



République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued

Faculté de la Technologie

Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Energies Renouvelables

Présenté par :

1. BRAHIM TOUAHRI
2. AYOUB BELMADANI

Intitulé :

**Évaluation des effets de l'intégration des systèmes
photovoltaïques sur le réseau de distribution d'électricité –
Cas de la région d'Ourmas**

Soutenu le : 28/05/2025

Devant le jury composé de :

Dr : CHARAFEDDINE MOKHTARA

Président

Dr : SEIF EDDINE BOUSBIA SALAH

Examineur

Dr : ABDERRAHMANE BENHAMZA

Encadreur

Année académique : 2024/2025

Résumé

Ce travail de fin d'études s'inscrit dans le cadre d'une étude technico-économique portant sur l'intégration d'un système photovoltaïque raccordé au réseau pour l'alimentation d'un dispositif de pompage agricole dans la région de Hadhoudi – Ourmes, située dans la wilaya d'El Oued. Adoptant une approche méthodologique rigoureuse, le mémoire examine le potentiel solaire en Algérie, les technologies photovoltaïques disponibles sur le marché local, ainsi que les configurations optimales répondant aux contraintes climatiques et énergétiques de l'agriculture saharienne.

Bénéficiant d'un ensoleillement annuel exceptionnel, la zone étudiée se prête particulièrement bien à l'exploitation de l'énergie solaire. En s'appuyant sur des données de consommation fournies par SONELGAZ et les retours d'expérience des agriculteurs locaux, un dimensionnement adapté du système a été réalisé pour répondre aux besoins réels en irrigation.

Les simulations démontrent que l'installation photovoltaïque conçue permet de satisfaire l'intégralité des besoins énergétiques agricoles pendant les périodes critiques, tout en injectant un surplus d'énergie dans le réseau électrique national. Cette double fonction assure à la fois une autonomie énergétique et une rentabilité accrue. Par ailleurs, l'analyse économique sur une période de 20 ans (2025–2045) révèle une réduction substantielle des coûts énergétiques, pouvant générer jusqu'à 4 millions dollars d'économies si 3 % des terres non cultivées sont utilisées pour implanter des panneaux solaires. Ces résultats confirment la viabilité et la pertinence de cette solution comme levier stratégique pour une agriculture saharienne durable, résiliente et moins dépendante des énergies fossiles.

المخلص

يتناول هذا المشروع النهائي جزءاً من دراسة تقنية اقتصادية لنظام طاقة شمسية كهروضوئية مربوط بالشبكة الكهربائية، مخصص لتغذية نظام ضخ المياه لأغراض زراعية في منطقة الهدودي – ورماس (ولاية الوادي). ومن خلال منهجية تدريجية، يستعرض هذا البحث القدرات الشمسية في الجزائر، والتقنيات المتاحة في مجال الطاقة الكهروضوئية، إضافة إلى أنسب التكوينات التي تلائم احتياجات الزراعة في المناطق الصحراوية.

تتميز المنطقة المدروسة بمستوى عالٍ من الإشعاع الشمسي، مما يجعل اعتماد الطاقة الشمسية خياراً اقتصادياً مجدياً. استند في عملية التصميم إلى بيانات الاستهلاك المقدمة من شركة سونلغاز، بالإضافة إلى المعلومات الميدانية التي تم جمعها من الفلاحين المحليين، حيث تم تنفيذ عملية تحجيم دقيقة للنظام تلبي فعلياً متطلبات الري في المنطقة.

أظهرت نتائج المحاكاة أن النظام قادر على تغطية كامل الطلب على الطاقة خلال أشهر الذروة الزراعية، إلى جانب إنتاج فائض من الكهرباء يمكن حقنه في شبكة سونلغاز، مما يحقق عوائد مزدوجة: تقنية واقتصادية. علاوة على ذلك، يكشف التحليل الاقتصادي على مدى عشرين عاماً (2025-2045) عن انخفاض كبير في تكاليف الطاقة، مما قد يُحقق وفورات تصل إلى 4 مليون دولارًا أمريكيًا إذا استُخدمت 3% من الأراضي غير المزروعة لت تركيب الألواح الشمسية. وتؤكد هذه النتائج جدوى هذا الحل وأهميته كرافعة استراتيجية للزراعة الصحراوية المستدامة والمرنة، والتي تعتمد بشكل أقل على الوقود الأحفوري.

Dédicace

Nous dédions ce travail à nos familles, pour leur amour, leur patience, et leur soutien indéfectible tout au long de notre parcours universitaire. Leur présence constante a été une source essentielle de motivation et de stabilité.

À nos enseignants et encadrants, pour leur engagement, leur bienveillance et la transmission de leur savoir tout au long de notre formation.

À nos camarades et amis, pour leur entraide précieuse, leurs encouragements et les moments de partage qui ont marqué notre parcours.

Que ce travail soit le fruit d'une synergie entre savoir académique, expertise technique et engagement local, au service du développement durable et de la valorisation des ressources solaires dans notre agriculture saharienne.

Remerciement

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant pour nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Nos remerciements les plus sincères s'adressent à notre encadrant académique, **Dr. Benhamza Abderahmane**, pour sa rigueur scientifique, son accompagnement constant et ses conseils judicieux tout au long de ce projet. Sa disponibilité et son implication ont grandement contribué à la qualité de ce mémoire.

Nous exprimons également notre vive reconnaissance à **Dr. Settou Belkhir** et **Dr. Motktara Charafeddine**, pour leur soutien, leurs orientations techniques et leurs encouragements continus durant les différentes étapes de ce projet. Leur expertise et leur engagement ont été d'un apport précieux.

Nos remerciements vont également aux membres du jury, pour l'intérêt qu'ils portent à ce travail, ainsi que pour leurs remarques et suggestions enrichissantes.

Nous remercions chaleureusement les employés de la direction de SONELGAZ – El Oued, pour leur collaboration et la mise à disposition des données énergétiques nécessaires à cette étude. Leur appui technique a permis de renforcer la dimension appliquée du projet.

Notre reconnaissance va aussi à l'ensemble des agriculteurs de la région de Hadhoudi, qui ont accepté de partager leur expérience, leurs contraintes et leurs pratiques d'irrigation. Leur contribution a été essentielle à la contextualisation de notre étude.

Nous tenons également à remercier tout particulièrement notre département de mécanique, ainsi que la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université d'El Oued, pour la qualité de la formation reçue, les moyens mis à disposition, et l'environnement académique stimulant qui a accompagné notre parcours.

Enfin, nous remercions nos familles pour leur soutien moral et matériel inestimable, ainsi que nos camarades, pour les échanges constructifs et l'esprit de solidarité dont ils ont toujours fait preuve tout au long de notre formation.

Sommaire

Liste des tableaux	i
Liste des figures	ii
Liste des abréviations.....	iii
Introduction générale.....	1
Chapter I	3
I.1 Introduction	4
I.2 Energies Renouvelables :	4
I.2.1 État des lieux de l'intégration des énergies renouvelables en Algérie.....	5
I.2.2 Potentiel solaire en Algérie.....	5
I.3 Rayonnement solaire	7
I.3.1 Les différents types de rayonnement solaire	8
I.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	9
I.5 Les technologies de cellules photovoltaïques	10
I.5.1 Cellules en silicium polycristallin	11
I.5.2 Cellules en silicium monocristallin	11
I.5.3 Cellules en silicium amorphe (couche mince).....	12
I.6 Les Entreprises de Fabrication Photovoltaïque en Algérie	14
I.6.1 Les entreprises publiques du secteur photovoltaïque en Algérie.....	14
I.6.2 Les entreprises privées du secteur photovoltaïque en Algérie.....	15
I.7 Les différentes configurations des systèmes photovoltaïques.....	17
I.7.1 Les systèmes autonomes.....	17
I.7.2 Les systèmes hybrides	18
I.7.3 Système connecté au réseau (Grid-Connected).....	19
I.8 Impact des paramètres électriques et environnementaux sur la courbe I-V d'une cellule photovoltaïque	24
I.8.1 Paramètres externes	25
I.9 Conclusion.....	26
Chapter II Production photovoltaïques et l'Analyse spatiale (Zone Hadhoudi – Ourmes) ..	28
II.1 Introduction.....	29
II.2 Installations Photovoltaïques Connectées au Réseau	29
II.2.1 Types d'Installations Photovoltaïques Connectées au Réseau	29
II.2.2 Eléments constitutifs d'une installation connectée au réseau :	30
II.2.3 Exemples de Centrales Photovoltaïques	30
II.3 Dimensionnement des Composants d'une Installation Photovoltaïque	33

Sommaire

II.3.1 Dimensionnement du Générateur Photovoltaïque.....	33
II.3.2 Dimensionnement des Convertisseurs DC/AC Couplés au Réseau.....	34
II.3.3 Chaîne de Pompage Photovoltaïque.....	35
II.4 Cas d'étude : Zone de Hadhoudi – Ourmes (Wilaya d'El Oued, Algérie) :	43
II.4.1 Méthodologie	44
II.4.2 Situation géographique – Zone agricole de Hadhoudi (commune d'Ourmes).....	45
II.4.3 Création des terrains (zones agricoles) :	46
II.4.4 Étapes de dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïque (PV).....	47
II.5 Conclusion :	56
Chapter III RESULTATS ET DISCUSSION.....	58
III.1 INTRODUCTION	59
III.2 La chaîne de conversion	59
III.2.1 L'onduleur couplé au réseau	60
III.2.2 Le point de livraison	61
III.2.3 Le transformateur de puissance	61
III.2.4 Les compteurs intelligents	62
III.3 Consommation total SONELGAZ (Hadhoudi)	64
III.4 Consommation MAX estimé	64
III.5 Comparaison entre la production et la consommation	69
III.6 Etude Technico-économique	69
III.7 Conclusion :	70
Conclusion Générale	72
Bibliographies	74

Liste des tableaux

Tableau I-1 Répartition du rayonnement solaire global moyen annuel en Algérie [5].	6
Tableau I-2 Rendement, avantages et inconvénients des différents types de cellules photovoltaïques [22]	14
Tableau I-3 Prix des panneaux solaires de Zergoun Green Energy en Algérie (2025) [28].....	16
Tableau II-1 Présentation Générale de la Centrale Photovoltaïque d'El Hadjira [56]	32
Tableau II-2 Caractéristique de l'onduleur SMA Sunny Tripower 25000TL [88]	53
Tableau II-3 Tableau comparatif de pompes [89].....	56
Tableau III-1 données utilisé pour estimer la consommation	65
Tableau III-2 la surface totale d'une seule ferme et de la région Hadhoudi	66
Tableau III-3 nombres des panneaux PV nécessaire pour chaque cas	67

Liste des figures

Figure I-1 Irradiation global Directe en Algérie [6].....	6
Figure I-2 Trajectoire du soleil selon les saisons [8].....	7
Figure I-3 illustre visuellement la composition du rayonnement global [11]l.	8
Figure I-4 Principe de fonctionnement de la cellule PV [8].....	10
Figure I-5 Panneau Polycristallin [18]	11
Figure I-6 Panneau solaire monocristallin [20].....	12
Figure I-7 Panneau solaire amorphe [21].....	12
Figure I-8 Système photovoltaïque autonome [33].....	18
Figure I-9 Schéma descriptif d'un système hybride [36]	19
Figure I-10 Schéma descriptif du système connecté au réseau [38]	20
Figure I-11 Schéma du système photovoltaïque connecté au réseau du CDER [43].....	22
Figure I-12 Système PV connecté au réseau électrique via deux étages d'adaptation (DC-DC et DC-AC) [45]	23
Figure I-13 Structure de conversion multi-string mixte [47]	24
Figure I-14 Influence de l'éclairement E sur le rendement des cellules, T = 25 °C [50].....	25
Figure I-15 Effet de la température sur la caractéristique I-V et P-V [50].....	26
Figure II-1 Programme de l'électrification de 18 Wilayas du sud Algérien par des panneaux solaires photovoltaïques [56].....	31
Figure II-2 Schéma de Connexion Série-Parallèle de Modules Photovoltaïques [62].....	34
Figure II-3 Schéma synoptique du système de Pompage PV [69].....	36
Figure II-4 Chaîne de pompage photovoltaïque [70]	36
Figure II-5 Schéma de la Pompe Centrifuge [73]	37
Figure II-6 Moteurs à courant alternatif (CA) [76].....	38
Figure II-7 Hauteur manométrique totale [77].....	39
Figure II-8 Situation géographique de la Wilaya d'El Oued et la commune Ourmes [80]	46
Figure II-9 Localisation de site d'étude Hadhoudi [87].....	47
Figure II-10 Les étapes du calcul de la taille du champ PV.	48
Figure II-11 Panneau PV Ekhi M10 144 535Wp-555Wp [90]	51
Figure II-12 Onduleur SMA Sunny Tripower 25000TL [91].....	53
Figure III-1 Schéma de la Chain conversion.[95].....	60
Figure III-2 Schéma L'onduleur couple au réseau[79].....	61
Figure III-3 Le Transformateur de puissance	62
Figure III-4 Un compteur intelligent[95]	63
Figure III-5 Consommation mensuel total SONELGAZ (Hadhoudi).....	64
Figure III-6 image de la ferme témoin étudié	65
Figure III-7 Consommation MAX estimé d'une seule ferme	66
Figure III-8 Consommation MAX estimé de la region HADHOUDI	66
Figure III-9 Production PV Estimé d'une seule ferme (1% de l'espace libre).....	67
Figure III-10 image de plusieurs fermes de la région HADHOUDI.....	68
Figure III-11 Production PV Estimé de la région HADHOUDI (1% de l'espace libre).....	68
Figure III-12 comparaison entre la consommation et la production des deux scénarios	69
Figure III-13 comparaison de couts de consommation MAX d'énergie en avec ou sans installations PV.....	70

Liste des abréviations

Ee : Energie électrique.

Ep : énergie produite.

F : Facteur d'oc citation d'espace.

h : Le nombre heures d'irrigation.

HGT : hauteur géométrique.

HMT : Hauteur manométrique totale.

G : Radiation Solaire.

g : l'accélération de la pesanteur.

p: la masse volumique de l'eau.

n: Nombre de pompe.

Ph :la puissance hydraulique.

Pm : Puissance mécanique du moteur.

Pèle : Puissance électrique.

Pd : Puissance électrique demandée.

Pg : Puissance du champ photovoltaïque.

Ps : puissance du module photovoltaïque.

PV : photovoltaïque.

Qh : débit horaire de pompe.

V : débit journalier.

η_p : Le rendement de la pompe.

η_m : Le rendement de moteur.

η_{ond} : rendement d'onduleur.

PV : Photovoltaïque

kWh: Kilowattheure

CO₂ : Dioxyde de carbone

CSP : Concentrated Solar Power (Énergie solaire à concentration)

N : Type N (couche dopée en électrons)

P : Type P (couche dopée en trous)

RD : Rayonnement Direct

Rd : Rayonnement Diffus

Rr : Rayonnement Réfléchi

Introduction générale

Dans un contexte mondial marqué par l'urbanisation rapide, la croissance démographique et l'aggravation des effets du changement climatique, les pays arides comme l'Algérie font face à une pression croissante sur leurs ressources naturelles. Le secteur agricole, pilier essentiel de la sécurité alimentaire et du développement socio-économique, est confronté à deux défis majeurs : la raréfaction des ressources hydriques et la dépendance persistante aux énergies fossiles, notamment pour les opérations de pompage liées à l'irrigation.

Cette situation est particulièrement critique dans les régions sahariennes, où, malgré un potentiel solaire exceptionnel — avec une irradiation annuelle dépassant 2 500 kWh/m² — l'accès à une énergie fiable et durable demeure limité. Cela affecte directement la viabilité des exploitations agricoles, souvent soumises à l'instabilité du réseau électrique et à des coûts de consommation élevés, notamment en heures de pointe. Dans ce contexte, l'énergie photovoltaïque (PV) apparaît comme une alternative stratégique, offrant à la fois une disponibilité locale, une faible empreinte environnementale, et une solution économiquement viable pour le secteur agricole.

Ce mémoire s'inscrit dans une démarche visant à proposer une solution énergétique innovante, adaptée aux contraintes agricoles de la région de Hadhoudi – Ourmes. Il explore comment concevoir un système photovoltaïque connecté au réseau, capable de couvrir durablement les besoins énergétiques liés à l'irrigation agricole, tout en optimisant le rendement économique et énergétique de l'installation. Une attention particulière est portée à l'exploitation du fort potentiel solaire local, à la réduction de la dépendance aux énergies fossiles, ainsi qu'à l'amélioration de la sécurité énergétique des exploitations agricoles. L'approche proposée vise également à assurer un fonctionnement stable du système d'irrigation, tout en permettant l'injection de l'énergie excédentaire produite dans le réseau SONELGAZ, contribuant ainsi à son équilibre et à une meilleure gestion de la production électrique à l'échelle régionale. Le travail s'inscrit donc dans une logique de réponse concrète aux besoins énergétiques des agriculteurs tout en optimisant les performances globales du système envisagé.

Le premier chapitre : consiste à donner une description générale du système photovoltaïque et son principe de fonctionnement ainsi qu'une description des types de rayonnement solaire.

Introduction générale

Le deuxième chapitre : sera consacré à la présentation des techniques de production d'énergie électrique photovoltaïque, l'étude se portera sur le dimensionnement d'une installation photovoltaïque et une compréhension des critères de choix de la pompe adéquate pour le site étudié

Le troisième chapitre : présentera l'analyse et le traitement des cartes précédentes et une étude sur la production d'électricité à partir d'énergie solaire et jusqu'à quel point dans quelle mesure l'injection d'électricité produite par les stations décentralisées dans les terres agricoles peut contribuer au réseau électrique.

Chapter I

Généralités sur l'énergie photovoltaïque

I.1 Introduction

Face à la hausse continue du coût des énergies fossiles, à la volatilité des marchés de l'énergie et à l'épuisement progressif des ressources non renouvelables, l'énergie photovoltaïque s'impose comme l'une des alternatives les plus prometteuses pour répondre durablement aux besoins énergétiques mondiaux. Elle se distingue par son abondance, son caractère non polluant, son accessibilité universelle et sa capacité à générer de l'électricité sans émission de gaz à effet de serre durant son exploitation. Ces caractéristiques en font une technologie de choix dans le cadre des stratégies de transition énergétique, aussi bien dans les pays industrialisés que dans les régions en voie de développement.

L'énergie photovoltaïque repose sur le principe de l'effet photovoltaïque, un phénomène physique par lequel certains matériaux semi-conducteurs, lorsqu'ils sont exposés à la lumière solaire, génèrent un courant électrique. Un système photovoltaïque (PV) permet ainsi de convertir directement le rayonnement solaire en énergie électrique utilisable dans diverses applications, allant de l'alimentation autonome de zones isolées à l'injection dans les réseaux électriques urbains. Le mot "photovoltaïque" est formé de deux éléments : "photo", du grec signifiant "lumière", et "voltaïque", dérivé du nom du physicien italien Alessandro Volta (1745–1827), pionnier de l'étude des phénomènes électriques. Il signifie littéralement "électricité issue de la lumière".

Dans ce chapitre, une attention particulière sera accordée à la caractérisation du rayonnement solaire, aux composants constitutifs d'un système photovoltaïque, ainsi qu'au principe physique de fonctionnement de ces dispositifs. Cette base théorique est essentielle pour comprendre les fondements scientifiques de la conversion photovoltaïque et son intégration dans des solutions énergétiques durables à l'échelle locale et nationale.

I.2 Energies Renouvelables :

Les énergies renouvelables représentent des sources d'énergie issues de phénomènes naturels en constante régénération, telles que le rayonnement solaire, le vent, l'eau en mouvement, la biomasse, les marées ou encore la chaleur interne de la Terre. Leur exploitation permet de produire de l'électricité, de la chaleur ou une force mécanique, tout en minimisant les impacts environnementaux, notamment les émissions de gaz à effet de serre et les déchets polluants [1]. Ces sources d'énergie, disponibles à une échelle géographique quasi universelle, constituent une réponse incontournable aux enjeux de durabilité, de sécurité énergétique et de lutte contre le changement climatique.

Consciente de ces enjeux, l'Algérie a initié depuis 2011 une politique énergétique volontariste, visant à diversifier son mix énergétique en valorisant son important potentiel en énergies renouvelables. Cette stratégie a été révisée en 2015, puis renforcée en 2016 en tant que priorité nationale. Le plan actualisé prévoit l'installation de 22 000 MW de capacité de production d'électricité à partir de sources renouvelables d'ici 2030, avec un accent particulier sur l'énergie solaire photovoltaïque. Ce programme ambitionne également de positionner l'Algérie comme un acteur régional dans l'exportation d'énergie propre, sous réserve de la création d'un marché euro-méditerranéen favorable.

I.2.1 État des lieux de l'intégration des énergies renouvelables en Algérie

Le territoire algérien présente un fort potentiel en matière d'énergies renouvelables, grâce à une diversité géographique et climatique favorable. Le potentiel éolien varie sensiblement entre le nord et le sud du pays, ce dernier bénéficiant de vitesses de vent moyennes supérieures à 7 m/s, notamment dans les régions du Sud-Est, ce qui le rend particulièrement propice à la production d'électricité éolienne [2].

Du point de vue géothermique, l'Algérie recense plus de 200 sources thermales, principalement situées dans la partie nord du pays. Ces ressources, bien que peu exploitées actuellement, représentent une réserve énergétique alternative à fort potentiel. L'hydroélectricité, quant à elle, reste marginale malgré un volume moyen annuel de précipitations estimé à 65 milliards de m³. Seulement 25 milliards de m³ sont considérés comme des ressources hydrauliques renouvelables et techniquement exploitables.

La biomasse constitue également une ressource notable : le potentiel forestier national est évalué à environ 37 millions de tonnes équivalent pétrole (TEP), bien que le taux de valorisation actuel soit inférieur à 10 %. Par ailleurs, le volume des déchets ménagers et assimilés pourrait générer jusqu'à 1,33 million de TEP par an selon les données de l'Agence Nationale des Déchets [3].

I.2.2 Potentiel solaire en Algérie

Parmi toutes les sources renouvelables, l'énergie solaire représente le pilier central de la stratégie énergétique de l'Algérie. Grâce à sa situation géographique privilégiée, le pays dispose de l'un des taux d'ensoleillement les plus élevés au monde, en particulier dans les régions sahariennes. Le sud algérien bénéficie en effet de plus de 3 500 heures d'ensoleillement par an, couvrant environ 86 % de la superficie du pays. Le rayonnement solaire global y atteint jusqu'à 2 650 kWh/m²/an, des

niveaux particulièrement favorables à la production d'électricité photovoltaïque ou thermodynamique [4].

Ce potentiel considérable permet d'envisager l'implantation à grande échelle de centrales solaires, tant pour la consommation domestique que pour l'exportation, à condition que les ressources soient mobilisées de manière rationnelle et soutenues par des cadres réglementaires adaptés.

Tableau I-1 Répartition du rayonnement solaire global moyen annuel en Algérie [5].

Région	Durée annuelle d'ensoleillement (h/an)	Rayonnement solaire global (kWh/m ² /an)
Nord (zone côtière)	2 600 – 3 000	1 700 – 2 000
Hauts Plateaux	3 000 – 3 300	2 000 – 2 400
Sud (zone saharienne)	3 500 – 3 900	2 500 – 2 650

L'Algérie bénéficie d'un ensoleillement exceptionnel, avec une énergie solaire estimée à environ 2 413 kWh/m²/an dans le Sud du pays, qui abrite l'un des plus vastes champs solaires au monde. La figure (I.1) illustre l'irradiation solaire globale directe à travers le territoire algérien.

Moyenne annuelle de l'irradiation Globale reçue sur une surface horizontale, Période 1992-2002

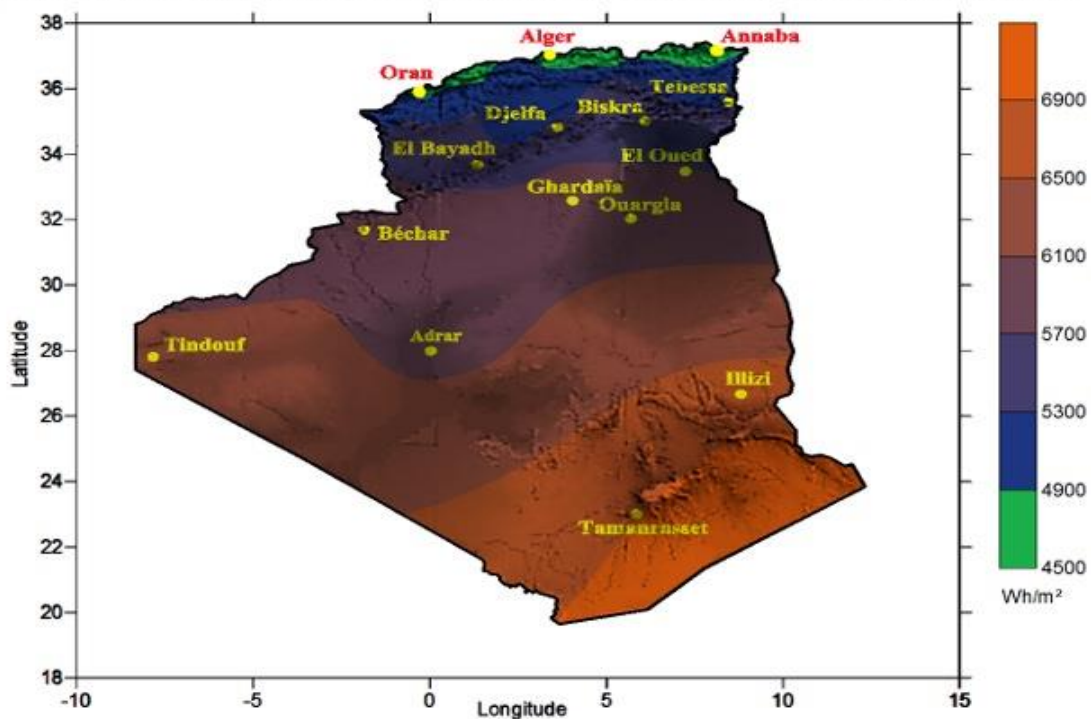


Figure I-1 Irradiation globale Directe en Algérie [6]

I.3 Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire constitue la source primaire d'énergie pour les systèmes photovoltaïques. Toutefois, cette ressource énergétique présente une caractéristique essentielle : elle est intermittente, c'est-à-dire qu'elle varie selon le temps, la saison et la localisation géographique. Contrairement aux sources d'énergie conventionnelles, le rayonnement solaire ne peut ni n'être stocké directement, ni transporté efficacement sur de longues distances, ce qui impose une évaluation rigoureuse de son potentiel local avant toute implantation de système solaire [7].

