie Électrique, Université du Havre, France, décembre 2005.
5. Marion Mary, Mythe vs. Réalité : toute la vérité sur les panneaux solaires, septembre 2023, <https://www.hellowatt.fr/blog/verite-panneaux-solaires/>, site consulté en mai 2025.
6. L.M. Adesina, O. Ogunbiyi, K. Makinde, Design, implementation and performance analysis of an off-grid solar powered system for a Nigerian household, MethodsX 10, 2023, 102247.
7. Y. Ammour, M. Kenouche, Conception et réalisation d'un régulateur de charge par panneaux photovoltaïques, Mémoire de Master en Electronique des Systèmes Embarqués, Université Mohammed Seddik Ben Yahia - Jijel, 2019.
8. B.V. Victron Energy, Contrôleurs de charge PWM, SURTEC, les spécialistes de l'autonomie énergétique, www.victronenergy.com, site consulté en mai 2025.
9. C.A. Osaretin, F.O Edeko, Design and implementation of a solar charge controller with variable output, Journal of Electrical and Electronic Engineering, 12(2), 2015, 40 - 50.
10. H.N. Kadeval, V.K. Patel, Design and development of MPPT solar charge controller for efficiency enhancement in solar PV system, Journal of Electrical Systems 20-3, 2024, 5462-5468.
11. B.V. Victron Energy, Contrôleurs de charge BlueSolar MPPT 100/30 & 100/50, www.victronenergy.com, site consulté en mai 2025.
12. L.M. Adesina, O. Ogunbiyi, M. Mubarak, Web-based software application design for solar PV system sizing, Telkomnika Telecommunication, Computing, Electronics and Control, 19 (6), 2021, 2009-2019.
13. GuidEnR Photovoltaïque, Informations et actualités, les différentes technologies de batterie acide-plomb https://www.photovoltaique.guidenr.fr/informations_techniques/batteries-acide-plomb/technologies-batteries-acide-plomb.php, site consulté en mai 2025.
14. Génie électrique, Aix - Marseille, Utilisation de l'énergie

- https://www.pedagogie.ac-aix-marseille.fr/jcms/c_179593/it/batterie-d-accumulateurs-au-plomb, site consulté en mai 2025.
15. National Renewable Energy Laboratory. Stand-Alone PV Systems: A Handbook of Recommended Design Practices. NREL, 2000.
 16. T. Azieze, A. Lakhlef, Intégration d'un onduleur photovoltaïque au réseau électrique et étude de sa stabilité, Master en Électromécanique, Centre Universitaire Boussouf Abdelhafid, Mila, Algérie, 2024.
 17. M. Boukermouche, B. Fenchouch, Étude et réalisation d'un onduleur solaire contrôlé par une carte DSP, École Nationale Polytechnique ENP, Alger, 2022.
 18. Mon Kit Solaire, Dimensionnement de l'onduleur solaire : une étape incontournable. <https://www.monkitsolaire.fr/blog/dimensionnement-onduleur-solaire>, site consulté en mai 2025.
 19. Ziho, Onduleur solaire MPPT 48V 6000W-140A. <https://fr.ziho-inverter.com/48v-6000w-140a-mppt-solar-inverter.html>, site consulté en mai 2025.
 20. Audace Solaire, L'énergie solaire à portée de main, Fabricant et distributeur de matériel pour l'énergie solaire... <https://audacesolaire.ma/wp-content/uploads/2019/02/CATALOGUE-2023-AUDACE-SOLAIRE.pdf>, site consulté en mai 2025.
 21. R. Kaoulal, Contribution à l'étude des systèmes solaires intégrés aux bâtiments, Thèse de Doctorat en Physique Énergétique, Université Tahri Mohammed, Béchar, Algérie, 2017.
 22. A. Ricaud, Systèmes photovoltaïques, Polytech' Savoie 5^{ème} année, École d'Ingénieurs, 2011.
 23. How to calculate the minimum distance between PV panels? <https://www.maysunsolar.com/blog-how-to-calculate-the-minimum-distance-between-pv-panels/>, site consulté en mai 2025.
 24. A. Agarwal, H. Irtaza, M.J. Ahmad, Numerical analysis of the ground-mounted solar PV panel array mounting systems subjected to basic wind for optimum design, Canadian Journal of Civil Engineering, 48(6), 2020, 656 - 668.
 25. A.B. Awan, M. Alghassab, M. Zubair, A.R. Bhatti, M. Uzair, G. Abbas, Comparative analysis of ground-mounted vs. rooftop photovoltaic systems optimized for interrow distance between parallel arrays, Energies 13, 2020, 3639.
 26. K. Anusuy, K. Vijayakumar, A comparative study of floating and ground-mounted photovoltaic power generation in Indian contexts, Cleaner Energy Systems 9, 2024, 100140.
 27. M.B. Fard, P. Moradian, M. Emarati, M. Ebadi, A.G. Chofreh, J.J. Klemeš, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 169, 2022, 112923.