Cette variabilité est principalement induite par la rotation de la Terre sur elle-même, son inclinaison axiale et sa révolution autour du Soleil. Ces paramètres déterminent la trajectoire apparente du Soleil dans le ciel au fil des jours et des saisons, influençant directement l'angle d'incidence des rayons solaires et, par conséquent, l'intensité énergétique reçue par une surface plane. Le midi solaire, moment où le Soleil atteint son point culminant dans le ciel, correspond au moment de réception maximale d'irradiation solaire sur un plan horizontal. Cette intensité est bien plus élevée durant l'été, où la durée du jour est prolongée et l'angle d'incidence des rayons plus favorable, qu'en hiver où la trajectoire solaire est plus basse et les journées plus courtes[4].

Une bonne compréhension de ces phénomènes est cruciale pour le dimensionnement optimal des systèmes solaires et la prévision de leur rendement saisonnier, particulièrement dans des régions comme le Sahara algérien où l'irradiation solaire atteint des niveaux records, mais reste soumise à des variations diurnes et saisonnières. La figure (I.2) illustre cette variation saisonnière du rayonnement solaire.

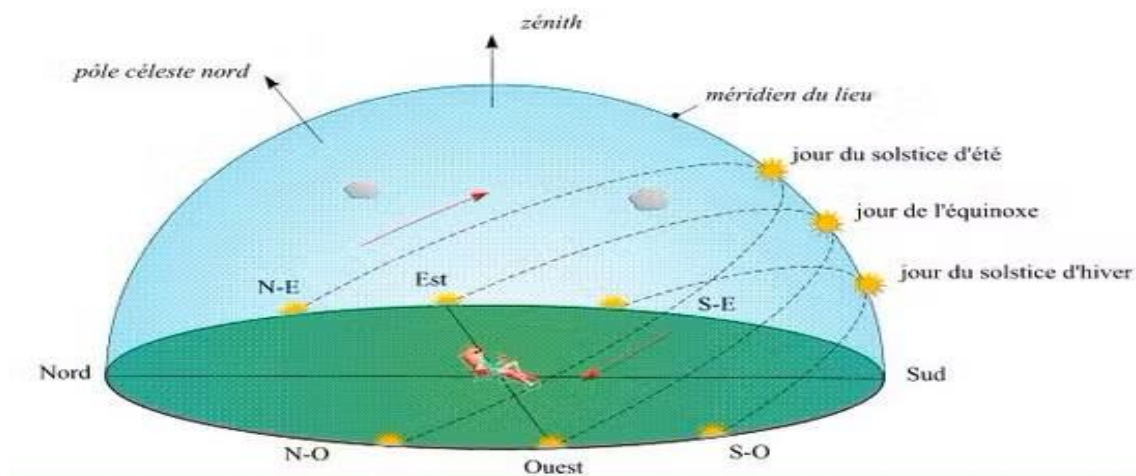


Figure I-2 Trajectoire du soleil selon les saisons [8]

I.3.1 Les différents types de rayonnement solaire

Lorsque le rayonnement solaire atteint la haute atmosphère terrestre, il interagit avec les particules, les gaz, les aérosols et les nuages, provoquant divers phénomènes d'absorption, de diffusion et de réflexion. Ces processus donnent lieu à différentes composantes du rayonnement à la surface terrestre [9]

- **Rayonnement direct (RD)** : il s'agit de la composante qui provient directement du disque solaire sans être déviée. Ce rayonnement est fortement directionnel, permettant la projection d'ombres nettes, et il peut être concentré à l'aide de systèmes optiques comme des miroirs paraboliques pour des applications thermiques ou photovoltaïques à concentration.
- **Rayonnement diffus (Rd)** : il correspond à la fraction du rayonnement solaire qui est déviée dans toutes les directions par les molécules de l'air, les poussières ou les gouttelettes d'eau présentes dans l'atmosphère. Il atteint la surface terrestre même lorsque le ciel est voilé ou nuageux, mais son intensité reste inférieure au rayonnement direct.
- **Rayonnement réfléchi (Rr)** : cette composante est générée par la réflexion du rayonnement incident sur la surface terrestre ou sur les objets environnants (bâtiments, végétation, sol). Elle dépend fortement de l'albédo, c'est-à-dire de la capacité des surfaces à réfléchir la lumière.
- **Rayonnement global (RG)** : il représente la somme des trois composantes précédentes :

$$RG=RD+Rd+Rr$$

La prise en compte de ces composantes est essentielle pour le dimensionnement précis des systèmes solaires, car elles influencent directement le rendement énergétique disponible au sol [10].

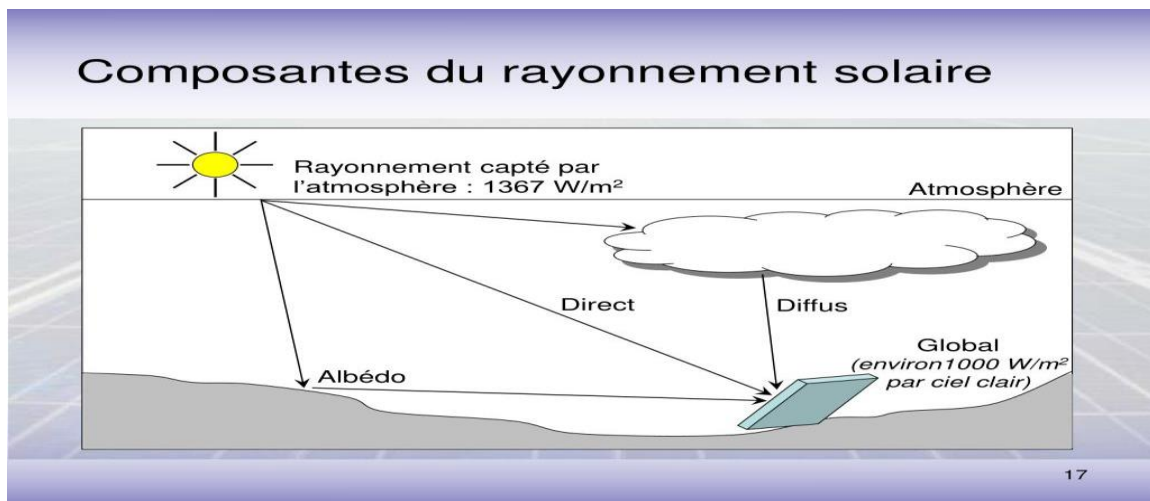


Figure I-3 illustre visuellement la composition du rayonnement global [11].

Contrairement aux technologies solaires à concentration (CSP), qui nécessitent une irradiation directe intense et stable pour fonctionner efficacement, les panneaux photovoltaïques conventionnels sont conçus pour exploiter le rayonnement solaire global. Ce dernier inclut non seulement le rayonnement direct, mais aussi les composantes diffuse et réfléchie, leur permettant ainsi de produire de l'électricité même par temps nuageux ou voilé [12]. Cette capacité à capter différentes formes de rayonnement rend les systèmes photovoltaïques plus polyvalents et mieux adaptés à une large gamme de conditions climatiques, en particulier dans des environnements semi-arides ou partiellement nuageux.

I.4 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur capable de convertir directement l'énergie lumineuse du Soleil en énergie électrique par l'intermédiaire de l'effet photovoltaïque. Elle repose sur une jonction de deux couches de matériaux dopés de manière opposée : une couche de type N, enrichie en électrons libres (généralement dopée au phosphore), et une couche de type P, enrichie en trous (souvent dopée au bore). Lorsque ces deux couches sont mises en contact, une zone de déplétion se forme à l'interface, créant un champ électrique interne permettant la séparation des charges photo-générées [13].

Sous l'effet de la lumière, les photons incidents dotés d'une énergie suffisante excitent les électrons de la couche P, les faisant passer de la bande de valence à la bande de conduction. Ces électrons sont ensuite dirigés vers la couche N par le champ électrique interne, générant un courant électrique continu lorsqu'un circuit externe est connecté. Les électrodes métalliques, positionnées sur les deux faces de la cellule, servent à collecter les charges électriques et à permettre leur circulation. La tension délivrée par une cellule photovoltaïque standard varie généralement entre 0,3 et 0,7 V, en fonction des matériaux utilisés, de la température et de l'intensité lumineuse [14].

La figure (I.4) illustre schématiquement le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque, mettant en évidence la génération de porteurs de charge, leur séparation et la production de courant électrique dans un circuit externe.

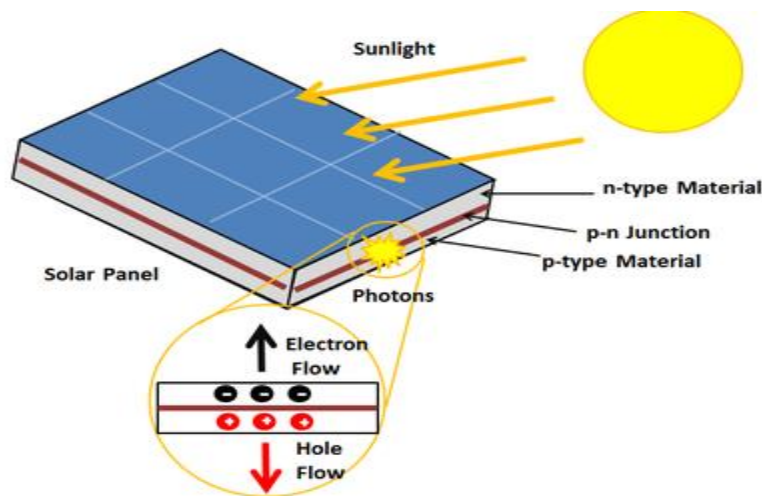


Figure I-4 Principe de fonctionnement de la cellule PV [8]

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque repose sur l'**effet photovoltaïque**, un phénomène physique par lequel l'énergie lumineuse est directement convertie en énergie électrique. Lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière, une force électromotrice est générée au sein de la cellule, permettant la création d'un courant électrique [15].

La cellule est composée de deux couches distinctes de matériaux semi-conducteurs :

- **La couche de type N** (dopée au phosphore, par exemple) qui possède un excès d'électrons libres.
- **La couche de type P** (dopée au bore, par exemple) qui présente un déficit d'électrons, créant ainsi des trous comme porteurs majoritaires.

À l'interface de ces deux couches, une jonction P-N est formée, donnant naissance à un champ électrique interne qui facilite la séparation des charges photo-générées. Lorsqu'un photon d'énergie suffisante frappe la cellule, il libère un électron de la bande de valence vers la bande de conduction. Les électrons sont ensuite attirés vers la couche N, tandis que les trous migrent vers la couche P, générant un flux de courant électrique lorsqu'un circuit externe est connecté.

Pour assurer une bonne extraction des charges, une grille métallique est déposée sur la face exposée à la lumière, laissant suffisamment d'espace pour permettre au rayonnement solaire d'atteindre le matériau semi-conducteur actif et d'initier ainsi la production d'électricité [16].

I.5 Les technologies de cellules photovoltaïques

Il existe aujourd'hui plusieurs technologies de cellules photovoltaïques, différenciées principalement par la nature des matériaux semi-conducteurs utilisés ainsi que par leurs

performances en termes de rendement énergétique. Ces technologies influencent directement les coûts de production, la durabilité, l'efficacité et les domaines d'application des modules photovoltaïques [17].

I.5.1 Cellules en silicium polycristallin

Ces cellules photovoltaïques en silicium polycristallin sont constituées de multiples cristaux de silicium orientés aléatoirement, formant une texture visuellement caractéristique en mosaïque. Comme illustré à la figure (I.5), cette technologie est aujourd'hui l'une des plus répandues à l'échelle mondiale, en raison de son compromis entre coût de fabrication réduit et rendement énergétique acceptable [18].

Les modules à base de silicium polycristallin sont couramment utilisés pour des installations photovoltaïques de grande capacité, que ce soit pour des systèmes raccordés au réseau électrique ou pour des applications autonomes en sites isolés. Ils sont principalement installés sur les toitures résidentielles, commerciales, ainsi que sur les façades de bâtiments et les fermes solaires de grande envergure. Cette technologie bénéficie également d'une meilleure stabilité thermique comparée aux modules en silicium amorphe, ce qui la rend particulièrement adaptée aux régions à fort ensoleillement.



Figure I-5 Panneau Polycristallin [18]

I.5.2 Cellules en silicium monocristallin

Les cellules photovoltaïques en silicium monocristallin sont élaborées à partir d'un unique cristal de silicium, ce qui leur confère une structure homogène et une couleur bleu foncé uniforme. Cette pureté cristalline permet une meilleure mobilité des porteurs de charge, se traduisant par un rendement supérieur à celui des cellules polycristallines. Comme illustré à la figure (I.6), ces

cellules constituent aujourd'hui l'une des technologies les plus performantes sur le marché mondial de l'énergie solaire.

En raison de leur efficacité élevée et de leur compacité, les modules à base de silicium monocristallin sont utilisés pour une large gamme d'applications : toitures résidentielles et industrielles, façades architecturales, systèmes solaires embarqués, ainsi que pour les dispositifs de faible puissance, notamment dans le domaine spatial. Leur efficacité dépasse souvent 20 %, et grâce à l'évolution des technologies de type PERC (Passivated Emitter and Rear Cell) et TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact), ils deviennent de plus en plus accessibles pour des projets à grande échelle [19].



Figure I-6 Panneau solaire monocristallin [20]

I.5.3 Cellules en silicium amorphe (couche mince)

La technologie des cellules photovoltaïques à couche mince, notamment à base de silicium amorphe, repose sur le dépôt de couches ultrafines de matériaux semi-conducteurs sensibles à la lumière sur des substrats peu coûteux tels que le verre, le plastique ou l'acier. Cette structure permet de réduire considérablement les coûts de production tout en maintenant une flexibilité et une légèreté appréciables, particulièrement utiles pour des applications mobiles ou portables [21].



Figure I-7 Panneau solaire amorphe [21]

Les cellules en silicium amorphe (figure I.7), bien que généralement moins performantes en termes de rendement que les cellules cristallines, offrent l'avantage de fonctionner même en conditions de faible luminosité et de températures élevées. Ces caractéristiques en font une solution idéale pour des dispositifs à faible consommation d'énergie comme les montres, calculatrices, luminaires de secours, ou encore certains capteurs environnementaux. Leur potentiel reste prometteur, notamment pour des applications intégrées dans des matériaux flexibles ou dans l'architecture urbaine.

En parallèle des cellules au silicium amorphe, d'autres variantes de la technologie à couche mince connaissent actuellement un développement commercial significatif. Parmi celles-ci, les cellules à base de tellure de cadmium (CdTe) se démarquent par leur rendement élevé et leur faible coût de production. Elles sont particulièrement efficaces dans des conditions de faible ensoleillement et présentent une bonne stabilité à long terme. L'introduction de composés comme le CdSeTe a permis d'atteindre des efficacités allant jusqu'à 16,4 % dans des configurations expérimentales avancées [22].

De même, les cellules utilisant des alliages de cuivre, indium, gallium et sélénium (CIGS) représentent une alternative prometteuse grâce à leur haut coefficient d'absorption, leur bonne performance en conditions de faible lumière, et leur faible sensibilité aux températures élevées. Certaines configurations récentes de CIGS ont démontré des rendements supérieurs à ceux des cellules PERC en silicium cristallin, en particulier dans les environnements chauds ou faiblement éclairés.

Ces technologies, bien que moins répandues que le silicium cristallin, offrent des perspectives intéressantes pour les applications photovoltaïques intégrées au bâti ou en sites isolés.

Tableau I-2 Rendement, avantages et inconvénients des différents types de cellules photovoltaïques [22]

Type de cellule	Rendement typique	Avantages	Inconvénients
Silicium monocristallin	18–23 %	Rendement élevé, bonne durabilité, faible encombrement	Coût de fabrication élevé, déchets lors de la découpe
Silicium polycristallin	15–18 %	Coût plus bas que le monocristallin, bonne stabilité	Moins efficace, plus sensible aux hautes températures
Silicium amorphe (couche mince)	6–10 %	Faible coût, flexible, fonctionne en basse lumière	Faible rendement, durée de vie plus courte
CdTe (tellure de cadmium)	12–16 %	Faible coût de production, bonne performance en faible lumière	Utilisation du cadmium (toxique), recyclage complexe
CIGS (Cu, In, Ga, Se)	13–20 %	Bon rendement, excellente absorption, fonctionne bien par temps couvert	Coût de production plus élevé, complexité du procédé de fabrication

I.6 Les Entreprises de Fabrication Photovoltaïque en Algérie

I.6.1 Les entreprises publiques du secteur photovoltaïque en Algérie

I.6.1.1 CREDEG : Centre de Recherche et de Développement de l'Électricité et du Gaz

Est une filiale du groupe Sonelgaz, est un acteur clé dans le développement technologique du secteur énergétique algérien. Ses missions englobent l'amélioration continue des performances techniques des installations, la sécurité des personnes et des biens, la protection de l'environnement, ainsi que la qualification et l'homologation des matériels destinés à la distribution de l'électricité et du gaz. Le CREDEG dispose également de laboratoires spécialisés en métrologie et en contrôle non destructif, assurant le contrôle, la vérification et l'étalonnage des équipements énergétiques [23].

I.6.1.2 ENIE (Entreprise Nationale des Industries Électroniques)

Basée à Sidi Bel Abbés, l'ENIE est une entreprise publique spécialisée dans la fabrication de produits électroniques, y compris des panneaux solaires photovoltaïques. Depuis 2015, elle produit des panneaux solaires avec une capacité de 3 MW. En 2021, l'ENIE a signé un contrat de coentreprise avec la société italienne Fimer pour créer Fimer Algérie, spécialisée dans la fabrication d'onduleurs et d'unités de commutation pour centrales solaires [24]

I.6.2 Les entreprises privées du secteur photovoltaïque en Algérie

I.6.2.1 ALENER-EUROSOL

Fondée en 2012, ALENER (Algérienne des Énergies Nouvelles et Renouvelables) est une filiale du groupe SOPREC, basée à Chlef. En 2013, elle a formé une coentreprise avec l'entreprise allemande Eurosol Energy Solutions, créant ALENER-EUROSOL Spa avec un capital social de 20 millions de dinars, détenu à 51 % par SOPREC et à 49 % par Eurosol. Cette joint-venture se spécialise dans la fabrication, l'installation et la distribution d'équipements liés à l'énergie solaire, ainsi que dans l'ingénierie, le conseil et la formation spécialisée dans le domaine solaire. ALENER dispose d'une gamme complète de produits en panneaux photovoltaïques et composants pour toutes installations de réseau [25].

I.6.2.2 Aurès Solaire

Aurès Solaire, fondée par M. Hocine Nouacer, est une entreprise algérienne spécialisée dans la fabrication de panneaux solaires photovoltaïques de nouvelle génération. Située dans la zone industrielle d'Aïn Yagout, dans la wilaya de Batna, l'entreprise a inauguré en 2017 une usine dotée d'une capacité de production annuelle de 30 MW, avec l'intention de doubler cette capacité à 60 MW ultérieurement. Le projet, d'un investissement de 10 millions d'euros, a été réalisé en partenariat avec la société française Vincent Industrie, qui détient 49 % des parts, tandis que Condor Electronics en détient 51 %. Les modules produits utilisent la technologie NICE (New Industrial Cell Encapsulation) développée par Apollon Solar, offrant des modules monocristallins de 240 W [26].

I.6.2.3 Zergoun Green Energy

Zergoun Green Energy est une entreprise privée algérienne, filiale du groupe Zergoun Frères, spécialisée dans la fabrication de modules photovoltaïques de haute performance. Implantée à Ouargla, son usine de 9 200 m², opérationnelle depuis juin 2022, dispose d'une capacité de production annuelle de 180 MW, avec une automatisation à 95 %. Les modules produits utilisent

des cellules mono PERC de technologies M2 et M3, avec des puissances variant de 255 W à 415 W, et sont conçus pour offrir un rendement élevé adapté aux conditions climatiques locales. L'entreprise prévoit d'investir dans une nouvelle ligne de production utilisant la technologie TOPCon avec 16 busbars, afin de se conformer aux normes internationales en matière de performance et d'efficacité énergétique [27].

Tableau I-3 Prix des panneaux solaires de Zergoun Green Energy en Algérie (2025) [28].

Modèle de panneau	Puissance (W)	Prix estimé (DZD)	Technologie
MA 5BB Poly 60 cellules	255 – 270	13 000 – 16 000	Polycristallin
MA 5BB Poly 72 cellules	315 – 330	16 000 – 20 000	Polycristallin
MA 5BB Mono 60 cellules	310 – 325	20 000 – 22 000	Monocristallin
Mono-PERC M3 60 cellules	320 – 335	22 000 – 24 000	Monocristallin PERC
Mono-PERC M2 72 cellules	375 – 390	25 000 – 27 000	Monocristallin PERC
Mono-PERC M3 72 cellules	390 – 405	27 000 – 30 000	Monocristallin PERC

I.6.2.4 Condor Electronics

Condor Electronics, entreprise algérienne spécialisée dans l'électronique, a lancé en 2012 la construction de son usine de panneaux solaires photovoltaïques à Bordj Bou Arréridj, avec un investissement de 10 millions d'euros. L'usine, opérationnelle depuis 2013, s'étend sur une superficie de 5 584 m² et dispose d'une capacité de production annuelle de 75 MW, avec une possibilité d'extension à 280 MW. Les panneaux produits, d'une puissance variante entre 70 W et 280 W, sont destinés à divers usages tels que l'éclairage public, le pompage agricole, l'électrification rurale et l'usage domestique. Condor a établi des partenariats avec des ingénieurs asiatiques et européens pour assurer une production de haute qualité, répondant aux normes internationales [29].

I.6.2.5 Solarvie : Une micro-entreprise pionnière de l'énergie solaire à Sidi Bel Abbès

Fondée en 2006 par Mohamed Amine Rabehi, Solarvie est une entreprise unipersonnelle à responsabilité limitée (EURL) basée à Sidi Bel Abbès, spécialisée dans la fabrication, l'installation et la commercialisation d'équipements liés à l'énergie solaire et électrique. Avec un capital social de 10 300 000 DZD, elle s'est rapidement positionnée comme un acteur clé dans le domaine des énergies renouvelables en Algérie.

Dès sa création, Solarvie a participé activement à l'électrification solaire des foyers ruraux de la wilaya de Sidi Bel Abbès, dans le cadre d'un programme national de lutte contre la désertification rurale initié par le ministère de l'Agriculture. Cette initiative a permis d'améliorer les conditions de vie des populations locales tout en favorisant l'utilisation des énergies renouvelables.

Entre 2009 et 2013, l'entreprise a élargi ses activités en réalisant des systèmes de signalisation routière à base d'énergie solaire, notamment l'installation de plots lumineux solaires dans diverses wilayas de l'ouest algérien, répondant ainsi aux besoins des collectivités locales [30].

I.7 Les différentes configurations des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques (PV) se déclinent en plusieurs configurations, selon leur mode de fonctionnement et leur interaction avec le réseau électrique. Les trois principales catégories sont : les systèmes autonomes, les systèmes hybrides, et les systèmes connectés au réseau. Les deux premiers types fonctionnent indépendamment du réseau électrique national et sont principalement déployés dans les zones rurales ou isolées, où l'accès à l'électricité conventionnelle est limité [31].

I.7.1 Les systèmes autonomes

Les systèmes photovoltaïques autonomes, aussi appelés systèmes hors-réseau (off-grid), sont des installations solaires capables de produire de l'électricité de manière totalement indépendante, sans connexion au réseau électrique national. Ce type de système est particulièrement adapté aux zones rurales ou isolées, où le coût de raccordement au réseau est prohibitif ou techniquement difficile à réaliser. Les modules photovoltaïques captent l'énergie solaire et la convertissent en électricité qui peut être utilisée directement ou stockée dans des accumulateurs (batteries) pour un usage différé, notamment durant la nuit ou les jours nuageux.

Dans certains cas spécifiques, comme les systèmes de pompage d'eau solaires, l'énergie produite peut être directement utilisée pour faire fonctionner des moteurs, sans recourir au stockage d'électricité, ce qui simplifie le système et réduit les coûts d'investissement [32]. Ces systèmes se distinguent par leur souplesse d'installation, leur autonomie énergétique et leur impact environnemental réduit, ce qui en fait une solution durable et économiquement viable pour l'électrification décentralisée.

La **figure (I.8)** présente un schéma typique d'un système autonome photovoltaïque, incluant ses principaux composants : panneaux, contrôleur de charge, batteries, et convertisseur

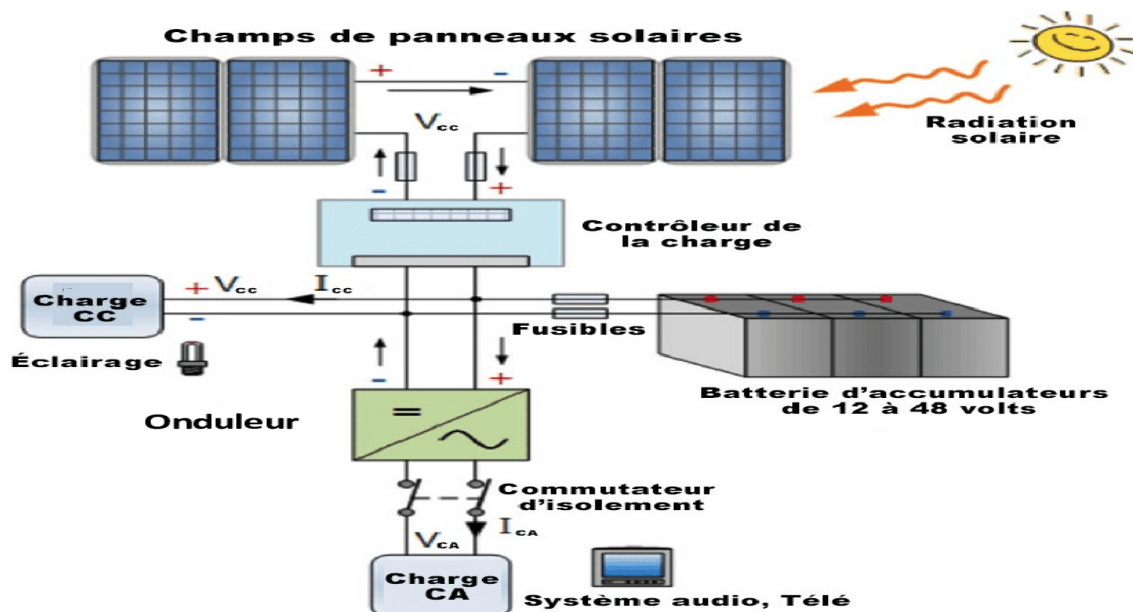


Figure I-8 Système photovoltaïque autonome [33]

I.7.2 Les systèmes hybrides

Les systèmes énergétiques hybrides combinent au moins deux sources d'énergie – généralement renouvelables, telles que le solaire photovoltaïque et l'éolien – avec éventuellement une ou plusieurs sources classiques comme le diesel. Ces systèmes sont principalement conçus pour fonctionner de manière autonome, c'est-à-dire indépendamment des grands réseaux interconnectés, et sont particulièrement adaptés aux zones rurales ou isolées où la fiabilité énergétique est essentielle [34].

Sur le plan technique, deux configurations d'architecture sont utilisées : le bus à courant continu (DC) et le bus à courant alternatif (AC). Dans l'architecture à bus DC, toutes les sources sont connectées à une barre commune en courant continu via des convertisseurs adaptés, ce qui simplifie la gestion de l'énergie et améliore l'efficacité du système global. Dans les systèmes AC, les sources à courant continu, comme les modules photovoltaïques, nécessitent une conversion vers le courant alternatif avant d'être intégrées au réseau interne du système [35].

Les conditions climatiques locales déterminent fortement la disponibilité des ressources solaires et éoliennes, influençant ainsi le dimensionnement et la configuration optimale de ces systèmes. Les configurations hybrides les plus couramment rencontrées sont :

- Photovoltaïque / batteries,
- Photovoltaïque / éolien,

- Photovoltaïque / diesel,
- Photovoltaïque / thermique,
- Photovoltaïque / thermique / batteries.

La **Figure I.10** présente un schéma typique d'un système hybride solaire-éolien.

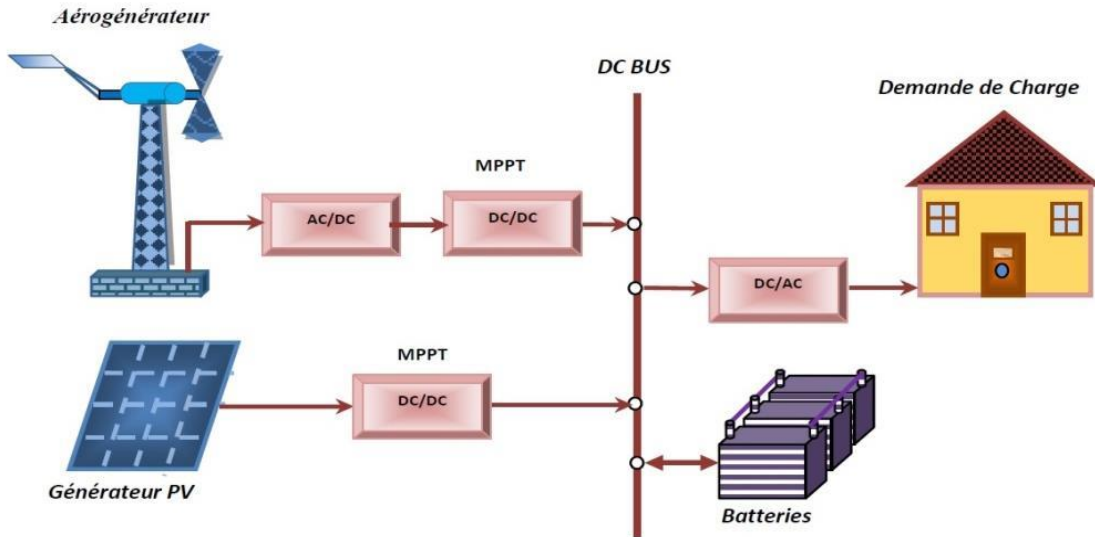


Figure I-9 Schéma descriptif d'un système hybride [36]

I.7.3 Système connecté au réseau (Grid-Connected)

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau représentent aujourd'hui la solution la plus adoptée dans les environnements urbains et périurbains, tant pour les habitations que pour les entreprises. Ce type de système permet de revendre l'électricité excédentaire produite par les panneaux solaires au réseau public et d'en importer en cas de besoin, notamment lorsque l'ensoleillement est insuffisant. L'absence de batteries, souvent coûteuses, rend ce système économiquement avantageux, réduisant les coûts de 40 % et simplifiant considérablement la maintenance [37].

Un onduleur joue un rôle essentiel dans cette configuration : il convertit le courant continu (DC) produit par les modules photovoltaïques en courant alternatif (AC), compatible avec les équipements électriques standards. Le système connecté au réseau offre une exploitation optimale de l'énergie solaire disponible, avec un stockage virtuellement « infini » grâce au réseau, ce qui prolonge la durée de vie des composants du système. De plus, les petites centrales photovoltaïques résidentielles peuvent permettre aux abonnés domestiques de devenir des producteurs indépendants

d'électricité, revendant leur surplus au réseau, comme c'est déjà pratiqué avec la Sonelgaz. La **Figure I.10** illustre un schéma typique d'un système photovoltaïque raccordé au réseau.

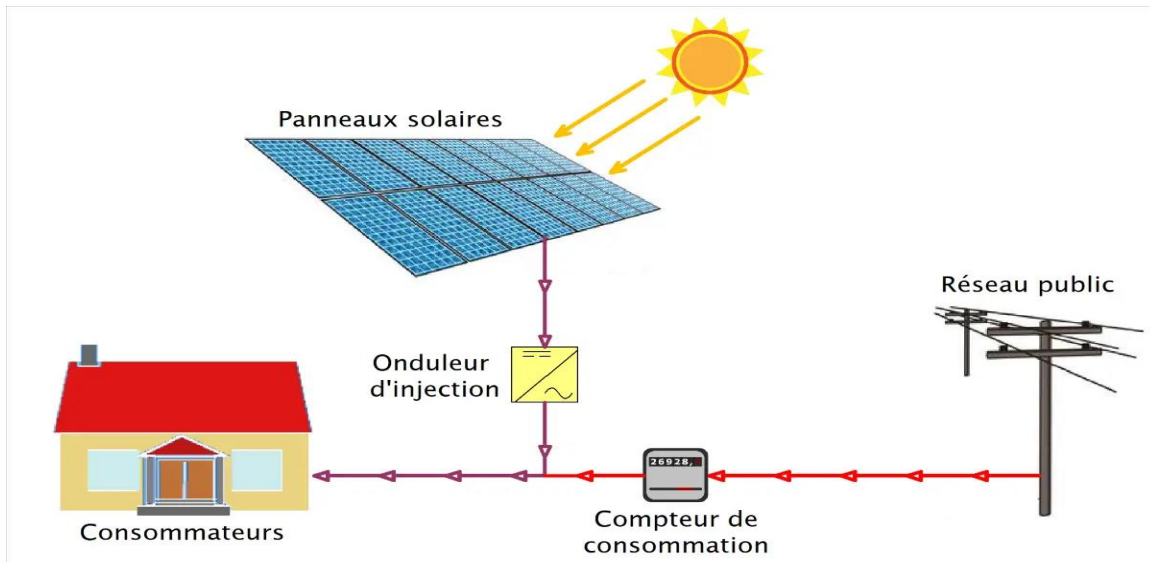


Figure I-10 Schéma descriptif du système connecté au réseau [38]

I.7.3.1 Configurations des systèmes PV raccordés au réseau

Les systèmes photovoltaïques (PV) connectés au réseau reposent sur des architectures d'onduleurs permettant de transférer efficacement l'énergie solaire vers le réseau électrique. On distingue principalement deux configurations de raccordement :

a) Connexion d'un générateur photovoltaïque à travers un étage d'adaptation DC/AC

Selon différentes topologies de gestion énergétique. Le rôle principal de l'onduleur est non seulement de convertir le courant continu (DC) produit par les panneaux solaires en courant alternatif (AC) synchronisé au réseau (souvent 230/240V, 50Hz), mais aussi de maximiser la puissance extraite du générateur photovoltaïque (GPV) grâce à des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) [39].

En plus de leur rôle de conversion, les onduleurs assurent une **surveillance active du réseau**, interrompant automatiquement l'alimentation en cas de défaillance, protégeant ainsi à la fois le réseau et le système PV. Trois topologies d'onduleurs sont largement utilisées :

- **L'onduleur central**

Les onduleurs centraux sont couramment utilisés dans les installations photovoltaïques de grande envergure (généralement supérieures à 10 kW), où plusieurs chaînes de modules solaires sont connectées en parallèle à un seul onduleur. Cette configuration offre une efficacité élevée, souvent

supérieure à 98 %, et des coûts réduits, ce qui en fait une solution économique pour les applications à grande échelle. Cependant, l'utilisation d'un seul point de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour l'ensemble du système peut entraîner des pertes d'efficacité en cas de décalage entre les modules, dus à des ombrages partiels, des salissures ou des différences de vieillissement. De plus, l'absence de transformateur dans certaines conceptions modernes, bien qu'améliorant l'efficacité et réduisant les coûts, peut poser des défis en matière de sécurité et de courants de fuite. En cas de défaillance de l'onduleur central, l'ensemble du système peut cesser de fonctionner, soulignant l'importance d'une maintenance régulière et d'une surveillance proactive pour assurer la fiabilité à long terme [40].

- **L'onduleurs string**

Les onduleurs string, également appelés onduleurs en chaîne, sont des composants clés dans les systèmes photovoltaïques (PV) connectés au réseau. Dans cette configuration, chaque chaîne de panneaux solaires (string) est reliée à un onduleur dédié, permettant un suivi du point de puissance maximale (MPPT) individuel pour chaque string. Cette approche améliore l'efficacité énergétique globale du système, notamment en minimisant les pertes dues aux effets d'ombrage partiel ou aux différences de performance entre les panneaux, comparativement aux systèmes utilisant un onduleur central unique. Les onduleurs string offrent également une modularité accrue, facilitant l'expansion du système et la maintenance, car une défaillance affecte uniquement la chaîne concernée et non l'ensemble de l'installation. Cependant, cette architecture nécessite l'installation de plusieurs onduleurs de moyenne puissance, ce qui peut entraîner des coûts supplémentaires en termes d'équipement et de câblage. De plus, bien que les onduleurs string soient plus tolérants aux variations entre les panneaux, leur performance peut encore être affectée par des conditions d'ombrage sévères, nécessitant parfois l'intégration de dispositifs supplémentaires tels que des optimiseurs de puissance pour atténuer ces effets [41].

- **Les onduleurs intégrés aux panneaux photovoltaïques**

Les micro-onduleurs, fixés individuellement à chaque panneau photovoltaïque, permettent une conversion directe du courant continu en courant alternatif au niveau du module, optimisant ainsi la production énergétique en cas d'ombrage partiel ou de défaillance d'un panneau. Cette architecture favorise une surveillance précise de la performance de chaque module et offre une flexibilité accrue pour l'expansion du système. Toutefois, les micro-onduleurs présentent des coûts initiaux plus élevés, estimés entre 150 et 300 USD par unité, et nécessitent un câblage AC plus

complexe, ce qui peut augmenter les coûts d'installation et de maintenance. De plus, leur efficacité, bien que supérieure à 96 %, peut être légèrement inférieure à celle des onduleurs string dans certaines configurations. En raison de ces facteurs, les micro-onduleurs sont généralement recommandés pour des installations de petite à moyenne taille, où les avantages en termes de performance et de flexibilité peuvent compenser les coûts supplémentaires [42].

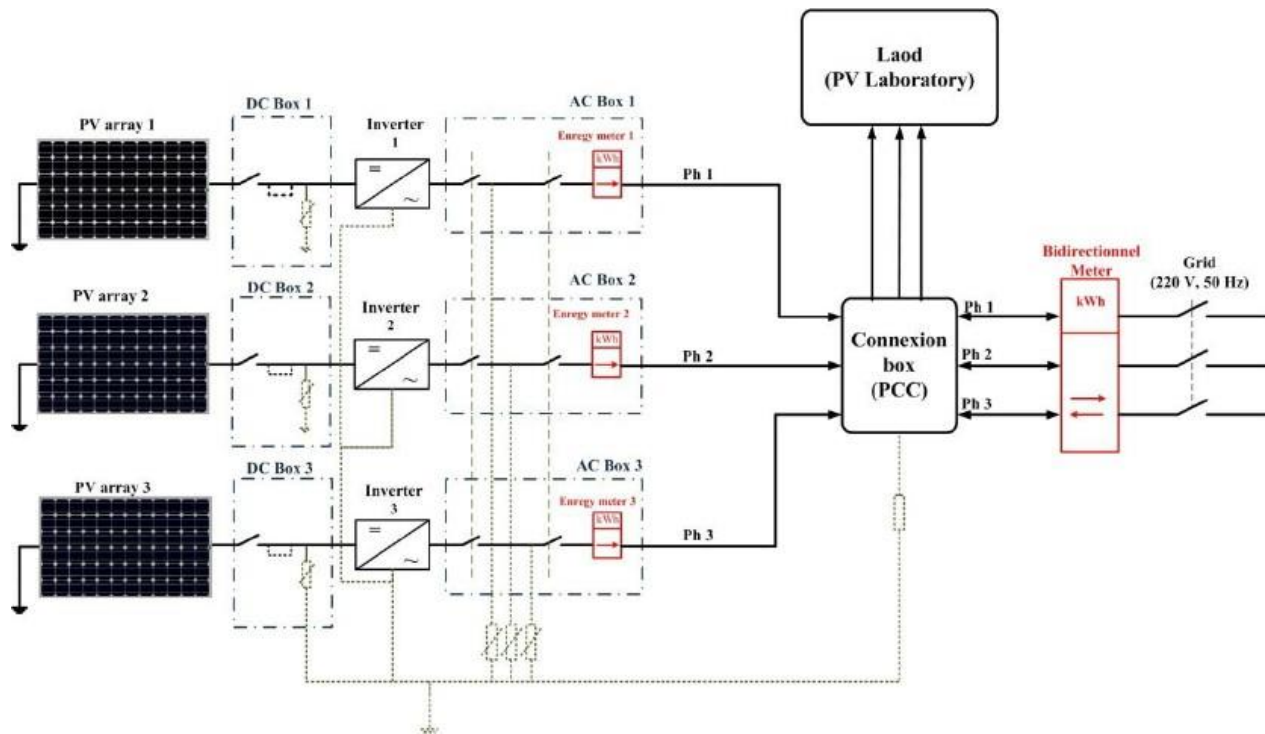


Figure I-11 Schéma du système photovoltaïque connecté au réseau du CDER [43]

b) Connexion à deux étages dans les systèmes photovoltaïques : étapes de conversion DC-DC et DC-AC

Dans les systèmes photovoltaïques, une architecture de conversion à deux étages comprenant un convertisseur DC-DC suivi d'un onduleur DC-AC est couramment utilisée pour optimiser la performance et la compatibilité avec le réseau électrique. Le premier étage, le convertisseur DC-DC, élève la tension continue générée par les panneaux solaires à un niveau approprié pour l'onduleur, facilitant ainsi la production d'un courant alternatif sinusoïdal synchronisé avec le réseau. Cette configuration permet également d'intégrer des fonctions telles que le suivi du point de puissance maximale (MPPT), améliorant l'efficacité globale du système. Le second étage, l'onduleur DC-AC, convertit la tension continue régulée en courant alternatif, assurant une alimentation stable et conforme aux normes du réseau. Cette structure modulaire offre une

flexibilité accrue, permettant une adaptation précise aux variations d'ensoleillement et aux caractéristiques spécifiques des installations [44]

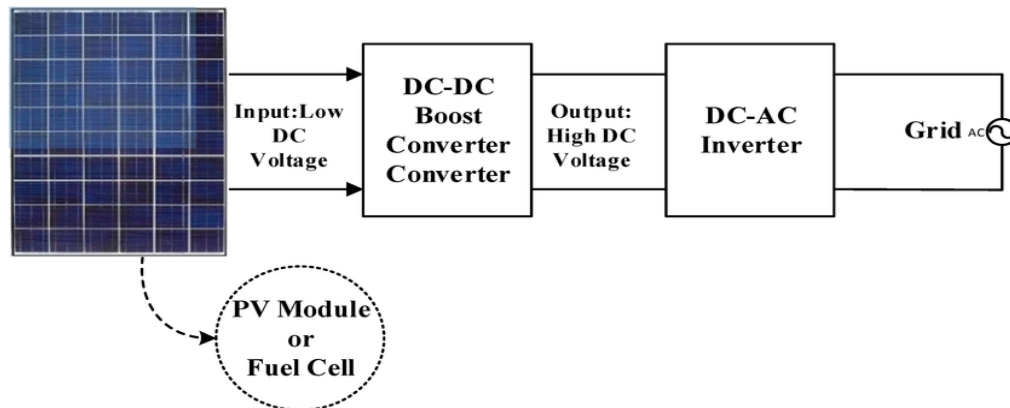
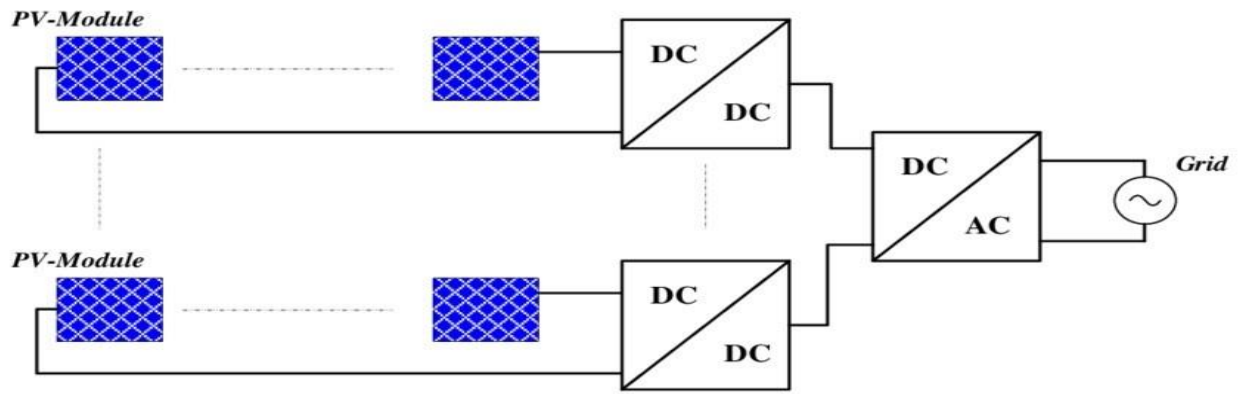


Figure I-12 Système PV connecté au réseau électrique via deux étages d'adaptation (DC-DC et DC-AC) [45]

- **La conversion multi-string**

La conversion multi-string est une architecture hybride combinant les avantages des onduleurs centraux et des onduleurs string, visant à optimiser la production d'énergie et la fiabilité des systèmes photovoltaïques (PV). Dans cette configuration, chaque chaîne de modules PV est connectée à un convertisseur DC-DC dédié, équipé de son propre algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT). Ces convertisseurs régulent individuellement la tension et le courant de chaque string, permettant ainsi une extraction optimale de l'énergie, même en présence de conditions d'ensoleillement variables ou de défaillances partielles. Les sorties des convertisseurs DC-DC sont ensuite reliées à un bus DC commun, alimentant un onduleur central qui convertit l'énergie en courant alternatif synchronisé avec le réseau. Cette approche modulaire permet non seulement d'améliorer l'efficacité globale du système, mais aussi de localiser rapidement les dysfonctionnements au niveau des strings individuels, sans compromettre la performance de l'ensemble du champ PV. De plus, la topologie multi-string facilite l'intégration de différentes orientations ou inclinaisons des panneaux, offrant une flexibilité accrue dans la conception des installations. Des études ont démontré que cette configuration améliore la résilience du système face aux ombrages partiels et aux variations de température, tout en maintenant une qualité de puissance conforme aux normes du réseau électrique [46]



Multi-String PV System

Figure I-13 Structure de conversion multi-string mixte [47]

I.7.3.2 Typologie des centrales photovoltaïques raccordées au réseau

Les centrales photovoltaïques (PV) connectées au réseau peuvent être classées en fonction de leur puissance installée, ce qui détermine leur application, leur mode de raccordement et leur gestion opérationnelle.

- a) **Les petites centrales** : d'une puissance comprise entre 1 et 10 kW, sont généralement installées sur les toits de maisons individuelles ou d'institutions publiques telles que les écoles et les parkings, et sont raccordées au réseau basse tension [48].
- b) **Les centrales de taille moyenne** : avec une puissance de 10 à 100 kW, peuvent être intégrées à des bâtiments, sur des toits ou des façades, et sont connectées soit au réseau basse tension, soit au réseau moyenne tension, en fonction de leur taille.
- c) **Les grandes centrales** : d'une puissance supérieure ou égale à 500 kW, sont des installations centralisées, souvent la propriété de compagnies d'électricité, et sont généralement raccordées au réseau moyenne ou haute tension. Cette classification est essentielle pour déterminer les exigences techniques, les réglementations applicables et les stratégies de maintenance adaptées à chaque type d'installation.

I.8 Impact des paramètres électriques et environnementaux sur la courbe I-V d'une cellule photovoltaïque

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont influencées par des paramètres internes, tels que la résistance série (R_s) et la résistance parallèle (R_p), ainsi que par des facteurs externes, notamment l'éclairement et la température (qui sont le plus important dans notre étude).

I.8.1 Paramètres externes

I.8.1.1 Influence de l'éclairement sur le fonctionnement du panneau PV

L'éclairement joue un rôle crucial dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques. Une augmentation de l'irradiance solaire entraîne une augmentation proportionnelle du courant généré par la cellule, améliorant ainsi la puissance de sortie. Cependant, la tension en circuit ouvert varie peu avec l'éclairement [49].

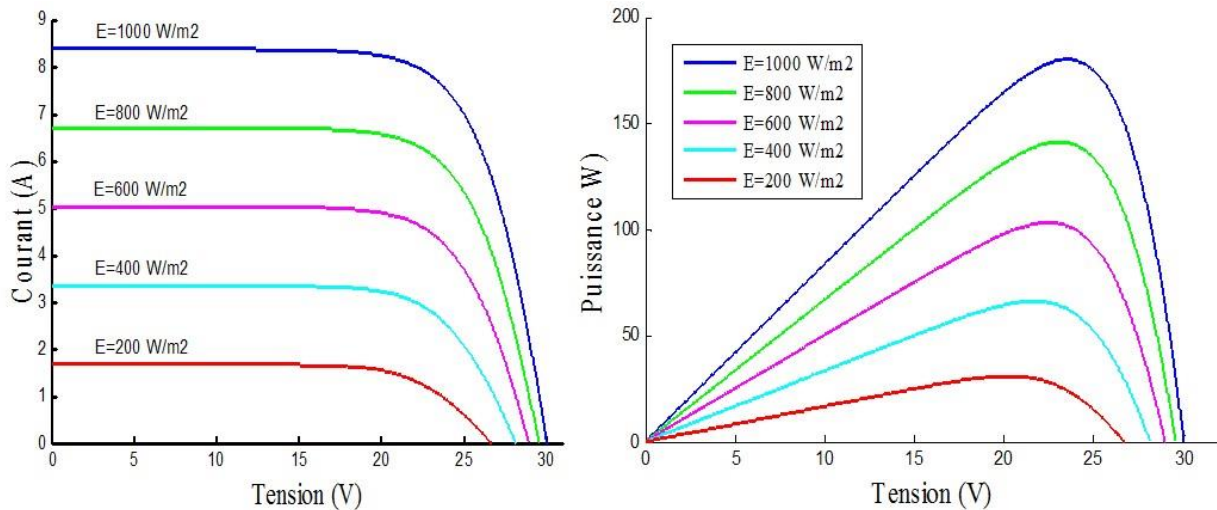


Figure I-14 Influence de l'éclairement E sur le rendement des cellules, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ [50]

En examinant les caractéristiques réelles obtenues, nous pouvons conclure que des fortes variations du niveau d'irradiation provoquent des variations relativement importantes du courant optimal. Alors que, les variations relatives de la tension optimale restent faibles.