28. Nora Mittelstadt, David Manske, Daniela Thran, The development of ground-mounted photovoltaic systems next to transport routes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 208 (2025) 114978.
29. C. Grau, Panneau solaire au sol : fonctionnement, prix et réglementation, <https://www.hellowatt.fr/panneaux-solaires-photovoltaiques/panneau-solaire-sol>, site consulté en mai 2025.
30. A. Bonnoure, Tracker Solaire : fonctionnement, avantages, technologies et limites, <https://blog.solorea.com/tracker-solaire>, site consulté en mai 2025.
31. M.O. Okwu, O.P. Eruero, N. Abubakar, B.A. Edward, B.U. Oreko, O.B. Otanocha, O.F. Orikpete, C. Maware, K.C. Ezekiel, C. Ori, L. Tartibu, Single-axis solar tracking systems: a comprehensive design and performance study, *Procedia Computer Science* 253, 2025, 2740 - 2752.
32. A.Z. Hafez, A.M. Yousef, N.M. Harag, Solar tracking systems: technologies and trackers drive types - a review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 91, 2018, 754-782.
33. V.Z. Antonopoulos, D.M. Papamichail, V.G. Aschonitis, A.V. Antonopoulos, Solar radiation estimation methods using ANN and empirical models, *Computers and Electronics in Agriculture* 160, 2019, 160-167.
34. Advanced Remote Sensing, Second Edition, Terrestrial Information Extraction and Applications, Chapter 5 - Solar radiation 2020, 157-191
35. G. Kopp, J. Lean, A new, lower value of total solar irradiance: evidence and climate significance, *Geophysical Research Letters*, 38, 2011, L01706.
36. B. Arseven, S.M. Çınar, A novel hybrid solar radiation forecasting algorithm based on discrete wavelet transform and multivariate machine learning models integrated with clearness index clusters, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 267, 2025, 106417.
37. L. Xingcai, N. Kun, Effectively predict the solar radiation transmittance of dusty photovoltaic panels through Lambert-Beer law, *Renewable Energy* 123, 2018, 634-638.
38. S. Xia, A.M. Mestas-Núñez, H. Xie, R. Vega, An Evaluation of Satellite Estimates of Solar Surface Irradiance Using Ground Observations in San Antonio, Texas, USA, *Remote Sensing*. 9, 2017, 1268.
39. M. Parhamfar, A. Zabihi, Comprehensive design of a 100-kilowatt solar power plant with bifacial technology in PVsyst for Arak, Iran, *Solar Energy Advances* 5, 2025, 100092.
40. R. Kumar, C.S. Rajoria, A. Sharma, S. Suhag, Design and simulation of standalone solar PV system using PVsyst Software: A case study, 46(11), 2021, 5322-5328.
41. L. Zaghba, M. Khennane, S. Mekhilef, A. Fezzani, A. Borni, Experimental outdoor performance assessment and energy efficiency of 11.28 kWp grid tied PV systems with sun tracker installed in saharan climate: A case study in Ghardaia, Algeria, *Solar Energy* 243, 2022, 174-192.