I.8.1.2 Influence de la température sur le fonctionnement du panneau PV

La température a un effet significatif sur les performances des cellules photovoltaïques. Une élévation de la température de la cellule provoque une diminution de la tension en circuit ouvert, réduisant ainsi l'efficacité de conversion énergétique. En moyenne, la tension à vide d'une cellule photovoltaïque diminue de 2 mV pour chaque degré Celsius d'augmentation de la température [51].

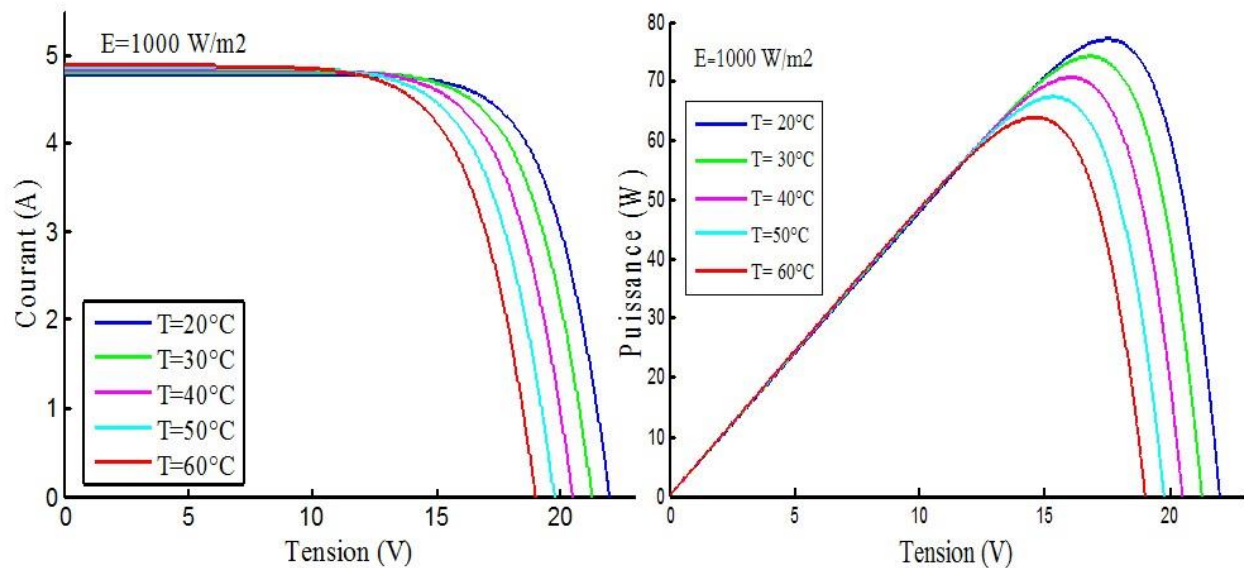


Figure I-15 Effet de la température sur la caractéristique I-V et P-V [50]

On peut remarquer sur la figure (I.15) que l'augmentation de la température se traduit aussi par une diminution de la puissance maximale disponible [50].

Lorsque la température augmente de 25 °C autour de la température ambiante et pour un éclairage de 1000 W/m² la puissance maximale diminue de 10.8 %, la tension V varie de 10.5%.

I.9 Conclusion

Le domaine de la conversion photovoltaïque connaît depuis plusieurs années une dynamique de croissance soutenue, tant sur le plan de la recherche que du développement industriel, en réponse à l'intérêt croissant pour les énergies renouvelables. Ce chapitre a permis d'approfondir la compréhension du fonctionnement des systèmes photovoltaïques, en explorant le principe de conversion de l'énergie solaire en électricité ainsi que les principales technologies associées. Les dimensions technologiques et électriques ont été examinées afin de fournir une vue d'ensemble cohérente des mécanismes impliqués dans cette conversion. Nous avons également abordé les diverses applications des systèmes photovoltaïques, tout en mettant en évidence l'influence de plusieurs paramètres internes et externes sur leurs performances, notamment à travers la courbe courant-tension (I-V).

L'usage du photovoltaïque, qu'il s'agisse d'installations autonomes ou connectées au réseau, constitue une solution pertinente pour répondre aux enjeux énergétiques actuels. L'intégration au réseau électrique présente un avantage notable : rapprocher la production de l'électricité de sa zone de consommation, réduisant ainsi les pertes liées à la transmission et à la distribution. Cette

approche s'inscrit pleinement dans une logique de production décentralisée, favorisant une meilleure efficacité énergétique.

Les chapitres suivants s'attacheront à présenter les différentes formes de production d'électricité photovoltaïque et à analyser l'impact de l'injection de puissance sur le réseau électrique.

Chapter II

Production photovoltaïques et l'Analyse spatiale (Zone Hadhoudi – Ourmes)

II.1 Introduction

Avec la libéralisation des marchés de l'énergie électrique et les politiques incitatives mises en place par de nombreux États, les systèmes de production décentralisée, en particulier ceux basés sur l'énergie photovoltaïque (PV), connaissent un essor considérable à l'échelle mondiale. Le recours à l'énergie photovoltaïque s'impose aujourd'hui comme une solution à la fois pratique, durable et économiquement viable, notamment pour l'approvisionnement en eau dans les régions isolées ou désertiques.

Ce chapitre est consacré à l'étude du dimensionnement d'une installation photovoltaïque. Il s'agira d'évaluer précisément le nombre de panneaux solaires nécessaires à la constitution du champ photovoltaïque, de manière à garantir une couverture optimale des besoins énergétiques de la charge visée. L'analyse portera également sur le dimensionnement d'un système de pompage solaire et sur les critères techniques et contextuels à considérer pour le choix d'une pompe adaptée au site étudié.

II.2 Installations Photovoltaïques Connectées au Réseau

Les installations photovoltaïques (PV) connectées au réseau permettent de réduire significativement les coûts d'investissement et d'exploitation. En injectant directement l'électricité produite sous forme de courant alternatif (220 V ou 380 V) dans le réseau électrique, ces systèmes utilisent le réseau comme un moyen de stockage virtuel. Cette flexibilité rend le photovoltaïque particulièrement adapté à une installation dans divers environnements, qu'ils soient urbains ou ruraux [52].

II.2.1 Types d'Installations Photovoltaïques Connectées au Réseau

On distingue deux grandes catégories de systèmes photovoltaïques connectés au réseau : **les installations centralisées et les installations décentralisées.**

II.2.1.1 Installations Centralisées

Les installations photovoltaïques centralisées sont conçues pour produire de l'électricité à grande échelle, souvent situées dans des zones à fort ensoleillement. Ces centrales solaires injectent directement leur production dans les réseaux haute tension et fonctionnent de manière similaire aux centrales électriques conventionnelles, tout en tenant compte de la variabilité de l'ensoleillement. De nombreuses centrales de plusieurs mégawatts (MWc) ont été mises en place

à travers le monde pour fournir de l'énergie et permettre aux opérateurs de réseaux d'acquérir de l'expérience dans la gestion de ces installations [53].

II.2.1.2 Installations Décentralisées

Les installations photovoltaïques décentralisées sont directement intégrées aux lieux de consommation, tels que les résidences individuelles, les centres commerciaux ou les bâtiments publics. Elles sont connectées au réseau de distribution local, permettant d'alimenter en priorité la charge locale et d'injecter l'excédent de production dans le réseau pendant la journée. La nuit, la consommation est assurée par le réseau. Ce modèle favorise l'autoconsommation, réduit les pertes liées au transport de l'électricité et limite la surcharge des lignes électriques.

Dans le contexte de la transition énergétique, ces installations décentralisées jouent un rôle crucial. Grâce à la modularité des panneaux solaires, les utilisateurs peuvent facilement augmenter leur capacité de production en ajoutant de nouveaux modules (voir la **figure I-10**).

Pendant la journée, l'énergie est injectée dans le réseau via un onduleur, tandis que la nuit, l'utilisateur peut consommer directement l'énergie du réseau. Ce fonctionnement est particulièrement pertinent, car la consommation d'électricité est généralement plus élevée en journée, coïncidant avec la production photovoltaïque [53].

II.2.2 Eléments constitutifs d'une installation connectée au réseau :

Elle est constituée de trois éléments essentiels :

- Les panneaux photovoltaïques
- Un onduleur synchrone qui transforme le courant pour qu'il soit compatible avec les caractéristiques du réseau. C'est "l'interface" entre l'installation et la compagnie d'électricité.
- Un compteur d'énergie (en fait, en général, deux compteurs dans le cas des installations décentralisées).
- Accessoires.

II.2.3 Exemples de Centrales Photovoltaïques

II.2.3.1 Programme d'Électrification Rurale de 18 Villages (1995–1998)

Dans le cadre du programme national d'électrification rurale mené entre 1995 et 1998, l'Algérie a entrepris l'électrification de 20 villages sahariens isolés grâce à l'énergie solaire photovoltaïque.

Ce projet visait à améliorer les conditions de vie dans des zones où l'accès à l'électricité était limité [54].

Parmi ces 20 wilayas, 18 ont été effectivement électrifiées, représentant environ 1 000 foyers répartis sur une superficie de plus d'un million de kilomètres carrés couvrant quatre wilayas du sud algérien. Les installations photovoltaïques mises en place étaient de type semi-collectif, avec des puissances unitaires de 1, 5, 3 et 6 kWc, capables d'alimenter respectivement 3, 6 et 12 foyers.

Les données clés de ce projet sont les suivantes :

- Nombre de systèmes photovoltaïques installés : 108
- Puissance totale installée : 453 kWc
- Nombre de foyers électrifiés : 908
- Superficie totale couverte (4 wilayas) : > 1 million km² [55].

Ce programme a servi de projet pilote pour les futures initiatives d'électrification rurale, démontrant la viabilité de l'utilisation de l'énergie solaire dans des zones isolées.

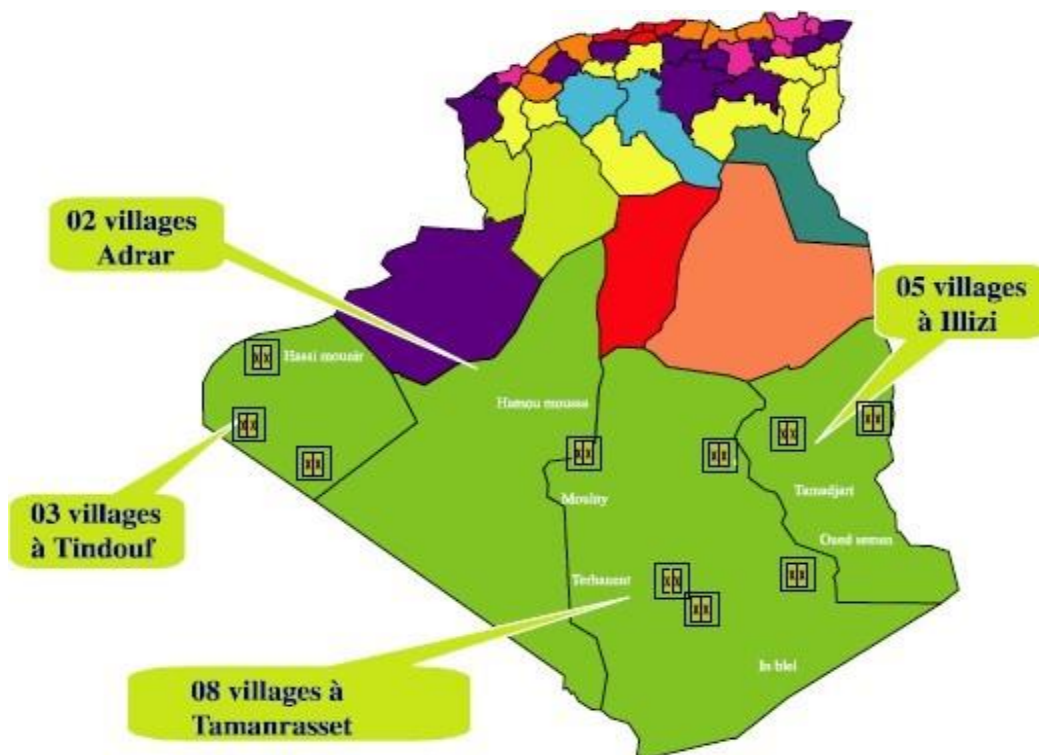


Figure II-1 Programme de l'électrification de 18 Wilayas du sud Algérien par des panneaux solaires photovoltaïques [56]

II.2.3.2 Centrale Photovoltaïque d'El Hadjira

- **Présentation Générale de la Centrale**

La centrale solaire photovoltaïque d'El Hadjira, d'une capacité de 30 mégawatts (MW), s'inscrit dans le cadre du Programme national algérien pour le développement des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique, lancé pour diversifier le mix énergétique national et renforcer l'indépendance énergétique des zones sahariennes [57].

Située dans la commune d'El Hadjira, dans la wilaya de Ouargla, au sud-est de l'Algérie, cette centrale couvre une superficie d'environ 60 hectares. Elle est dotée de plus de 120000 panneaux photovoltaïques installés sur des structures fixes. Le site bénéficie d'un excellent ensoleillement annuel, typique des régions sahariennes, ce qui garantit une production élevée et stable d'électricité solaire injectée dans le réseau national.

Ce projet, opéré par la société SKTM (Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida), filiale de Sonelgaz, a été conçu non seulement pour alimenter les populations locales (notamment El Hadjira et El Alia), mais aussi pour servir de référence technique et économique pour d'autres projets similaires à travers le pays [58].

Tableau II-1 Présentation Générale de la Centrale Photovoltaïque d'El Hadjira [59]

Caractéristique	Détail
Nom du projet	Centrale photovoltaïque d'El Hadjira (HPC Ouargla)
Localisation	El Hadjira, Wilaya de Ouargla, Algérie
Capacité installée	30 MWc (mégawatts crête)
Année de mise en service	2017
Surface totale	Environ 60 hectares
Nombre de modules PV	Plus de 120 000 modules en silicium polycristallin
Type de structure	Structures fixes
Onduleurs	Onduleurs de 500 kW
Transformateurs	Transformateurs 0,4/30 kV, 1 MW
Poste d'évacuation	Poste de 30 kV pour injection au réseau
Tension de raccordement	30 kV
Opérateur	SKTM (Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida), filiale de Sonelgaz

Caractéristique	Détail
Objectif	Approvisionnement local et injection dans le réseau interconnecté national

II.3 Dimensionnement des Composants d'une Installation Photovoltaïque

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque (PV) peut être abordé selon plusieurs méthodes, notamment la méthode de la probabilité d'erreur sur la consommation, celle basée sur la moyenne annuelle, et enfin, la méthode dite du mois le plus défavorable, sur laquelle se base notre approche. Cette dernière, réputée pour sa simplicité et sa fiabilité, consiste à dimensionner le système de manière à garantir la satisfaction des besoins énergétiques pendant le mois de l'année où l'irradiation solaire est la plus faible — typiquement décembre dans les régions tempérées ou les périodes hivernales dans les pays à forte saisonnalité [60].

II.3.1 Dimensionnement du Générateur Photovoltaïque

Avant de dimensionner le générateur PV, il est impératif d'effectuer un bilan énergétique qui consiste à estimer la consommation électrique journalière de l'installation. Cette étape est essentielle pour adapter correctement la capacité de production à la demande réelle.

Pour répondre à des besoins énergétiques plus importants, plusieurs modules solaires doivent être associés :

En série : les tensions s'additionnent, le courant reste constant.

En parallèle : les courants s'additionnent, la tension reste constante.

Ce type d'association (série-parallèle) permet de former un champ photovoltaïque apte à délivrer la tension et le courant requis selon les caractéristiques de charge. Dans les applications de moyenne à grande puissance, plusieurs centaines de modules sont souvent groupés.

Le comportement électrique du générateur est représenté par sa courbe courant-tension (I-V). Cette courbe évolue en fonction de la température et de l'irradiance, et permet de déterminer le point de puissance maximale (MPP). Une association série-parallèle modifie l'échelle de cette courbe sans en changer la forme fondamentale. Ainsi, les performances globales du système sont directement déduites de cette caractéristique [61].

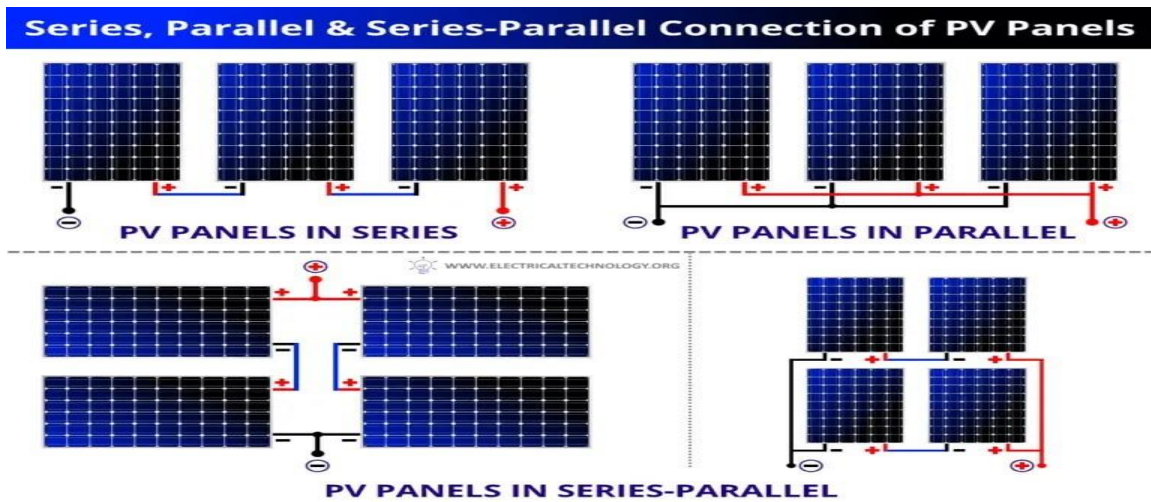


Figure II-2 Schéma de Connexion Série-Parallèle de Modules Photovoltaïques [62]

II.3.2 Dimensionnement des Convertisseurs DC/AC Couplés au Réseau

Dans un système photovoltaïque connecté au réseau, l'onduleur ou convertisseur DC/AC joue un rôle clé : il convertit le courant continu (DC) produit par les modules photovoltaïques (ou par les batteries) en courant alternatif (AC), utilisable par les charges domestiques ou injecté dans le réseau électrique.

La performance de l'onduleur dépend fortement de son efficacité de conversion, qui varie selon la charge à laquelle il est soumis. En fonctionnement optimal (au point de puissance maximale), le rendement peut dépasser 95 %, mais il peut chuter à 75–80 % lorsque l'onduleur opère à faible charge [63]. Les onduleurs dans les installations photovoltaïques peuvent être classés selon leur fonctionnement :

Onduleurs à fréquence variable : adaptés aux systèmes autonomes (off-grid), notamment dans les systèmes de pompage solaire où la fréquence de sortie peut varier selon l'énergie disponible.

Onduleurs auto-commutés à fréquence fixe : conviennent aux systèmes raccordés au réseau. Ils permettent une régulation précise de la tension et de la fréquence de sortie.

Onduleurs à fréquence fixe à base de redresseurs : également utilisés en couplage réseau, ils intègrent souvent une structure à double conversion (DC-AC via redressement/ondulation).

Un schéma représentatif de ces différentes architectures est présenté à la Figure II.3.

L'onduleur assure également l'interface entre le générateur photovoltaïque et le réseau électrique, ce qui implique plusieurs exigences techniques et normatives :

Qualité du courant : contrôle de la tension, de la fréquence, du facteur de puissance, et des harmoniques injectés dans le réseau.

Sécurité : l'onduleur doit être capable de détecter les conditions de "déconnexion du réseau" (anti-islanding) pour éviter toute injection de courant dans un réseau non alimenté, ce qui pourrait mettre en danger les agents de maintenance.

Fiabilité : la durabilité de l'onduleur doit être assurée sur plusieurs années sans diminution significative de performance. [64] [65]

II.3.3 Chaîne de Pompage Photovoltaïque

Un système de pompage photovoltaïque typique comprend trois composants principaux :

1. **Générateur photovoltaïque (PV)** : Convertit l'énergie solaire en électricité en courant continu (DC).
2. **Convertisseur d'énergie** : Adapte la tension et le type de courant pour répondre aux besoins du moteur de la pompe [84].
3. **Pompe entraînée par un moteur électrique** : Transforme l'énergie électrique en énergie mécanique pour pomper l'eau. [67] [68]

Le choix du convertisseur dépend du type de moteur utilisé :

- **Moteur à courant continu (DC)** : Un convertisseur DC/DC ajuste la tension fournie par les panneaux PV au niveau requis par le moteur.
- **Moteur à courant alternatif (AC)** : Un onduleur (convertisseur DC/AC) transforme le courant continu en courant alternatif pour alimenter le moteur.

Ces systèmes peuvent également intégrer des algorithmes de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour optimiser la production d'énergie en fonction des conditions d'ensoleillement.

La **Figure II.3** illustre le schéma fonctionnel d'une chaîne de pompage photovoltaïque, montrant l'interconnexion entre les panneaux solaires, le convertisseur et la pompe.

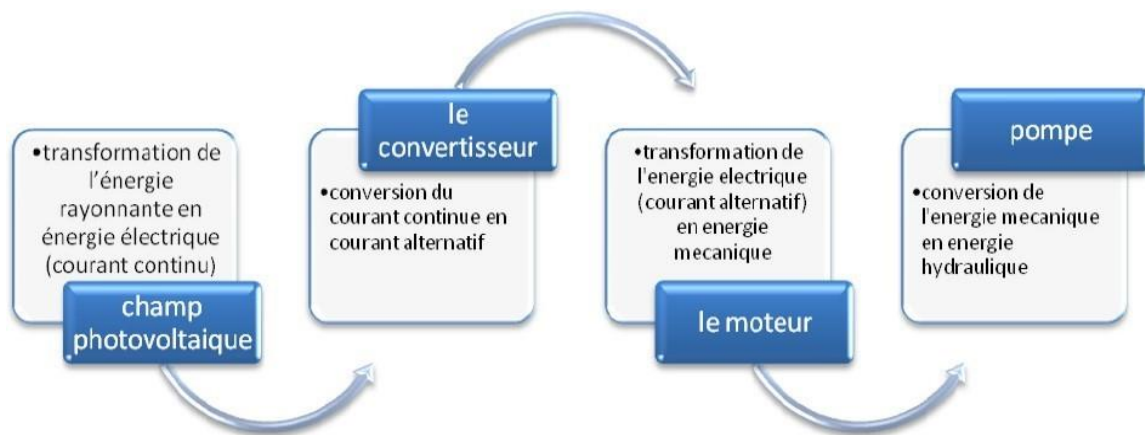


Figure II-3 Schéma synoptique du système de Pompage PV [69]

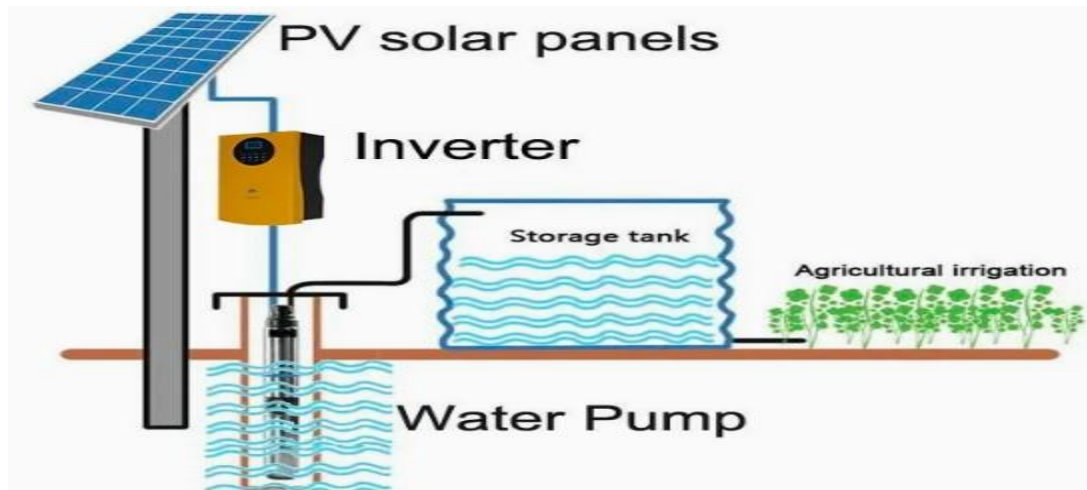


Figure II-4 Chaîne de pompage photovoltaïque [70]

II.3.3.1 Dimensionnement du Groupe Motopompe

a. Choix de la Pompe

Dans un système de pompage photovoltaïque, le choix de la pompe est crucial pour garantir l'adéquation entre la production solaire, la profondeur de captage et le débit requis. Une pompe hydraulique est une machine qui transforme l'énergie mécanique fournie par un moteur en énergie hydraulique, permettant ainsi d'augmenter la pression et le débit d'un fluide. La Figure II.4 illustre ce principe de conversion.

Les pompes à eau se classent selon leur principe de fonctionnement en deux grandes familles :

- Pompes volumétriques : Elles conviennent aux applications nécessitant de fortes pressions à faibles débits, notamment pour le pompage à grandes profondeurs. Toutefois, leur compatibilité avec les générateurs photovoltaïques est plus complexe, nécessitant souvent

des convertisseurs ou des dispositifs de stockage pour optimiser le couplage énergétique [71].

- Pompes centrifuges : Plus courantes dans les systèmes d'irrigation, elles sont adaptées à des débits élevés et des profondeurs faibles à moyennes (entre 10 et 100 mètres). Elles offrent une meilleure efficacité globale, une maintenance réduite et sont bien adaptées au fonctionnement en continu avec l'énergie solaire [72].

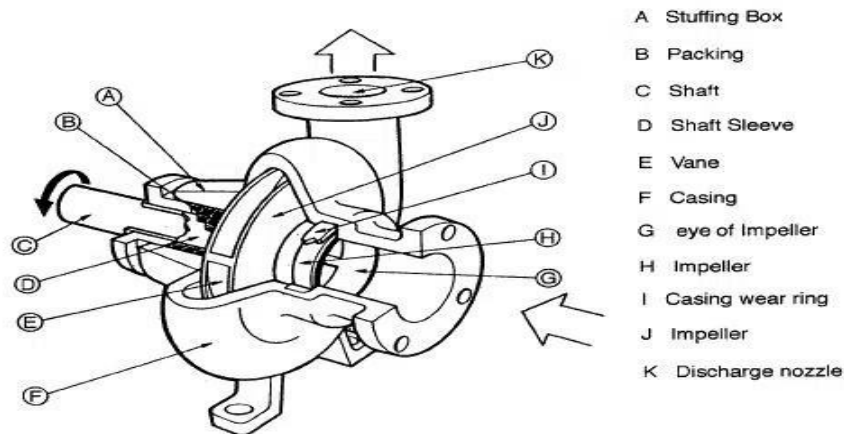


Figure II-5 Schéma de la Pompe Centrifuge [73]

b. Choix du Moteur

Un moteur électrique est un dispositif électromécanique qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique, principalement grâce à des interactions magnétiques. Cette conversion repose sur le principe selon lequel un courant électrique traversant un conducteur dans un champ magnétique génère une force (loi de Lorentz), entraînant ainsi la rotation du rotor.

Les moteurs électriques se divisent principalement en deux catégories :

Moteurs à courant continu (CC) : Ils offrent un contrôle précis de la vitesse et un couple de démarrage élevé, ce qui les rend adaptés aux applications nécessitant des ajustements fins de vitesse.

Moteurs à courant alternatif (CA) : Ils sont généralement plus robustes, nécessitent moins d'entretien et sont adaptés aux applications de forte puissance, comme les pompes industrielles. [74]

Le choix entre un moteur CC et un moteur CA dépend de plusieurs facteurs :

Puissance requise : Les moteurs CC sont mieux adaptés aux faibles puissances, tandis que les moteurs CA sont utilisés pour les applications de puissance moyenne à élevée.

Contrôle de la vitesse : Les moteurs CC permettent un contrôle plus précis de la vitesse, ce qui est avantageux pour les applications nécessitant des variations de vitesse.

Maintenance : Les moteurs CA nécessitent généralement moins d'entretien que les moteurs CC, qui peuvent avoir des composants sujets à l'usure comme les balais. [71]

Dans le contexte d'un système de pompage alimenté par énergie photovoltaïque, le choix du moteur est crucial. Les moteurs CC, notamment les moteurs sans balais (BLDC), sont souvent privilégiés pour leur compatibilité directe avec les panneaux solaires, évitant ainsi l'utilisation de convertisseurs supplémentaires. Cependant, pour des applications nécessitant une puissance plus élevée, les moteurs CA, associés à des onduleurs, peuvent offrir une solution plus robuste et durable [75].

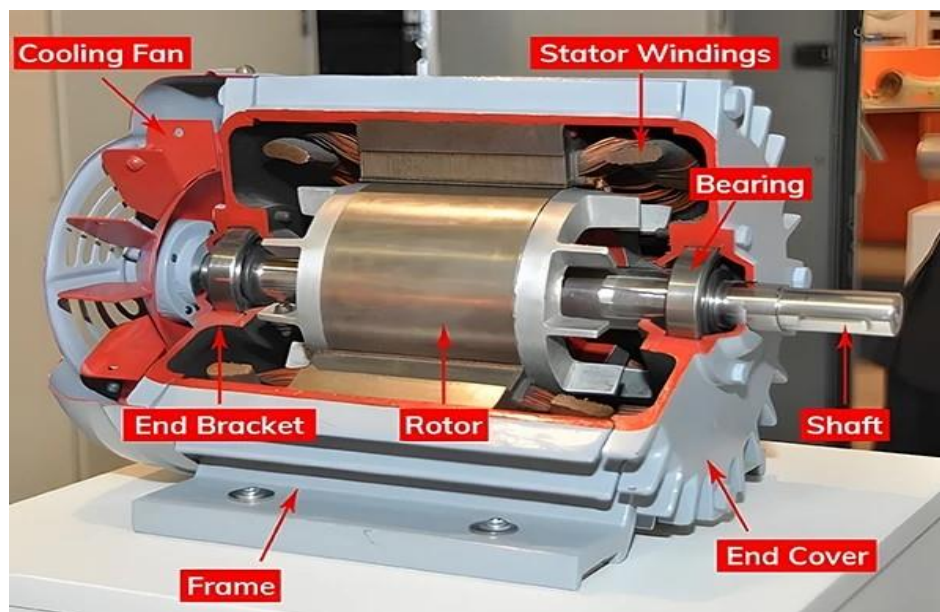


Figure II-6 Moteurs à courant alternatif (CA) [76]

II.3.3.2 Notions hydrauliques

a. Débit (Q) : représente la quantité d'eau que la pompe peut fournir pendant un intervalle de temps donné. Dans le contexte du pompage solaire, il est généralement exprimé en mètres cubes par heure (m^3/h) ou par jour (m^3/j). Le débit requis dépend des besoins en eau de l'application, tels que l'irrigation, l'approvisionnement en eau potable ou les usages industriels. Une estimation précise du débit est essentielle pour dimensionner correctement le système de pompage [77].

b. Hauteur Manométrique Totale (HMT) : Correspond à la hauteur d'eau que la pompe doit surmonter pour transporter l'eau du point de captage jusqu'au point d'utilisation. Elle est exprimée en mètres de colonne d'eau (mCE) et se calcule comme suit [77]:

$$HMT = H_{\text{géométrique}} + H_{\text{réservoir}} + P_{\text{pertes de charge}} \quad [78]$$

Où :

- **Hauteur géométrique** : Distance verticale entre le niveau dynamique de la nappe phréatique et le point de sortie de l'eau.
- **Hauteur du réservoir** : Hauteur entre le point de sortie de l'eau et le niveau d'entrée dans le réservoir de stockage.
- **Pertes de charge** : Pertes de pression dues au frottement de l'eau contre les parois des conduites, des vannes et des autres composants du système.

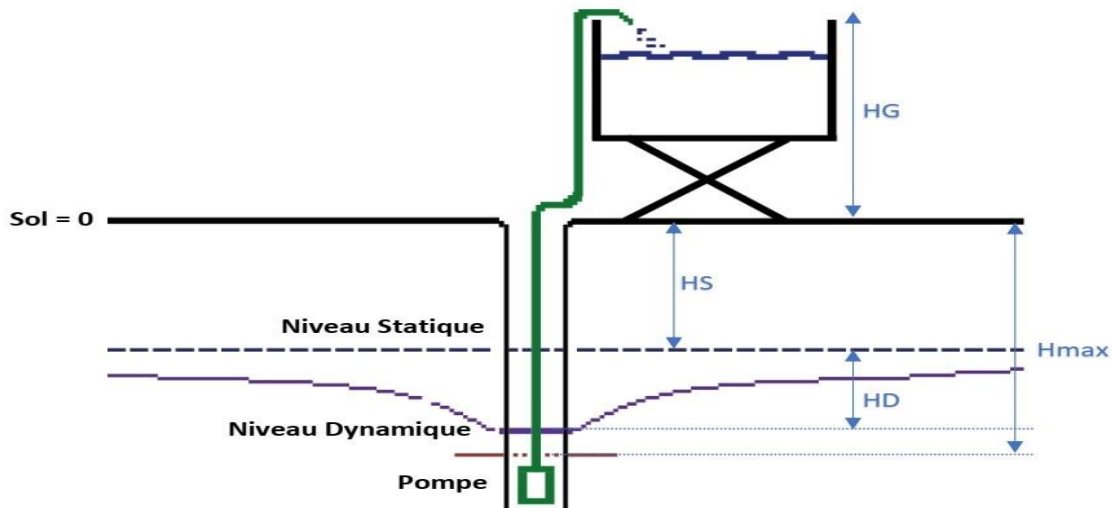


Figure II-7 Hauteur manométrique totale [77]

II.3.3.3 Dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque

Le dimensionnement précis d'un système de pompage photovoltaïque est essentiel pour assurer une fourniture d'eau fiable et adaptée aux besoins spécifiques, tout en optimisant l'utilisation de l'énergie solaire. Ce processus implique plusieurs étapes clés, chacune étant cruciale pour la performance globale du système.

a. Évaluation des besoins en eau

Cette étape consiste à déterminer la quantité d'eau nécessaire quotidiennement, en tenant compte des usages domestiques, agricoles ou industriels. Une estimation précise permet de dimensionner correctement la pompe et le système photovoltaïque associé.

b. Calcul de puissance hydraulique nécessaire

Une pompe est une machine qui fournit de l'énergie à un fluide en vue de son déplacement d'un point à un autre. L'expression générale de la puissance hydraulique est donnée comme suit :

$$P_h = \frac{\rho \cdot g \cdot Qn \cdot HMT}{3600}$$

Où :

- **P_h** : Puissance hydraulique en W/jour.
- **ρ** : Densité de l'eau (1000 kg/m³).
- **g** : Accélération due à la gravité (9,81 m/s²).
- **Q** : Le débit horaire (m³/h).
- **n** : Nombre de pompe.
- **HMT** : La hauteur manométrique totale (m).

Cette formule permet de quantifier l'énergie nécessaire pour élever un certain volume d'eau à une hauteur donnée, en tenant compte des pertes de charge et de l'efficacité du système.

C. Puissance mécanique :

L'autre expression à considérer est celle de la puissance absorbée par une pompe, c'est à dire la puissance nécessaire pour son entraînement mécanique, qui est exprimé par la relation suivante :

$$P_m = \frac{P_h}{\eta_p}$$

P_m : Puissance mécanique du moteur(W).

η_p : Le rendement de la pompe.

d. Puissance électrique :

$$P_{éle} = \frac{P_m}{\eta_m}$$

P_{éle} : Puissance électrique(W).

η_m : Le rendement de moteur.

e. Puissance électrique demandée :

$$P_d = \frac{P_{\acute{e}le}}{\eta_{ond}}$$

P_d : Puissance électrique demandée (W).

η_{ond} : Le rendement d'onduleur

f. L'énergie électrique consommé :

$$E_c = P_d \times h_{pomp\grave{a}ge}$$

h : Le nombre heures d'irrigation

g. La puissance du champ photovoltaïque

$$P_{PV} = (P_{rate} \times N_{pv} \times D_f) \left(\frac{G}{G_{ref}} \right) (1 + K_t(T_{cell} - T_{ref})) [79]$$

Avec :

$$T_{cell} = T_{amb} + G \left(\frac{NOCT-20}{800} \right)$$

P_{pv} : Puissance de sortie effective du champ PV (W).

P_{rate} : Puissance nominale d'un module PV (W).

N_{pv} : Nombre de panneaux photovoltaïques.

D_f : Facteur de salissure (Dust factor, typiquement (0,8)).

G : Irradiation solaire incidente réelle (W/m²).

G_{réf} : Irradiation de référence (généralement 1000 W/m², STC).

K_t : Coefficient de température de puissance (%/°C ou fraction/°C).

T_{cell} : Température de la cellule PV (°C).

T_{réf} : Température de référence (25 °C généralement).

T_{amb} : Température ambiante (°C).

NOCT : Température nominale de fonctionnement en conditions normales (généralement 44–48 °C).

h. Nombre de panneaux :

$$N_M \geq P_g/P_s$$

- **Nombre de modules en série :**

Le nombre des modules en série est calculé par l'expression suivante :

$$N_{MS} = \frac{V_{ch}}{V_m}$$

V_{ch} : la tension exigée à l'entrée du convertisseur de puissance.

V_m : la tension fournie par le module photovoltaïque au point de la puissance maximale.

- **Nombre de modules en parallèle :**

Le nombre des modules en parallèle est calculé par l'expression suivante :

$$N_{MP} = \frac{N_M}{N_{MS}}$$

- **Correction de la puissance crête :**

Dans la plupart des cas, les nombres de modules (en séries et/ou en parallèles) calculés ne sont pas des entiers ; il faut donc les arrondir pour trouver la nouvelle puissance corrigée.

- **La surface de générateur photovoltaïque :**

La surface de générateur photovoltaïque est calculée par la formule suivante :

$$S_g = S_m \times N_m$$

Avec :

S_m : La surface de panneau (module) photovoltaïque (m^2).

N_m : nombre total de modules PV.

II.3.3.4 Dimensionnement de la pompe :

Le choix de la pompe est basé sur les deux facteurs suivants :

- La hauteur manométrique totale HMT.
- Le débit horaire Q_h .

$$Q = \frac{V[m^3/jour]}{h}$$

II.4 Cas d'étude : Zone de Hadhoudi – Ourmes (Wilaya d'El Oued, Algérie) :

La zone de Hadhoudi – Ourmes, située dans la wilaya d'El Oued, se distingue par son activité agricole intensive, notamment la culture de la pomme de terre, qui représente environ 40 % de la production nationale. Cette région, caractérisée par un climat désertique, dépend fortement de l'irrigation pour maintenir sa production agricole. Les systèmes d'irrigation, principalement pivotants, fonctionnent souvent entre 6 et 18 heures par jour, avec une préférence pour les heures nocturnes afin de réduire les coûts énergétiques. Cette demande énergétique accrue, surtout en été, met en évidence la nécessité d'une source d'énergie stable et durable pour soutenir l'agriculture locale.

Les agriculteurs de Hadhoudi – Ourmes sont confrontés à des défis énergétiques majeurs, notamment une dépendance aux générateurs diesel coûteux et polluants, ainsi qu'à un réseau électrique centralisé instable. Ces problèmes entraînent des interruptions fréquentes de l'approvisionnement en électricité, affectant négativement les activités agricoles, et entraîne des fluctuations de production pour Sonelgaz (Différentes régime de production) qui nécessite l'intervention des différents opérateurs de système électriques [80].

L'adoption de systèmes d'énergie renouvelable décentralisés, tels que les installations photovoltaïques, offre une solution prometteuse pour répondre à ces défis. Ces systèmes peuvent fournir une énergie propre, réduire les coûts opérationnels et améliorer la fiabilité de l'approvisionnement énergétique pour les agriculteurs, dans ce cadre notre proposition est donc d'installer des panneaux photovoltaïques dans les terres agricoles (comme site choisie) et on étudie l'influence de l'énergie produite sur la stabilisation de production géré par Sonelgaz [81].

La région bénéficie d'un ensoleillement abondant, avec des niveaux de radiation solaire parmi les plus élevés en Afrique du Nord. Ce potentiel solaire élevé rend l'installation de systèmes photovoltaïques particulièrement avantageuse. En intégrant ces systèmes dans les exploitations agricoles, les agriculteurs peuvent non seulement répondre à leurs besoins énergétiques pour l'irrigation, mais aussi contribuer à la stabilisation du réseau électrique local en injectant l'excédent d'énergie produit. Cette approche favorise une agriculture plus durable et résiliente face aux défis climatiques et énergétiques [82].

Le choix d'implanter une installation photovoltaïque dans la région de Hadhoudi – Ourmes repose sur plusieurs atouts techniques et environnementaux vérifiables :

- **Proximité au réseau électrique interconnecté d'El Oued** : La zone de Hadhoudi se situe à environ 15 km du centre urbain d'Ourmes, à proximité des infrastructures de Sonelgaz, facilitant ainsi le raccordement au réseau électrique national pour l'injection de l'excédent de production solaire.
- **Disponibilité foncière** : De vastes terrains agricoles peu exploités ou en jachère ont été recensés dans les zones adjacentes aux exploitations agricoles. Ces espaces offrent une surface vacante suffisante pour l'installation de panneaux photovoltaïques, sans empiéter sur les zones cultivées.
- **Engagement des agriculteurs** : D'après une étude menée par le CDER et relayée par l'Université d'El Oued, de nombreux agriculteurs de la région ont exprimé un intérêt croissant pour l'autonomie énergétique, notamment pour l'irrigation des cultures de pomme de terre et de palmiers dattiers, fortement consommatrices d'énergie en période estivale [83].
- **Potentiel solaire élevé** : La région bénéficie d'une irradiation solaire annuelle moyenne dépassant 2000 kWh/m²/an, ce qui en fait un site optimal pour la production photovoltaïque, selon les données de l'Office National de la Météorologie et confirmées dans les projets pilotes du sud-est algérien.

Ces paramètres réunis rendent la région de Hadhoudi – Ourmes idéalement positionnée pour accueillir une installation solaire de moyenne à grande capacité, apte à :

- **Réduire la pression sur le réseau national** (notamment en heures de pointe) ;
- **Assurer une irrigation stable et continue des cultures** ;
- **Participer activement à la stabilisation de la production énergétique régionale.**

II.4.1 Méthodologie

La stratégie consiste à encourager les agriculteurs à allouer une part variable de leurs terres agricoles pour l'installation de panneaux photovoltaïques, dont l'énergie sera principalement utilisée pour l'irrigation durant les heures creuses (entre 09h00 et 16h00), ce qui permet de réduire les coûts liés aux tarifs horaires élevés.

En parallèle, l'électricité excédentaire produite peut être injectée dans le réseau électrique national exploité par Sonelgaz, contribuant à la stabilisation de la tension et de la fréquence du système

électrique, notamment dans les régions rurales soumises à des pics de demande et à des chutes de tension (fréquence nominale : ~50 Hz, tolérances observées jusqu'à ± 0.5 Hz).

Cette approche répond à plusieurs objectifs :

- Autonomiser les zones rurales agricoles
- Optimiser l'usage des énergies renouvelables
- Réduire la dépendance aux générateurs thermiques coûteux
- Soutenir le réseau national en période de charge

Malgré l'absence actuelle d'un cadre réglementaire clair pour la vente d'électricité par les citoyens, plusieurs travaux suggèrent que ce modèle décentralisé est à la fois viable et souhaitable pour l'Algérie à long terme, à condition que les politiques énergétiques suivent l'essor technologique déjà en cours.

Cette approche est justifiée par plusieurs facteurs clés :

- Le potentiel solaire exceptionnel du Sahara algérien, avec un ensoleillement moyen de plus de 3 000 heures/an et des irradiances de 5 à 7 kWh/m²/jour [84].
- La difficulté d'extension des réseaux conventionnels et le coût élevé de l'électrification classique dans les zones isolées [85].
- La possibilité technique de connexion directe de systèmes PV au réseau basse tension, comme le montre le projet CDER d'Alger [86].

II.4.2 Situation géographique – Zone agricole de Hadhoudi (commune d'Ourmes)

La zone d'étude choisie pour ce projet est la localité agricole de Hadhoudi, située dans la commune d'Ourmes, wilaya d'El Oued, au nord-est du Sahara algérien. Elle se trouve à environ 9 km au nord-ouest du centre urbain d'El Oued, à une distance approximative de 620 km de la capitale Alger.

Hadhoudi s'inscrit dans un environnement saharien typique, caractérisé par un climat aride hyperdésertique (classification BWh de Köppen), marqué par une très forte irradiation solaire, une pluviométrie annuelle très faible (< 100 mm), et une grande amplitude thermique entre le jour et la

nuit. Ces conditions rendent cette région particulièrement favorable à l'exploitation de l'énergie solaire photovoltaïque.

La commune d'Ourmes, dont fait partie Hadhoudi, s'étend sur une superficie de 443 km² et comptait environ 10074 habitants selon le recensement de 2022. Elle comprend trois principales agglomérations : Ourmes, Legouiret et Hadhoudi. Administrativement, elle relève de la daïra de Guemar [80].

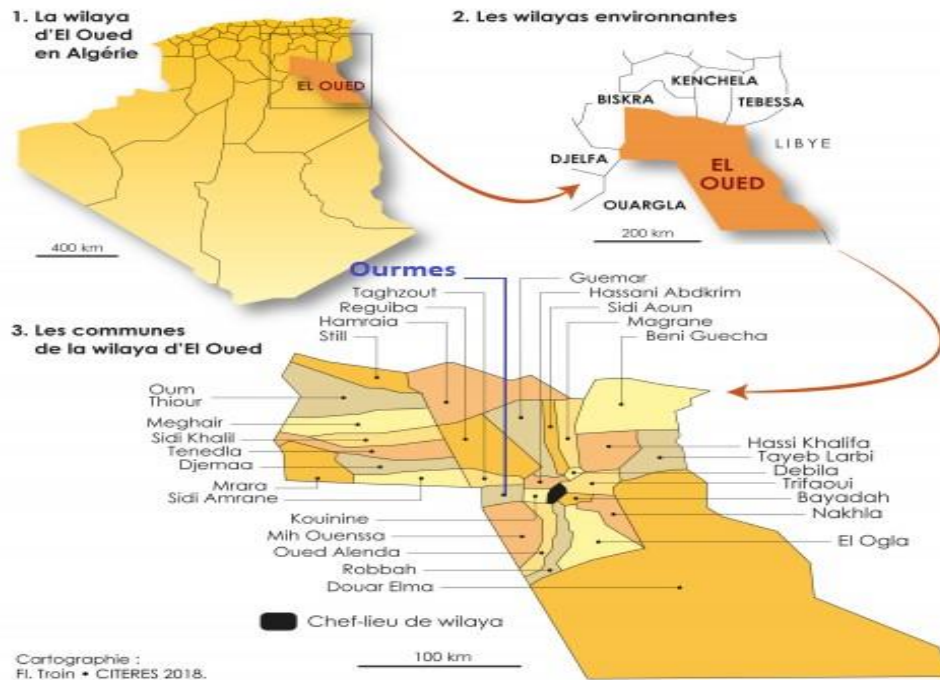


Figure II-8 Situation géographique de la Wilaya d'El Oued et la commune Ourmes [80]

II.4.3 Création des terrains (zones agricoles) :

La zone mise en évidence dans notre étude est une terre agricole qui s'étend sur des milliers d'hectares dans la région de Hadhoudi, d'une superficie plus que 7000 hectares. En utilisant le système d'information géographique (Google Earth), nous avons cartographié les terres agricoles situées dans cette région de Hadhoudi. La figure (II.9) présente la localisation du site d'étude.

Pour les besoins de cette étude, des outils de système d'information géographique (SIG), tels que Google Earth, ont été utilisés pour cartographier les terres agricoles de la région de Hadhoudi. Cette cartographie a permis d'identifier les zones propices à l'installation de systèmes photovoltaïques raccordés au réseau, en tenant compte des facteurs tels que l'ensoleillement, la topographie et la proximité des infrastructures électriques existantes.