42. M. Baqir, H.K. Channi, Analysis and design of solar PV system using Pvsyst software, *Materialstoday Proceedings* 48(5), 2022, 1332-1338.
43. G. Li, G. Wang, T. Luo, Y. Hu, S. Wu, G. Gong, C. Song, Z. Guo, Z. Liu, SolarSAM: Building-scale photovoltaic potential assessment based on Segment Anything Model (SAM) and remote sensing for emerging city, *Renewable Energy* 237 (2024) 121560.
44. Association Méridienne, Maison de la Mer Daniel Gilard, Quai de la Fosse, 44000 Nantes, <http://www.meridienne.org/atelier/glossaire/vertical/>, site consulté en mai 2025.
45. M. Belhadj, Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome, Magister en Microélectronique Photovoltaïque, Universitaire de Bechar, 2008, Algérie.
46. A. Azzaoui, R.A. Mehaya, Adaptation et rentabilité d'une installation photovoltaïque autonome, Master en Énergie Renouvelable Option Électrotechnique, Université de Ghardaïa, 2024, Algérie.
47. S.M.A. Bekkouche, Modélisation du comportement thermique de quelques dispositifs solaires, Doctorat en Physique Électronique et Modélisation, Université Abou-Bakr Belkaïd de Tlemcen, 2009, Algérie.
48. M. Capderou, Atlas solaire de l'Algérie, Modèles théoriques et expérimentaux, Vol. 1, Office des publications universitaires, EPAU, Algérie, 375, 1987.
49. Wikipédia, L'encyclopédie libre, https://fr.wikipedia.org/wiki/Wilaya_de_Gharda%C3%AFa#cite_note-p2-4, site consulté en mai 2025.
50. Wikipédia, L'encyclopédie libre, https://fr.wikipedia.org/wiki/Classification_de_K%C3%B6ppen, site consulté en mai 2025.
51. A. Bensaha, S.M.A. Bekkouche, M. Hamdani, M.K. Cherier, Integration opportunities, energy and financial profitability of photovoltaic systems in dry and hot climates, *Energy and Built Environment*, article in press. <https://doi.org/10.1016/j.enbenv.2025.01.006>, 2025.
52. BATIRAMA, Les solutions photovoltaïques disponibles pour une pose en façade et en verrière, <https://www.batirama.com/article/57406-les-solutions-photovoltaiques-disponibles-pour-une-pose-en-facade-et-en-verriere.html>, site consulté en mai 2025.
53. NEOZONE, SOLYCO dévoile un système de fixation photovoltaïque qui facilite l'intégration des panneaux solaires de façade, <https://www.neozone.org/innovation/solyco-devoile-un-systeme-de-fixation-photovoltaique-qui-facilite-lintegration-des-panneaux-solaires-de-facade/>, site consulté en mai 2025.
54. Prix de l'électricité, https://fr.globalpetrolprices.com/electricity_prices/, site consulté en mai 2025.

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences
et de la technologie



جامعة غرداية
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم: الآلية والكهروميكانيك

غرداية في 25.5.2025

شعبة:
تخصص:
الآلة والكهروميكانيك

شهادة ترخيص بالتصحيح والاياداع:

انا الاستاذ(ة)
بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج (ليسانس/ماستر/دكتورا) المعنونة ب:

Typologies d'intégration des systèmes photovoltaïques
autonomes, dimensionnement optimal et étude de rentabilité
من انجاز الطالب (الطالبة):

Menad Mohamed Salah Eddine

Benhenia Ahmed Ekerif

التي نوقشت بتاريخ: 2023/06/11

اشهد ان الطالب/الطالبة قد قام/قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة
المناقشة وقد تم التحقق من ذلك من طرفنا
وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة.

مصادقة رئيس القسم
رئيس قسم الآلية والكهروميكانيك
عزوي محمد



امضاء المسؤول عن التصحيح

Benhenia Ahmed Ekerif