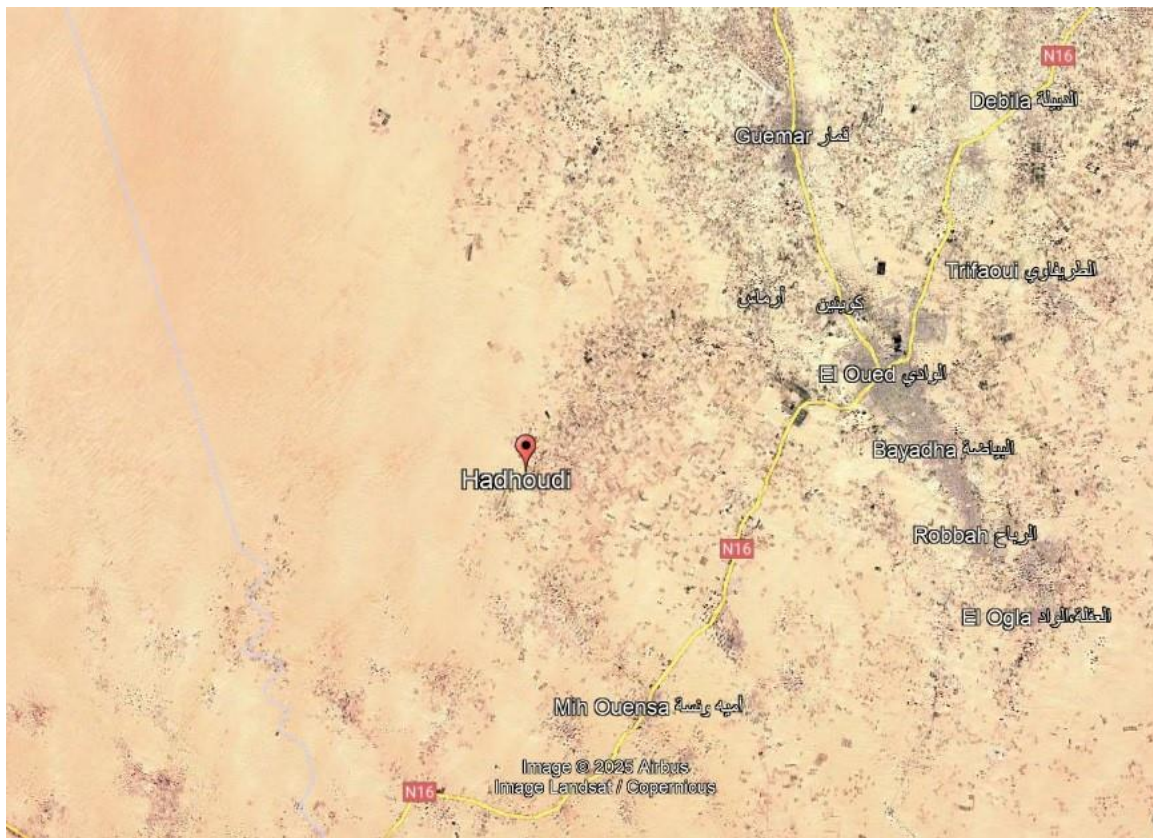


Figure II-9 Localisation de site d'étude Hadhoudi [87]

II.4.4 Étapes de dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïque (PV)

Le dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque repose sur la détermination précise de la puissance requise pour assurer le fonctionnement optimal de la pompe. La figure (II.10) présente un organigramme détaillé illustrant les différentes étapes à suivre pour le calcul de la puissance utile et la détermination de la taille adéquate du champ photovoltaïque, en tenant compte des besoins hydrauliques, des conditions climatiques locales et des caractéristiques du système.

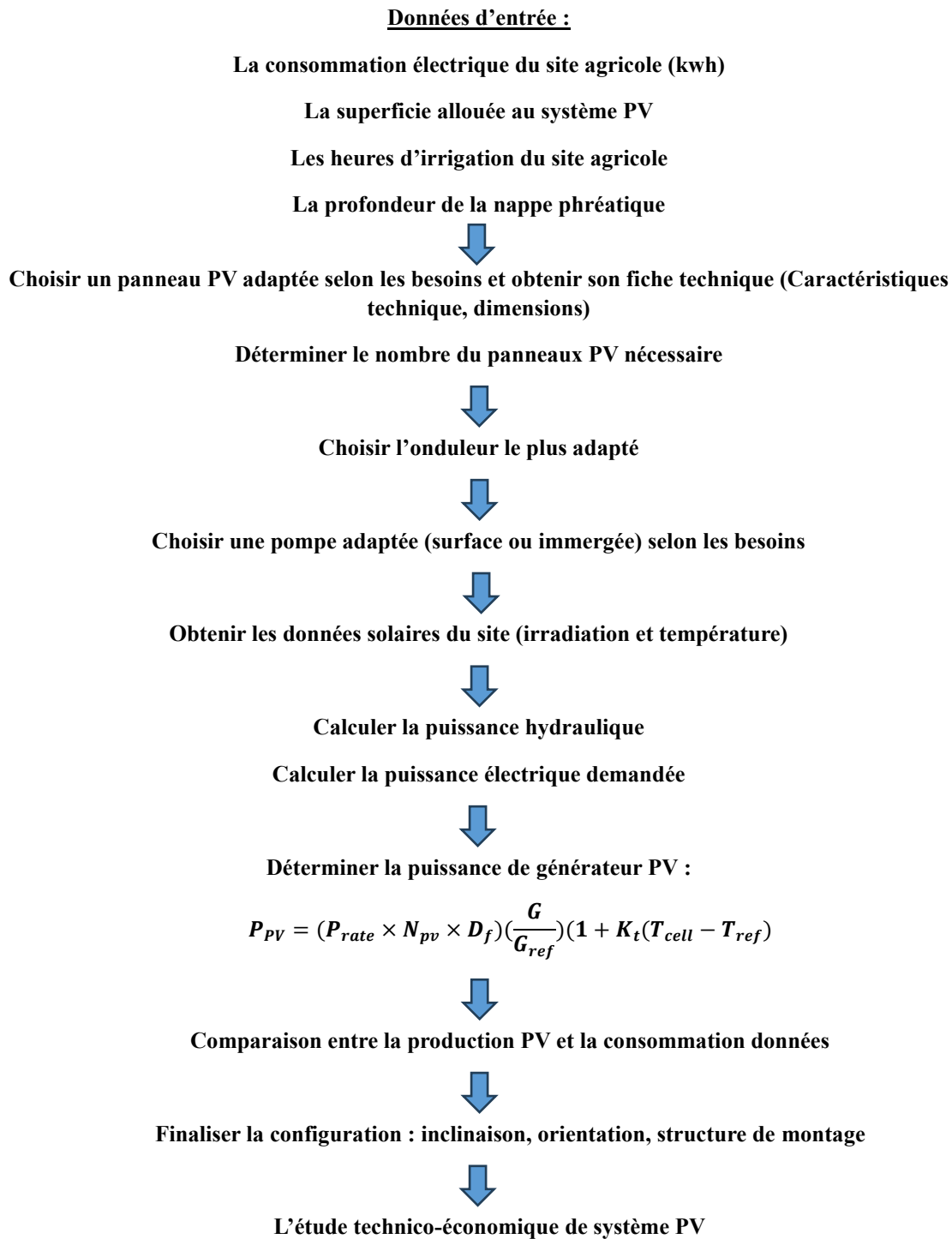


Figure II-10 Les étapes du calcul de la taille du champ PV.

II.4.4.1 La consommation électrique de région Hadhoudi (kwh)

Dans le cadre de cette étude, les données de consommation électrique horaire pour la région de Hadhoudi (commune d'Ourmes) ont été obtenues grâce à la collaboration avec la société nationale

SONELGAZ, en charge de la distribution et de la gestion du réseau électrique en Algérie. Ce jeu de données couvre une période complète de 12 mois, avec une résolution horaire, ce qui permet une analyse fine et détaillée du profil de consommation énergétique local. Ces informations sont cruciales pour dimensionner avec précision le système photovoltaïque raccordé au réseau, en assurant une correspondance entre la production solaire et les besoins réels de la zone d'étude. Elles servent également de base pour estimer les surplus potentiels d'énergie injectés dans le réseau, dans une logique d'autoconsommation partielle et de vente d'énergie excédentaire [88].

II.4.4.2 La superficie allouée au système PV

Dans le cadre de la planification du système photovoltaïque, une approche raisonnée et progressive a été adoptée pour l'allocation de la superficie agricole disponible dans la région de Hadhoudi. Sur les 1750 hectares identifiés comme surface libre potentiellement mobilisable pour des infrastructures énergétiques, de 1-3 % a été alloué à ce projet, soit 17,5 hectares. Ce choix repose sur la volonté de minimiser l'impact foncier sur les activités agricoles, tout en garantissant une production d'énergie significative adaptée à la consommation locale.

II.4.4.3 Le nombre des heures d'irrigation du site agricole

Les informations recueillies auprès des agriculteurs de la région de Hadhoudi (commune d'Ourmes) révèlent que les heures d'irrigation moyennes atteignent environ 12 heures par jour. Cette durée s'explique par les besoins hydriques importants liés au climat saharien, caractérisé par une forte évaporation, des températures élevées, et une activité agricole continue. L'irrigation est généralement répartie entre les plages horaires matinales (05h00 à 09h00) et vespérales (16h00 à 22h00). Cependant, une part importante du pompage doit être assurée durant la période de 09h00 à 16h00, qui coïncide non seulement avec les heures de fort ensoleillement (idéales pour la production photovoltaïque), mais aussi avec les tranches tarifaires les plus élevées de consommation d'électricité appliquées par SONELGAZ.

Cette contrainte tarifaire renforce la pertinence de l'installation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau, permettant aux agriculteurs de réduire leur facture énergétique en autoconsommant l'électricité produite localement, tout en injectant l'excédent dans le réseau. Le dimensionnement du champ PV a ainsi été optimisé pour couvrir les besoins hydrauliques pendant cette plage critique, contribuant à réduire les coûts d'exploitation tout en valorisant l'énergie solaire dans un cadre économique favorable.

II.4.4.4 Profondeur de la nappe phréatique

La profondeur de la nappe phréatique dans la région de Ourmes, située dans la wilaya d'El Oued, varie généralement entre 30 et 50 mètres, selon les témoignages des agriculteurs locaux. Cette estimation est cohérente avec les données hydrogéologiques disponibles pour la vallée du Souf, où les niveaux piézométriques fluctuent en fonction de divers facteurs tels que les conditions climatiques, les pratiques d'irrigation et les caractéristiques géologiques locales [89].

Il est important de noter que la région d'El Oued a connu des phénomènes de remontée de la nappe phréatique, notamment dans les zones urbaines et les dépressions agricoles appelées "ghouts". Ces remontées sont principalement dues à des infiltrations excessives provenant de l'irrigation, des eaux usées et des pertes des réseaux d'alimentation en eau potable, entraînant parfois des situations où le niveau de la nappe dépasse la surface du sol [89].

Dans les zones agricoles périphériques, telles que Ourmes, les niveaux de la nappe sont généralement plus stables et situés à des profondeurs modérées, ce qui est favorable pour les activités agricoles et le dimensionnement des systèmes de pompage. Cependant, il est essentiel de surveiller régulièrement ces niveaux pour adapter les infrastructures hydrauliques et prévenir d'éventuels problèmes liés à la remontée ou à l'abaissement de la nappe.

Comment déterminer le nombre de panneaux photovoltaïques (PV) nécessaires ?

La détermination du nombre de panneaux solaires est une étape clé dans la conception d'un système photovoltaïque, qu'il soit autonome ou raccordé au réseau. Elle dépend de l'objectif énergétique, des conditions locales, du type de panneau utilisé et de l'espace disponible.

II.4.4.5 Détermination de nombre de panneaux PV

- **Déterminer la surface disponible à exploiter**

La détermination du nombre de panneaux photovoltaïques (PV) est une étape essentielle dans le dimensionnement d'un système solaire. Elle peut se faire soit en fonction de la surface disponible, on divise la surface exploitable (en m²) par la surface d'un panneau pour connaître le nombre maximal installable.

Exemple :

Une ferme de 5 hectares avec 1% de surface libre = $0.01 \times 50,000 \text{ m}^2 = 500 \text{ m}^2$

- **Déterminer la surface d'un seul panneau PV**

Donnée dans la fiche technique du panneau.

Exemple : Le panneau EKHI 545W a une surface : $2.278 \text{ m} \times 1.134 \text{ m} = 2.583 \text{ m}^2$

- **Calcul géométrique : Nombre de panneaux maximal installables**

$N_{\text{panneaux}} = [\text{Surface disponible} / \text{Surface d'un panneau}]$

Exemple : $500 \text{ m} / 2.583 \text{ m}^2 \approx 193.6 \Rightarrow 194$ panneaux

II.4.4.6 Choix du type de panneau photovoltaïque (module)

Dans le cadre de cette étude, un comparatif technique et économique a été réalisé entre trois modèles de panneaux photovoltaïques produits localement par l'entreprise Zergoun Green Energy, un acteur reconnu du secteur des énergies renouvelables en Algérie. Les panneaux analysés présentent des caractéristiques variables en termes de puissance crête, de rendement, de dimensions, de technologie cellulaire (PERC ou Half-cut), et de performances en température.

L'objectif de cette comparaison était de sélectionner le panneau le plus performant et le plus adapté aux conditions climatiques de la région saharienne de Hadhoudi, tout en prenant en compte des critères de disponibilité sur le marché national, de coût, et de fiabilité certifiée (normes IEC 61215 et 61730).

- **Caractéristiques techniques principales**

Technologie cellulaire : cellules monocristallines PERC M10
à haut rendement

Nombre de cellules : 144 ($12 \times 6 \times 2$)

Efficacité : jusqu'à 21,5 %

Tension max. système : 1500 V

Dimensions : $2278 \times 1134 \times 35 \text{ mm}$

Poids : 29 kg

Plage de température de fonctionnement : -40°C à $+85^\circ\text{C}$

Coffret de jonction IP68, câbles de 4 mm^2

- **Avantages techniques et économiques**

Haute puissance par module : réduit significativement le nombre de modules nécessaires et donc le coût de la structure et du câblage (BOS – Balance of System)



*Figure II-11 Panneau
PV Ekhi M10 144
535Wp-555Wp [90]*

Certifications : conforme aux normes IEC 61215 :2016 et IEC 61730 :2016, assurant la fiabilité en conditions extrêmes

Excellente résistance environnementale : supporte des charges de vent (2400 Pa) et de neige (5400 Pa), ainsi que des impacts de grêle de 35 mm à 97 km/h

- **Garantie :**
 - 10 ans sur le produit
 - 25 ans de performance linéaire, garantissant une production ≥ 84.8 % à 25 ans
- **Faible coefficient de température (-0,35 %/°C) :** assure une bonne performance même sous climat saharien
- **Raisons du choix**

Ce module se distingue par un excellent compromis entre puissance, efficacité et durabilité, ce qui en fait un choix stratégique pour un projet en zone saharienne. Sa capacité à fonctionner de manière stable sous fortes températures, combinée à un rendement élevé, garantit une production énergétique optimale à long terme. De plus, le format 1500 V permet de réduire le nombre de chaînes et les pertes en ligne, rendant l'ensemble plus économique et facile à entretenir [90].

II.4.4.7 Le choix de l'onduleur (L'électronique de commande et de contrôle) :

L'onduleur, élément central d'une installation photovoltaïque, assure la conversion du courant continu (CC) produit par les panneaux solaires en courant alternatif (CA) compatible avec le réseau électrique et les appareils domestiques. Cette conversion est essentielle pour l'alimentation des charges en courant alternatif.

Le choix de l'onduleur dépend principalement des caractéristiques électriques de la charge à alimenter, notamment la puissance et la tension requises. Il est crucial de sélectionner un onduleur dont la puissance nominale est adaptée à la puissance maximale des équipements à alimenter, en tenant compte d'une marge de sécurité pour les pics de consommation.

De plus, l'onduleur joue un rôle dans l'optimisation de la production d'énergie grâce à des fonctions telles que le suivi du point de puissance maximale (MPPT), qui ajuste en temps réel les paramètres de fonctionnement pour maximiser le rendement énergétique en fonction des conditions d'ensoleillement et de température.

Pour les besoins spécifiques de notre étude, le choix du convertisseur est présenté dans le tableau suivant, en tenant compte des critères mentionnés ci-dessus. Ce choix est basé sur les

caractéristiques techniques de la pompe à alimenter et les exigences de performance de l'installation, pour notre étude nous avons choisissons l'onduleur SMA Sunny Tripower 25000TL [91].



Figure II-12 Onduleur SMA Sunny Tripower 25000TL [91]

Caractéristiques principales :

Tableau II-2 Caractéristique de l'onduleur SMA Sunny Tripower 25000TL [91]

Paramètre	Valeur
Puissance nominale AC	25 000 W
Puissance apparente maximale AC	25 000 VA
Tension nominale AC	3 / N / PE ; 220–240 / 380–415 V
Plage de tension AC	160 – 280 V
Fréquence AC	50 Hz / 60 Hz
Courant de sortie maximal AC	36,2 A
Facteur de puissance (cos ϕ)	1 (réglable de 0,8 inductif à 0,8 capacitif)
Puissance maximale d'entrée DC	45 000 W
Tension d'entrée DC maximale	1 000 V
Tension d'entrée DC nominale	600 V
Plage de tension MPP	390 – 800 V
Nombre de trackers MPP	2
Courant d'entrée maximal par tracker	33 A
Rendement maximal	98,4 %
Rendement européen	98,0 %
Consommation nocturne	1 W

Paramètre	Valeur
Dimensions (L x H x P)	661 x 682 x 264 mm
Poids	61 kg
Plage de température de fonctionnement	-25 °C à +60 °C
Indice de protection	IP65
Refroidissement	OptiCool (sans ventilateur)
Interfaces de communication	RS485, Bluetooth®, Webconnect (en option)
Type de connexion DC	SUNCLIX
Type de connexion AC	Bornes à ressort
Certifications	CE, VDE0126-1-1, G59/2, AS4777, IEC 61727, etc.

Justification du choix :

- **Compatibilité avec les panneaux EKHI M10-144** : Les panneaux EKHI M10-144 ont une puissance de 535 à 555 Wc. En associant environ 45 à 47 panneaux, on atteint une puissance totale de 24 à 26 kWc, correspondant à la capacité de l'onduleur SMA Sunny Tripower 25000TL.
- **Disponibilité sur le marché algérien** : SMA est une marque reconnue et ses produits sont distribués en Algérie, assurant un support technique et une maintenance locale.
- **Efficacité énergétique** : Avec un rendement maximal de 98.4%, cet onduleur assure une conversion optimale de l'énergie produite par les panneaux.
- **Flexibilité d'installation** : Les deux trackers MPPT permettent une meilleure gestion des variations d'ensoleillement, optimisant la production même en cas d'ombrage partiel.

Le résultat du tableau comparatif, a permis de justifier le choix du module monocristallin EKHI M10-144 d'une puissance de 535–555 Wc, qui combine à la fois haute efficacité énergétique (jusqu'à 21,5 %), résistance aux températures élevées, et rentabilité à long terme, ce qui le rend parfaitement adapté à une installation à grande échelle dans un environnement désertique

II.4.4.8 Obtenir les données solaires du site (irradiation et température)

Pour obtenir des données solaires précises d'un site donné, comme l'irradiation globale (GHI) et la température ambiante, le logiciel Meteonorm constitue une référence professionnelle largement utilisée dans les études énergétiques. Ce logiciel permet d'accéder à une base de données

climatologiques fiable, issue de mesures satellites et de stations météorologiques locales. L'utilisateur sélectionne simplement les coordonnées géographiques du site d'étude (latitude, longitude, altitude), puis Meteonorm génère des profils horaires, journaliers ou mensuels d'irradiance solaire (GHI, DNI, DHI) et de température sur une année type (fichier TMY). Ces données peuvent être exportées sous des formats compatibles avec des logiciels de simulation photovoltaïque comme PVsyst, HOMER, SAM ou même Excel. En utilisant Meteonorm, le concepteur garantit que le dimensionnement et l'analyse énergétique du système PV s'appuient sur des conditions climatiques réalistes, spécifiques au site, ce qui améliore la précision des prévisions de production et de rentabilité.

II.4.4.9 Calculer la puissance hydraulique

Dans la région agricole de Hadhoudi (commune d'Ourmes), les besoins en eau sont fortement liés au type de culture pratiqué, principalement les cultures sous pivot d'irrigation. Chaque pompe de 10 chevaux alimente en moyenne deux pivots, avec un débit nominal de 25 m³/h. Sur cette base, chaque pivot reçoit environ 12,5 m³/h, ce qui est suffisant pour couvrir les besoins hydriques pendant les périodes critiques de croissance.

Les agriculteurs locaux rapportent que l'irrigation sous pivot s'effectue à raison de 12 heures par jour durant la période de culture active — à savoir les mois de janvier, mars, avril, mai, novembre et décembre. Cela correspond à un volume journalier d'environ 150 m³/pivot/jour, soit 300 m³/jour par pompe. En extrapolant ces données à l'échelle d'une exploitation équipée de plusieurs pivots, les besoins en eau peuvent atteindre plusieurs milliers de mètres cubes par semaine, ce qui justifie l'installation d'un système de pompage photovoltaïque performant et durable, capable de fournir une énergie suffisante, stable et à moindre coût.

L'intégration de ces besoins dans le dimensionnement énergétique permet de garantir une adéquation entre la production photovoltaïque, la puissance de pompage, et la demande réelle en eau. Cela est essentiel pour assurer à la fois l'autonomie énergétique des exploitations agricoles et la durabilité de la ressource en eau.

II.4.4.10 Choix de la pompe :

Le choix de la pompe constitue un élément technique crucial dans le dimensionnement du système de pompage photovoltaïque. Après analyse des conditions spécifiques de la région de Hadhoudi, notamment une profondeur de nappe phréatique variant entre 30 et 50 mètres, un débit requis de 25 m³/h pour irriguer deux pivots, et une durée d'irrigation moyenne de 12 heures par jour, la

pompe immergée Aqua AQ40-200A a été retenue comme solution optimale. Ce modèle offre une puissance de 7.5 kW (10 CV), une hauteur manométrique maximale de 54 mètres, ainsi qu'un débit nominal conforme aux exigences agricoles locales. Son fonctionnement en triphasé 380 V et sa protection IP54 garantissent sa compatibilité avec une alimentation via onduleur raccordé à un champ photovoltaïque. Ce choix assure non seulement une réponse adaptée aux contraintes hydrauliques du site, mais aussi une intégration énergétique efficace dans le cadre du système PV étudié (voir le tableau comparatif).

Tableau II-3 Tableau comparatif de pompes [92]

Caractéristiques	Pompe 1 – Aqua AQ40-200A	Pompe 2 – 1SR20-20-5.5-7.5HP	Pompe 3 – TopPump 4SR10-37-7.5(H)
Marque	Aqua	MultiPump	TopPump
Modèle	AQ40-200A	1SR20-20-5.5-7.5HP	4SR10-37-7.5(H)
Puissance (kW)	7.5	5.5	7.5
Puissance (HP)	10	7.5	10
Débit (Q max)	25 m ³ /h	~20 m ³ /h (estimé)	14.5 m ³ /h
Hauteur manométrique (Hmax)	36–54 m	0–29.8 m	230–2 m
Fréquence (Hz)	50	50	50
Tension	380 V	Non spécifiée	Non spécifiée
Vitesse de rotation	2900 tr/min	2850 tr/min	2850 tr/min
Diamètre de sortie	Non spécifié	2"	2"
Classe d'isolation / IP	CI B / IP 54	Non spécifié	Non spécifié

II.5 Conclusion :

Ce chapitre a posé les fondations techniques et contextuelles du projet d'installation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau dans la zone agricole de Hadhoudi – Ourmes, au sein de la wilaya d'El Oued. Il a permis d'examiner les principes de fonctionnement des installations solaires

connectées au réseau, ainsi que leurs composants essentiels, notamment les modules PV, les onduleurs et les systèmes de pompage.

Un dimensionnement rigoureux des composants a été effectué, basé sur les besoins énergétiques du site, les conditions environnementales locales, et les données d'ensoleillement. Les calculs ont intégré les contraintes thermiques, les pertes, et les performances réelles des équipements, afin d'assurer un rendement optimal du système.

L'étude s'est également appuyée sur une analyse spatiale détaillée de la région de Hadhoudi à l'aide d'outils SIG, pour identifier les zones exploitables, les superficies disponibles, et l'adéquation technico-économique du projet à l'échelle locale. Le choix du panneau photovoltaïque EKHI M10-144, fabriqué localement par Zergoun Green Energy, ainsi que la sélection d'une pompe adaptée et d'un onduleur compatible, ont été justifiés sur la base de critères techniques, climatiques et économiques.

Ainsi, ce chapitre a permis de structurer l'ensemble des paramètres techniques nécessaires à la conception du système. Il constitue une étape clé dans la transition vers le chapitre suivant, qui portera sur l'évaluation technico-économique à long terme de l'installation, avec une projection réaliste jusqu'à l'horizon 2045.

Chapter III

RESULTATS ET DISCUSSION

III.1 INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à la présentation, l'analyse et l'interprétation des résultats obtenus dans le cadre de l'étude technico-économique d'un système photovoltaïque raccordé au réseau pour l'irrigation agricole dans la région de Hadhoudi – Ourmes. Il s'appuie sur des données réelles de consommation horaire fournies par SONEGAS, couplées aux simulations de production énergétique basées sur le dimensionnement du générateur photovoltaïque réalisé dans le chapitre précédent.

L'objectif principal de cette partie est d'évaluer la capacité du système PV à répondre aux besoins énergétiques réels du site, en analysant notamment la concordance temporelle entre production et consommation, ainsi que les possibilités d'autoconsommation et d'injection dans le réseau. Elle permet également de quantifier les économies potentielles en termes de facture énergétique, et d'identifier les retours sur investissement attendus à l'horizon 2045.

Les résultats présentés dans ce chapitre serviront de base aux recommandations techniques et économiques du projet, et permettront d'évaluer la faisabilité réelle et l'impact à long terme d'une telle solution dans un contexte agricole saharien.

III.2 La chaîne de conversion

Le fonctionnement d'une centrale solaire photovoltaïque repose sur un principe simple et efficace. Elle se compose principalement d'un champ de modules photovoltaïques, connectés entre eux en série et/ou en parallèle, et reliés à un ou plusieurs onduleurs. L'énergie solaire captée est convertie directement en électricité continue (DC) par les panneaux, puis transformée en courant alternatif (AC) via les onduleurs, avant d'être injectée dans le réseau électrique. La figure (III.1) illustre le schéma de cette chaîne de conversion.[93]

Le système électrique national est structuré en plusieurs niveaux hiérarchiques, chacun jouant un rôle spécifique et fonctionnant sous des niveaux de tension adaptés à son usage. Il se divise généralement en trois grandes catégories : le réseau de transport, assurant l'acheminement à haute tension sur de longues distances ; le réseau de répartition, pour la distribution régionale ; et enfin le réseau de distribution, qui alimente directement les utilisateurs finaux (ménages, industries, exploitations agricoles, etc.).[94]

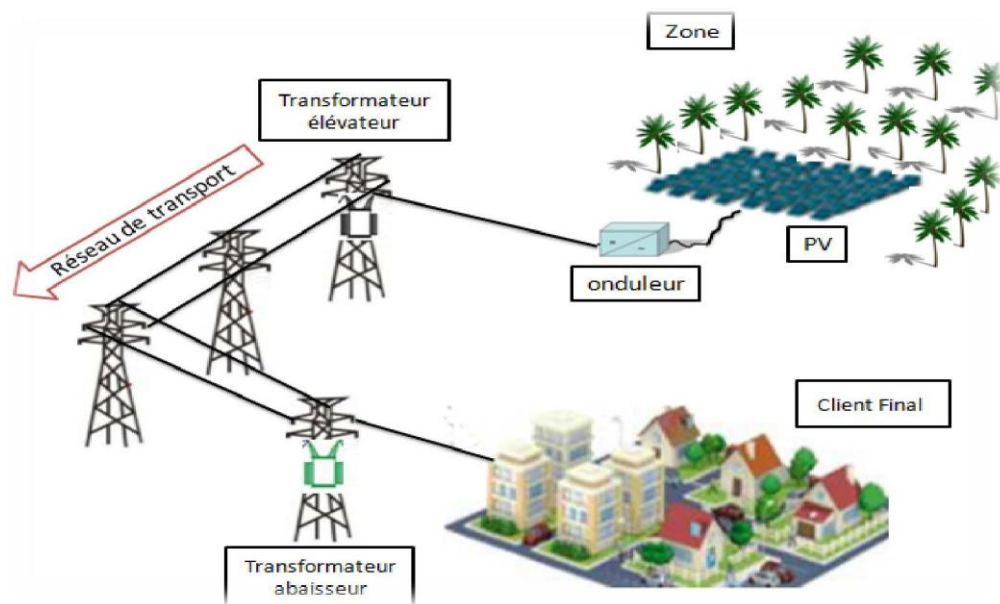


Figure III-1 Schéma de la Chain conversion.[95]

III.2.1 L'onduleur couplé au réseau

Dans une centrale solaire photovoltaïque, le fonctionnement repose sur un principe simple : un ensemble de modules solaires, connectés entre eux en série et en parallèle, forme un champ photovoltaïque relié à un ou plusieurs onduleurs. Ces onduleurs jouent un rôle central dans le système, en assurant la conversion du courant continu (DC) produit par les panneaux en courant alternatif (AC), compatible avec le réseau électrique national. Une fois convertie, l'énergie est directement injectée dans le réseau. La **figure (III.2)** illustre de manière schématique cette chaîne de conversion.

Le réseau électrique, quant à lui, est organisé en trois grands niveaux, chacun ayant une fonction bien définie et opérant à des niveaux de tension spécifiques :

- Le **réseau de transport**, qui achemine l'électricité à haute tension sur de longues distances;
- Le **réseau de répartition**, qui relaie l'énergie à l'échelle régionale ;
- Et enfin, le **réseau de distribution**, qui fournit l'électricité aux utilisateurs finaux (ménages, entreprises, exploitations agricoles, etc.).

L'onduleur couplé au réseau constitue donc un maillon essentiel de cette chaîne, garantissant la synchronisation entre la production photovoltaïque et les standards du réseau électrique.[96]

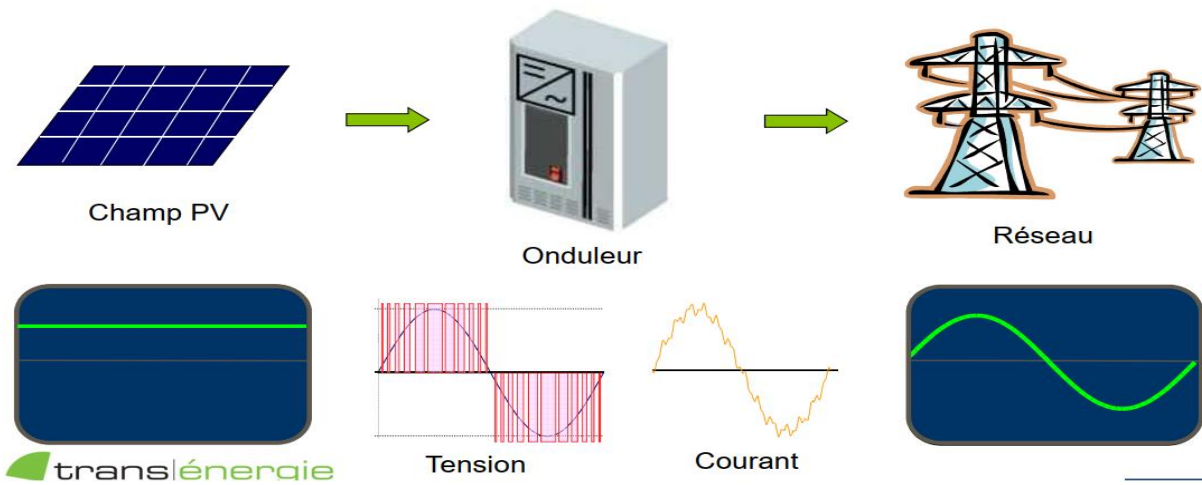


Figure III-2 Schéma L'ondeur couplé au réseau[79]

III.2.2 Le point de livraison

Le point de livraison correspond à l'endroit où l'électricité produite est injectée ou prélevée du réseau, conformément au contrat établi avec le fournisseur d'énergie. L'un des éléments clés de ce contrat est la puissance souscrite, qui représente la puissance maximale autorisée à être utilisée ou injectée à ce point. Il est important de ne pas dépasser cette limite, sous peine de pénalités ou de coupures.

Cette puissance est généralement exprimée en kilovoltampères (kVA), et non en kilowatts (kW), car elle inclut à la fois la puissance active (réellement consommée) et la puissance réactive, liée aux phénomènes de déphasage dans les équipements électriques. Ainsi, le kVA donne une image plus complète de la charge électrique imposée au réseau.

III.2.3 Le transformateur de puissance

Le transformateur de puissance joue un rôle fondamental dans le développement et l'efficacité des réseaux électriques à courant alternatif. C'est grâce à lui que le transport et la distribution de l'énergie sur de longues distances sont devenus techniquement et économiquement viables.

Sa fonction principale est de modifier les niveaux de tension en fonction des besoins : en élevant la tension pour le transport de l'électricité (ce qui réduit le courant et donc les pertes par effet Joule dans les lignes), puis en l'abaissant aux niveaux requis pour la consommation finale (basse ou moyenne tension).

Au-delà de cette fonction classique, le transformateur est également un élément clé d'interconnexion entre les différents segments du réseau électrique — production, transport, distribution — assurant ainsi la stabilité et la continuité d'alimentation. La figure (III.3) illustre le rôle et la structure d'un transformateur de puissance dans le système énergétique.



Figure III-3 Le Transformateur de puissance [95]

Le transformateur de puissance a pour mission principale d'adapter les niveaux de tension entre les différents nœuds d'un réseau électrique, afin de permettre une connexion efficace et sécurisée entre les parties amont et aval du système. En plus de cette fonction de conversion de tension, il joue un rôle protecteur important dans le réseau : il contribue à limiter les courants de défaut, qu'il s'agisse de courts-circuits symétriques (triphases) ou asymétriques (monophasés ou biphasés), en réduisant leur impact sur les équipements.

Le transformateur permet également d'isoler électriquement deux segments du réseau, ce qui rend possible, par exemple, le changement de régime de neutre entre l'amont et l'aval — une opération courante dans les architectures complexes de distribution. Enfin, il peut aussi intervenir dans la réduction ou la suppression des perturbations harmoniques, améliorant ainsi la qualité de l'énergie délivrée.[97]

III.2.4 Les compteurs intelligents

Les compteurs intelligents sont des dispositifs de mesure avancés, intégrant des technologies de communication qui permettent de suivre en temps réel la consommation énergétique d'un utilisateur. Contrairement aux compteurs traditionnels, ils sont capables de transmettre

automatiquement ces données au fournisseur d'électricité, sans intervention manuelle. La figure (III.4) illustre un exemple de compteur intelligent utilisé dans ce type de système.

Ces compteurs jouent un rôle essentiel dans la gestion des réseaux électriques modernes, notamment ceux qui intègrent des sources d'énergie décentralisées comme les installations photovoltaïques. Grâce à leurs capacités de communication et d'analyse, ils permettent un pilotage dynamique de la consommation et de la production, améliorant ainsi la stabilité, la flexibilité et l'efficacité du réseau électrique.

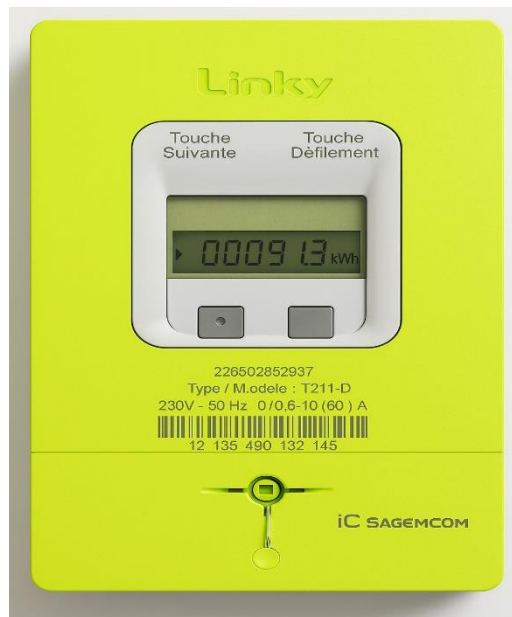


Figure III-4 Un compteur intelligent[95]

Dans un réseau électrique intelligent, un simple utilisateur ne se limite plus au rôle de consommateur : il peut également devenir producteur d'énergie, notamment grâce à des installations photovoltaïques domestiques. Le réseau doit donc être capable de gérer cette double fonction, en facilitant à la fois l'injection et la consommation d'énergie.

Les compteurs intelligents jouent ici un rôle central. Ils permettent à l'utilisateur de suivre sa consommation en temps réel et d'y accéder via différents supports connectés, tels que ordinateurs, tablettes ou smartphones. Cette transparence énergétique offre à chacun la possibilité de mieux maîtriser ses usages, d'identifier les sources de gaspillage, et ainsi de réduire facilement sa consommation d'électricité de manière autonome et informée.[98]

III.3 Consommation total SONELGAZ (Hadhoudi)

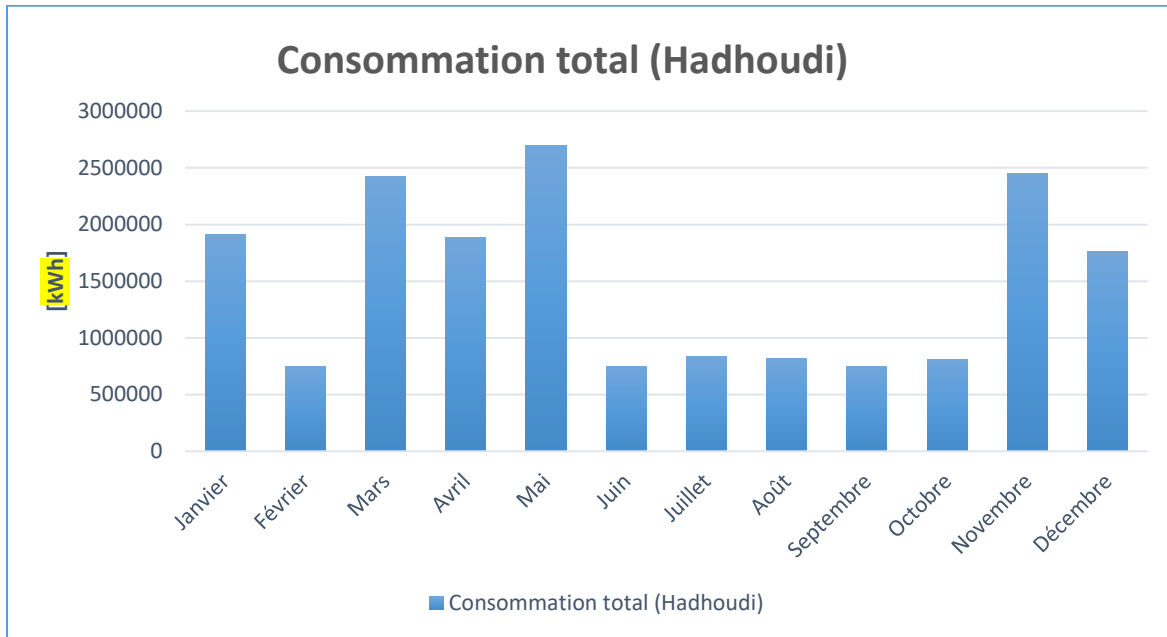


Figure III-5 Consommation mensuel total SONELGAZ (Hadhoudi)

Les détails d'obtention de la consommation sont présentés dans la section II.4.4.1 . Nous remarquons que la consommation d'électricité dépend de la période agricole de l'année et des produits choisis par les agriculteurs, elle est élevée dans les mois novembre décembre, janvier, mars, Avril et mai.

La consommation obtenue de SONELGAZ donne une bonne vision du volume de besoin énergétique dans la région mais il ne représente pas la consommation réelle en cas où tout l'espace agricole est utilisé. Afin d'obtenir des résultats plus précis nous allons calculer les besoins énergétiques maximal estimé dans les paragraphes suivants.

III.4 Consommation MAX estimé

La Figure III-6 représente une image de la ferme témoin étudiée avec une surface de 20,3 Ha. Le nombre de pivots et aussi la surface libre sont bien présentés dans la figure.

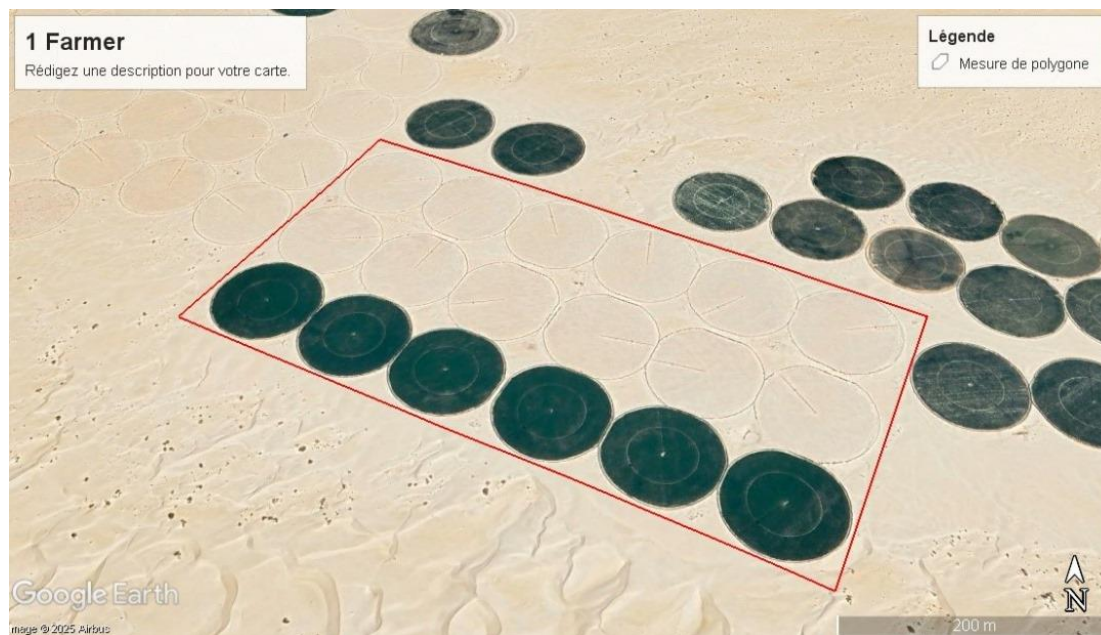


Figure III-6 image de la ferme témoin étudié

La consommation d'énergie électrique a été estimée après avoir choisi la pompe optimale. Dans cette étude nous avons choisi la pompe d'après les modèles disponibles sur le marché local. Aussi les données d'irrigation sont obtenues à partir des agriculteurs et les données utilisées pour le calcul sont présentées dans le Tableau III-1.

Tableau III-1 données utilisées pour estimer la consommation

Une pompe pour deux pivots	Les heures d'irrigation moyenne	La surface de ferme	Nombre total pour chaque ferme
7.5 kW	12 h /J	20,3 ha	9 pompes (témoin)

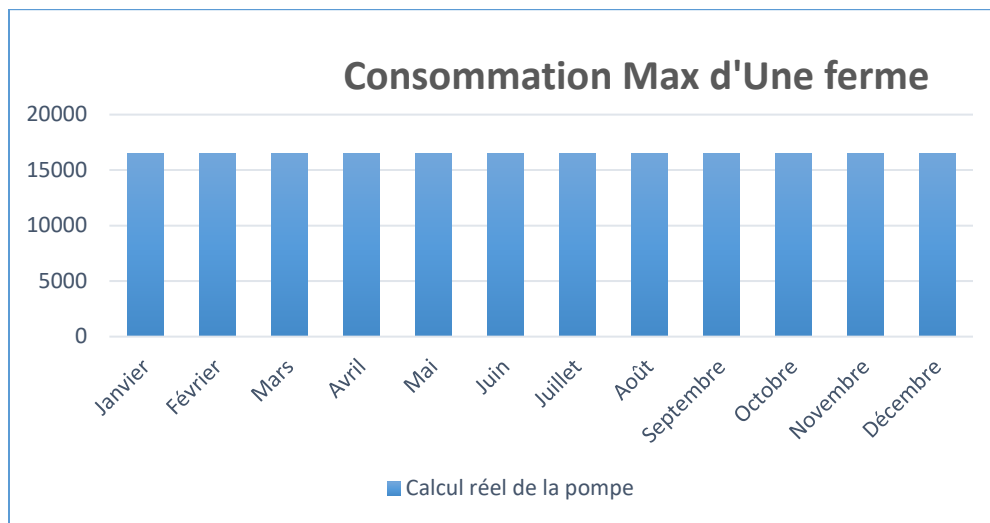


Figure III-7 Consommation MAX estimé d'une seule ferme

Les figures Figure III-7 et Figure III-8 représente respectivement la consommation MAX estimé d'une ferme et de la région HADHOUDI. La consommation d'énergie annuel pour l'irrigation est 197640 kWh. Dans cette étude comme hypothèse nous avons partagé la consommation annuelle par les 12 mois de l'année. La surface totale d'une seule ferme et de la région Hadhoudi sont représenté dans le Tableau III-2.

Tableau III-2 la surface totale d'une seule ferme et de la région Hadhoudi

	Région Hadhoudi	Une Ferme
Surface (hectare)	7000	20.3
Surface Agricole (hectare)	5250	15.3

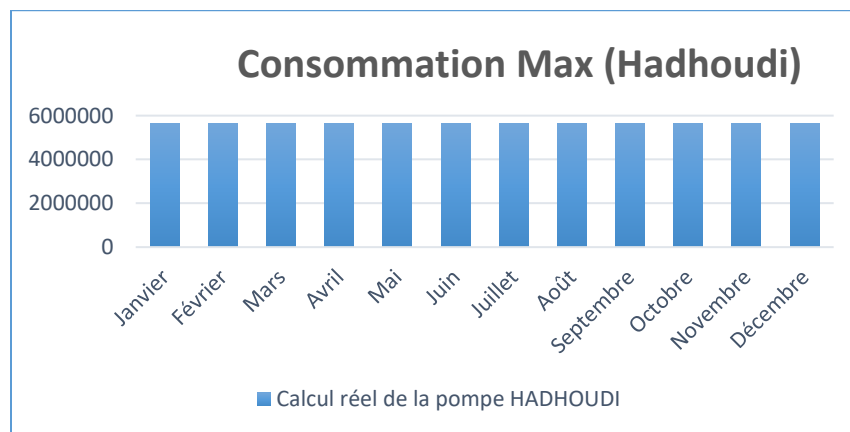


Figure III-8 Consommation MAX estimé de la region HADHOUDI

III.4.1.1 Production PV

Sur la base des données climatiques et rayonnement solaire de la région nous avons calculé l’Energie produite par une seule ferme et aussi par la région Hadhoudi.

Tableau III-3 nombres des panneaux PV nécessaire pour chaque cas

	Région Hadhoudi	Plusieurs Fermes	1 Ferme
Surface (hectare)	7000	278.75	20.3
Surface Agricole (hectare)	5250	206.55	15.3
Surface libre (hectare)	1750	72.2	5
Surface Projet PV 1%(hectare)	17.5	0.722	0.05
Surface de panneau EKHI 144 (m)	2.583	2.583	2.583
Nbre de Panneaux PV 1%(hectare)	67751	2795	194
Nbre de Panneaux PV 2%(hectare)	135502	5590	388
Nbre de Panneaux PV 3%(hectare)	203253	8385	582

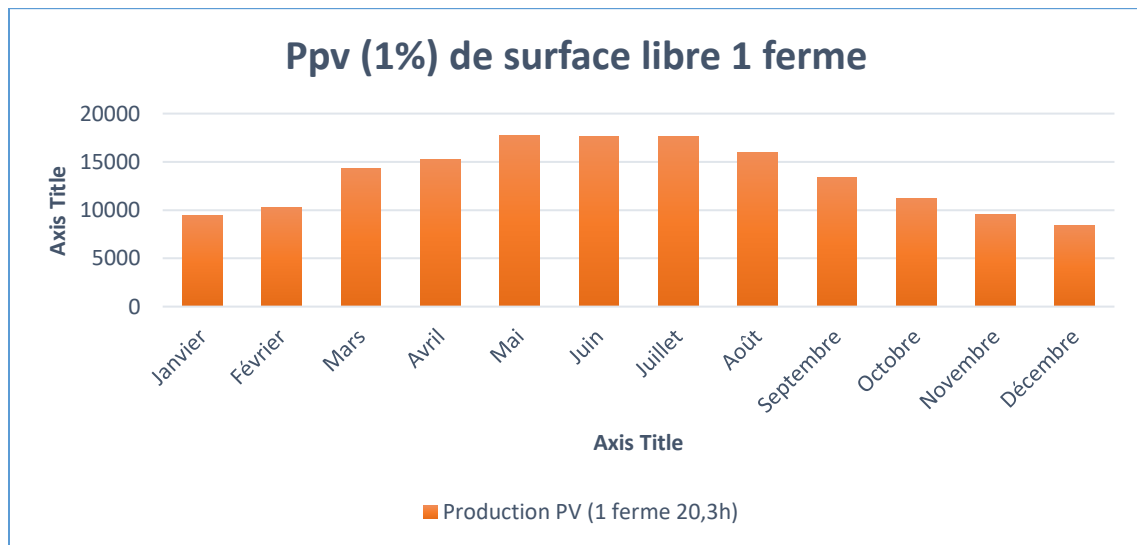


Figure III-9 Production PV Estimé d’une seule ferme (1% de l’espace libre)

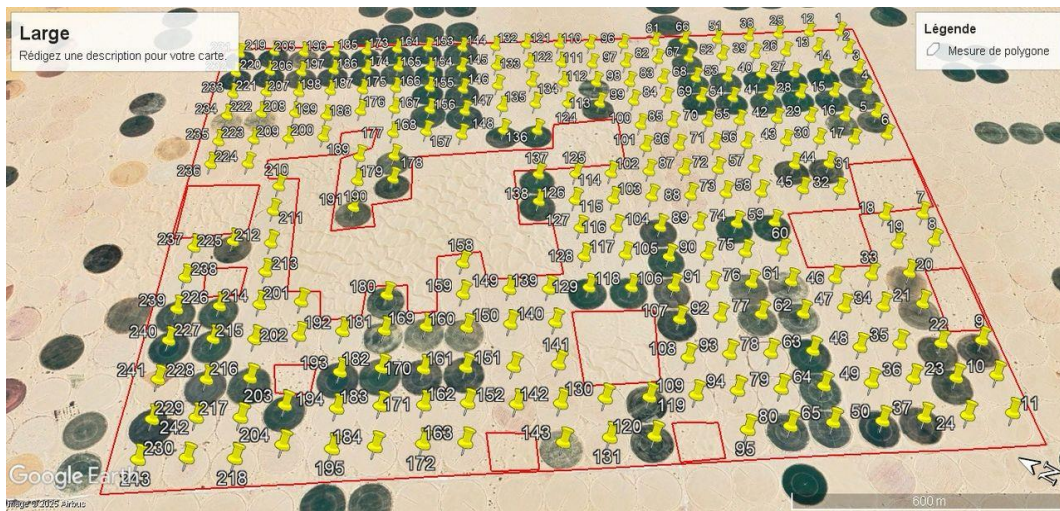


Figure III-10 image de plusieurs fermes de la région HADHOUDI

La Figure III-10 représente une image de plusieurs fermes de la région HADHOUDI avec surface de 278,75 Ha, le nombre des pivots est bien présenté dans la figure.

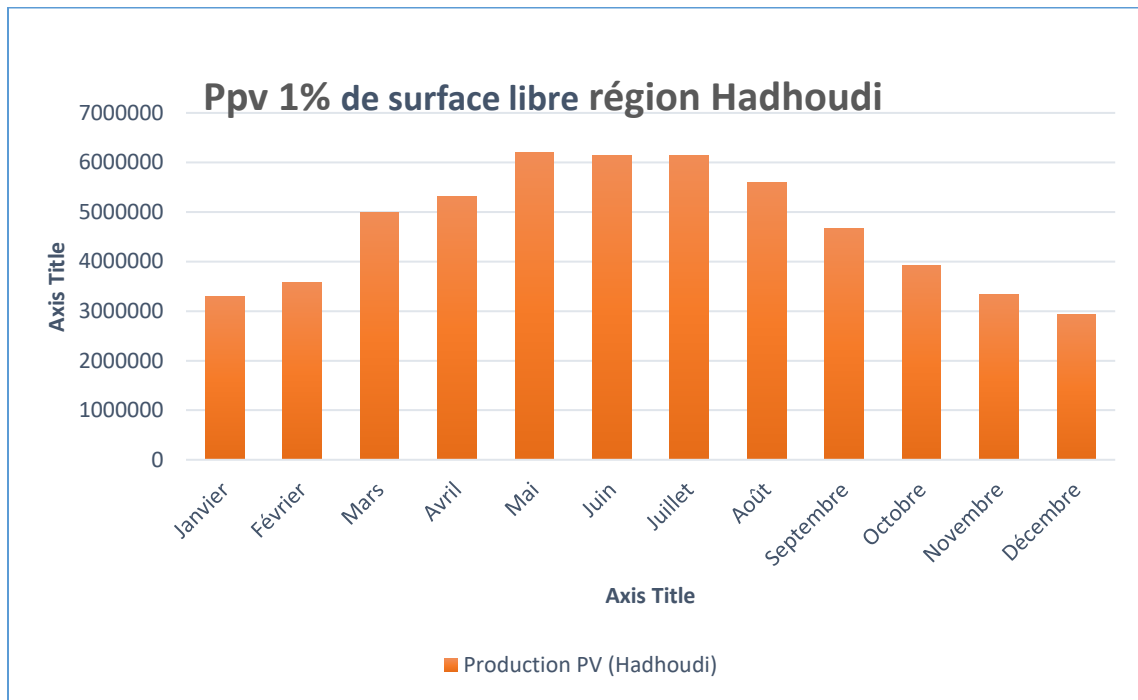


Figure III-11 Production PV Estimé de la région HADHOUDI (1% de l'espace libre)

III.5 Comparaison entre la production et la consommation

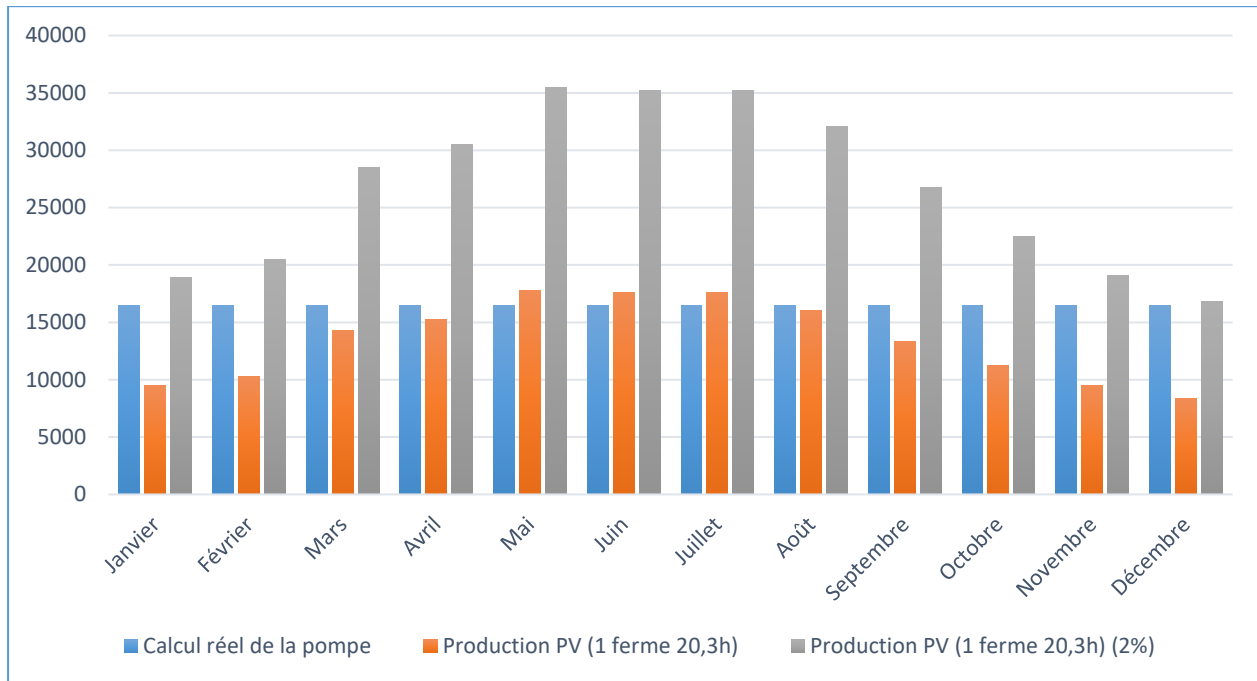


Figure III-12 comparaison entre la consommation et la production des deux scénarios

Une comparaison entre l'énergie mensuel consommé par chaque ferme et l'énergie produite en deux scénarios a été effectués et les résultats sont représentés dans la Figure III-12.

Les deux scénarios proposés sont si l'agriculteur est utilisé 1% et 2% respectivement de l'espace libre de sa ferme pour installer les panneaux PV et produire de l'électricité. Après la comparaison entre consommation production des deux scénarios nous avons trouvé que l'utilisation de 2 % de l'espace libre assure une autosuffisance avec un excès qui peut être vendu à SONALGAZ utilisant le compteur intelligent. On remarque aussi que l'utilisation de seulement 1% de l'espace libre peut couvrir 81 % de la consommation.

III.6 Etude Technico-économique

Dans cette section de l'étude, une comparaison a été effectuée concernant le coût total du pompage électrique sur une période de 20 ans, en se basant sur quatre scénarios distincts. Le premier scénario concerne les coûts si l'agriculteur dépend entièrement du réseau électrique ; le deuxième scénario implique l'utilisation de 1 % de la superficie disponible de la ferme pour la production d'électricité à l'aide de panneaux photovoltaïques, le troisième scénario prévoit l'utilisation de 2 % de l'espace disponible, tandis que le quatrième scénario concerne l'utilisation

de 3 % de l'espace. Pour un calcul précis, nous avons utilisé le coût international du kWh d'électricité car le prix de l'énergie en Algérie est subventionné le cout de maintenance a été inclus.

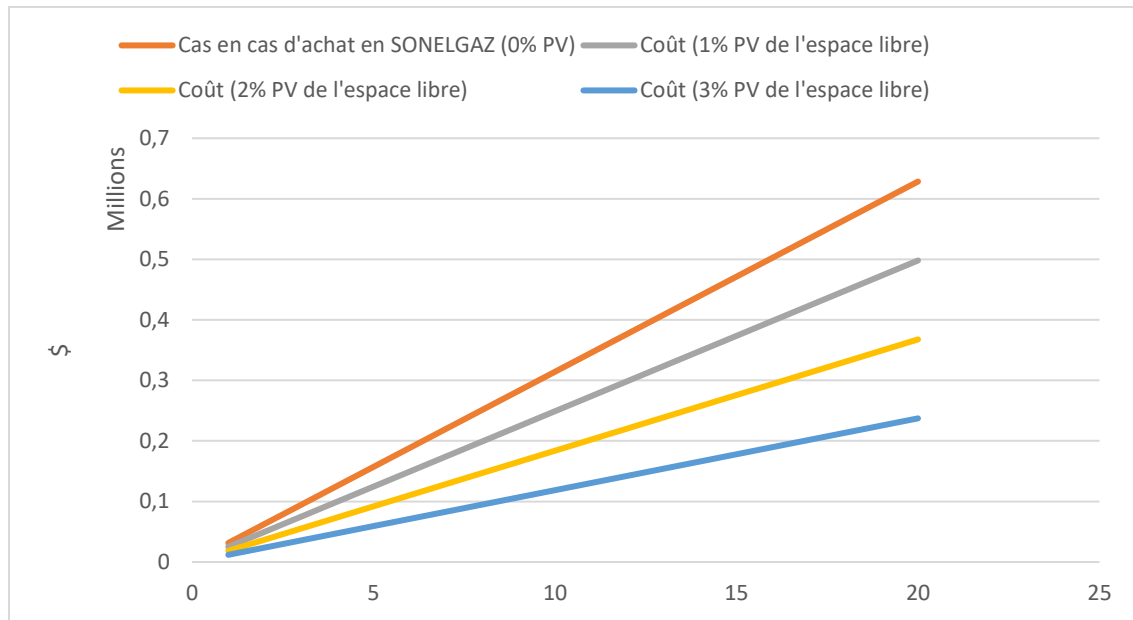


Figure III-13 comparaison de coûts de consommation MAX d'énergie en avec ou sans installations PV

Selon les données présentées dans la figure III-13, le coût total sur une période de 20 ans sans énergie photovoltaïque (Scénario 1) est de 6 599 200 dollars. En installant des panneaux photovoltaïques sur 1 %, 2 % et 3 % de l'espace disponible, l'agriculteur parvient à économiser les montants suivants :

- La somme de 1 369 285,52 dollars correspond à 1 % d'intégration.
- La somme de 2 738 571,03 dollars correspond à 2 %.
- 4 107 856,55 dollars représentent 3 %.

Ces économies mettent en évidence de manière explicite les effets bénéfiques de l'exploitation des terrains vacants pour la génération d'énergie photovoltaïque sur la diminution des dépenses énergétiques à long terme.

III.7 Conclusion :

Ce chapitre a présenté et analysé les résultats obtenus à partir des données réelles de consommation énergétique fournies par SONEGAS pour la région de Hadhoudi – Ourmes, en les confrontant aux capacités de production du système photovoltaïque dimensionné. L'analyse horaire et annuelle

de la consommation a permis d'identifier les périodes de forte demande, en particulier durant les heures d'irrigation coïncidant avec les plages tarifaires les plus élevées.

La comparaison entre la production estimée du champ photovoltaïque et la demande énergétique du site a démontré une bonne complémentarité temporelle, permettant une autoconsommation optimisée en journée, et la possibilité d'injection d'un surplus dans le réseau en dehors des heures de pompage.

L'étude technico-économique a ensuite permis d'évaluer la viabilité financière du projet à long terme, en tenant compte des coûts initiaux (CAPEX), de la dégradation annuelle des panneaux, du tarif d'achat de l'électricité, et des économies générées par la réduction de la facture énergétique. Les résultats confirment la rentabilité et la durabilité d'un système photovoltaïque raccordé au réseau pour l'irrigation agricole dans un contexte saharien.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'étude réalisée dans le cadre de ce mémoire a permis d'analyser l'impact de l'intégration des systèmes photovoltaïques sur la consommation d'énergie et les coûts afférents dans le secteur agricole de la région d'Ourmes. L'exploitation de l'énergie solaire photovoltaïque s'est révélée être une alternative crédible et prometteuse pour promouvoir l'agriculture durable dans les zones arides, en réponse aux défis associés à la pénurie d'eau et à la dépendance aux énergies fossiles.

Les résultats indiquent la faisabilité d'obtenir une production électrique significative capable de répondre en grande partie, voire entièrement, aux besoins énergétiques liés au pompage de l'eau en mobilisant uniquement entre 1 % et 3 % des terres non utilisées à des fins agricoles pour implanter des panneaux photovoltaïques. Plus spécifiquement, l'utilisation de 2 % de la capacité disponible permet d'atteindre l'autosuffisance énergétique, tout en injectant un excédent d'énergie dans le réseau afin d'améliorer la gestion des ressources.

D'un point de vue économique, l'intégration du photovoltaïque entraîne une diminution notable des coûts énergétiques sur une période de 20 ans, pouvant atteindre des économies de l'ordre de 1369285,52 dollars en cas d'utilisation de 1 %, 2738571,03 dollars correspond à 2 % et jusqu'au 4107856,55 dollars en cas d'utilisation de 3 % de la surface avec des panneaux solaires. En plus d'améliorer la rentabilité des activités agricoles, cette diminution importante des coûts permet également de réduire l'empreinte carbone, ce qui contribue à la lutte contre le changement climatique.

Pour conclure, cette recherche démontre que le recours à des terres agricoles sous-exploitées pour implanter des systèmes photovoltaïques représente une méthode efficace, économiquement viable et respectueuse de l'environnement. Toutefois, il est essentiel d'accompagner cette transition en mettant en place des politiques de soutien adéquates et des outils de gestion visant à optimiser la production et la consommation d'énergie, afin de préserver ces avantages.

Ces résultats offrent des perspectives prometteuses pour l'avancement d'une agriculture respectueuse de l'environnement et résiliente dans les zones arides de l'Algérie. Ils encouragent également la poursuite de recherches visant à améliorer l'intégration des sources d'énergie renouvelable dans les systèmes agricoles locaux.

Bibliographies

- [1] B. K. Sugumar et N. Anglani, « A Novel Decision-Support Framework for Supporting Renewable Energy Technology Siting in the Early Design Stage of Microgrids: Considering Geographical Conditions and Focusing on Resilience and SDGs », *Energies (Basel)*, vol. 18, n° 3, févr. 2025, doi: 10.3390/en18030544.
- [2] C. Matasane et M. Kahn, « Assessing Renewable Energy Potential in Vhembe District using GIS and Remote Sensing », in *International Conference on Trends and Innovations in Management, Engineering, Sciences and Humanities*, India: International Journal of Innovative Research in Engineering & Multidisciplinary Physical Sciences, janv. 2025. doi: 10.37082/IJIRMPS.ICTIMESH-24-Dubai.6.
- [3] X. Liao, S. Bresciani, C. Troise, W. A. A. Bukhari, et A. A. A. Bukhari, « How Solar, Wind, and Biomass Energy Create Sustainable Pathways Towards Green Economic Growth? Insights From the Top Five Global Renewable Energy Economies », *Sustainable Development*, 2025, doi: 10.1002/sd.3345.
- [4] O. S. H. Saleh, K. S. H. Saleh, et I. I. Abdallah, « An Overview on Photovoltaic System », *iRASD Journal of Energy & Environment*, vol. 5, n° 2, p. 76-100, déc. 2024, doi: 10.52131/jee.2024.0502.0046.
- [5] « Optimizing heliostat pylon design for solar energy in southern Algeria - Hakim Merarda; 2024 ».
- [6] « Une nouvelle carte de l'irradiation solaire en Algérie publiée par le CDER 2002 ».
- [7] S. Guo, H. Xiong, G. Xin, et Y. Shan, « Solar photovoltaics: Silicon cell principles, technology implementation, and future development », *Applied and Computational Engineering*, vol. 7, n° 1, p. 778-785, juill. 2023, doi: 10.54254/2755-2721/7/20230488.
- [8] « Chaleur, lumière, solstice... quatre idées reçues sur les saisons 2024 ».
- [9] Y. Wang, N. Meili, et S. Fatichi, « Ecohydrological responses to solar radiation changes », *Hydrol Earth Syst Sci*, vol. 29, n° 2, p. 381-396, janv. 2025, doi: 10.5194/hess-29-381-2025.
- [10] H. Mohamed *et al.*, « Prediction of Daily Global Solar Radiation on a Horizontal Plane Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) », *Journal of Environmental and Earth Sciences*, vol. 7, n° 1, p. 527-539, janv. 2025, doi: 10.30564/jees.v7i1.7079.
- [11] « - L'énergie Solaire - Application au Photovoltaïque A. Benabou 2012 ».
- [12] C. Wu *et al.*, « Layered Operation Optimization Methods for Concentrated Solar Power (CSP) Technology and Multi-Energy Flow Coupling Systems », 1 décembre 2024, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/en17246297.
- [13] M. Zohar, D. Bykhovsky, et S. Hava, « Clarifying the Differences Between the p/n-Type Definitions Based on Materials and Energy Levels », *Electronics (Switzerland)*, vol. 13, n° 24, déc. 2024, doi: 10.3390/electronics13244906.
- [14] C. Aivalioti *et al.*, « The Effect of Nitrogen as a Co-Dopant in p-Type NiO:Nb Films on the Photovoltaic Performance of NiO/TiO₂ Transparent Solar Cells », *Solids*, vol. 5, n° 4, p. 651-664, déc. 2024, doi: 10.3390/solids5040044.
- [15] « N-doped β -Ga₂O₃/Si-doped β -Ga₂O₃ linearly-graded p-n junction by a one-step integrated approach Chenxing Liu 2025 ».

- [16] « Defect regulation of p-n scheme $\text{Cu}_2\text{N}\ddot{\text{A}}\text{O}1-x/\text{PDINH}$ composites for enhanced photocatalytic antibacterial activities Chengcheng Ma; 2025 ».
- [17] R. Wang, J. Wang, Y. Xiao, Z. Gan, et H. Wang, « Principles, development, and utilization of silicon-based solar cell », *Theoretical and Natural Science*, vol. 28, n° 1, p. 156-165, déc. 2023, doi: 10.54254/2753-8818/28/20230475.
- [18] U. O. Odamov *et al.*, « Research the Degradation Process of Solar Panels Based on Polycrystalline Silicon in the Climatic Conditions of Uzbekistan During Several Years of Operation », *Journal of Ecohumanism*, vol. 4, n° 1, p. 1920-1927, 2025, doi: 10.62754/joe.v4i1.6010.
- [19] « Research on the conversion efficiency and preparation technology of monocrystalline silicon cells based on statistical distribution, Jie Sun ab; 2021 ».
- [20] « Le panneau monocristallin : avantages et inconvénients ».
- [21] « Multi-scale and Multifunctional Coatings and Interfaces for Tribological Contacts, Oktay Yigit; 2025 ».
- [22] S. Q. Y. C. H. J. Q. Y. D. W. Yanbo Cai, « Highly Efficient CdTe Thin-Film Solar Cells Fabricated by Pre-Oxidized CdSeTe Sources », *Solar RRL: Volume 9, Issue 4*, 2025.
- [23] « الغاز و التطوير للكهرباء و البحث و التطوير Centre de Recherche et de Développement de L'Electricité et du Gaz www.credeg.dz ».
- [24] « ENIE Photovoltaïque ».
- [25] « Energies renouvelables Création de la société mixte algéro-allemande ALENER-EUROSOL; 2013 ».
- [26] « Aurés Solaire commissions Algeria's second module factory, Emiliano Bellini; 2017 ».
- [27] « En Algérie, le fabricant Zergoun investit dans une ligne de production de panneaux solaires TOPCon; 2025 ».
- [28] « Panneaux Solaires en Algérie : État des Lieux des Prix Actuels; 2023 ».
- [29] « Panneaux photovoltaïques de condor en Algérie : Une révolution technologique; 2014 ».
- [30] « SOLARVIE - Eclairage industriel, éclairage public: matériel (fabrication, importation) - Sidi Bel Abbes Sidi Bel Abbes - Algérie ».
- [31] A. Satif, L. Hlou, et R. Elgouri, « Optimized control and simulation of a grid-integrated photovoltaic and fuel cell hybrid power system », *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 15, n° 2, p. 1411, avr. 2025, doi: 10.11591/ijece.v15i2.pp1411-1423.
- [32] D. S. Sawant, Y. Srinivasa Rao, et R. R. Sawant, « A hybrid combination of improved mayfly optimization based modified perturb and observe for solar based water pumping system », *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 38, n° 1, p. 50, avr. 2025, doi: 10.11591/ijeecs.v38.i1.pp50-62.
- [33] A. Hypolite et J. Hounnou, « Dimensionnement optimal d'un système hybride hydroélectrique-photovoltaïque-stockage pour une alimentation rurale isolée ». [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-02967644v1>
- [34] Thankgod Izuchukwu Ozue, Victor Eze Idigo, Vincent Chukwudi Chijindu, Ifeyinwa Chidum Dimson, et Chidimma Augusta Ikechukwu, « Modelling and optimization of a hybrid

- renewable energy systems for rural electrification in Nigeria: A review », *Global Journal of Engineering and Technology Advances*, vol. 22, n° 1, p. 069-080, janv. 2025, doi: 10.30574/gjeta.2025.22.1.0013.
- [35] J. Zhang, F. Xiao, F. Ma, X. Hao, et R. Xiao, « Topological Scheme and Analysis of Operation Characteristics for Medium-Voltage DC Wind Turbine Photovoltaic Powered Off-Grid Hydrogen Production System », *Energies (Basel)*, vol. 18, n° 3, févr. 2025, doi: 10.3390/en18030579.
- [36] S. A. Derai et A. Kaabeche, « Modélisation et dimensionnement d'un système hybride Eolien/ Photovoltaïque autonome », 2016.
- [37] A. Mousmi, A. Schellmanns, S. Elghadhi, et Q. Desouches, « Design and experimental validation of a single phase grid tied inverter for residential low power applications », *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, vol. 15, n° 2, p. 1372, avr. 2025, doi: 10.11591/ijece.v15i2.pp1372-1384.
- [38] « Photovoltaïque raccordé au réseau - Le Guide Du Chauffage ».
- [39] B. U. D. Abdullah, S. L. Dhar, S. P. Jaiswal, M. M. Gulzar, M. Alqahtani, et M. Khalid, « Hybrid MPPT control using hybrid pelican optimization algorithm with perturb and observe for PV connected grid », *Front Energy Res*, vol. 12, 2024, doi: 10.3389/fenrg.2024.1505419.
- [40] M. Y. A. Khan, H. Liu, Z. Yang, et X. Yuan, « A comprehensive review on grid connected photovoltaic inverters, their modulation techniques, and control strategies », *Energies (Basel)*, vol. 13, n° 6, août 2020, doi: 10.3390/en13164185.
- [41] « Evaluation and analysis of transformerless photovoltaic inverter topology for efficiency improvement and reduction of leakage current, Woo-Jun Cha; 2015 ».
- [42] « Quel micro onduleur choisir : Guide complet; 2024 ».
- [43] S. & H. A. A. & A. K. & C. F. & K. K. Bouchakour, « REACTIVE POWER ISSUES IN GRID CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS », 2014.
- [44] S. Vighetti, « Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau : Choix et dimensionnement des étages de conversion ». [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.hal.science/tel-00525110v1>
- [45] R. and K. R. and S. N. and A. G. and M. N. and B. M. Kumar, « An Efficient Design of High Step-Up Switched Z-Source (HS-SZSC) DC-DC Converter for Grid-Connected Inverters », *Electronics (Basel)*, p. 2440, 2022.
- [46] « Critical review on various inverter topologies for PV system architectures, Dharani Kolantla; 2021 ».
- [47] S. and H. S. and S.-S. A. Essakiappan, « CURRENT STATUS AND FUTURE TRENDS IN SOLAR TECHNOLOGY – A COMPARATIVE STUDY OF TEXAS AND CALIFORNIA ».
- [48] LSK, « MEMOIRE DE MASTER DOMAINE : Sciences et Technologies FILIERE : Électrotechnique OPTION : Réseaux Electriques ».
- [49] « Influence de l'éclairage et de la température ».
- [50] U. El-Hadj Lakhdar -Batna *et al.*, « RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEURE ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE ».
- [51] « Effet de la température sur une cellule photovoltaïque ».

- [52] A. Razmjoo, A. Ghazanfari, P. A. Østergaard, et S. Abedi, « Design and Analysis of Grid-Connected Solar Photovoltaic Systems for Sustainable Development of Remote Areas », *Energies (Basel)*, vol. 16, n° 7, avr. 2023, doi: 10.3390/en16073181.
- [53] A. K. Hamid, N. T. Mbungu, A. Elnady, R. C. Bansal, A. A. Ismail, et M. A. Alshabi, « A systematic review of grid-connected photovoltaic and photovoltaic/thermal systems: Benefits, challenges and mitigation ».
- [54] « REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE MINISTERE DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT DIRECTION GENERALE DE L'ENVIRONNEMENT Elaboration de la stratégie et du plan d'action national des changements climatiques COMMUNICATION NATIONALE INITIALE », 2001.
- [55] « Introduction des énergies renouvelables dans le système de production d'électricité : Un grand tournant; 2021 ».
- [56] K. Dahmani, « Contribution au développement de méthodes numériques utilisant les réseaux de neurones artificiels pour la caractérisation du gisement solaire en Algérie », 2015.
- [57] B. Afif, M. Baghdad, M. Berka, S. A. M. Masoud, et M. Yahiaoui, « Feasibility of a 40kWp Grid-Connected Solar Power Plant in Tiaret, Algeria: Design, Simulation, and Smart Grid Integration », *Solar Energy and Sustainable Development*, vol. 13, n° 2, p. 350-364, déc. 2024, doi: 10.51646/jsesd.v13i2.327.
- [58] M. , B. B. , F. H. , E.-A. N. , L. K. , & B. A. Ghodbane, « Linear Fresnel Reflector Power Plants in Algeria: Energy, Economic, and Environmental Analysis », *Journal of Solar Energy Engineering-transactions of The Asme*, 2024.
- [59] « PFE MASTER : CENTRALE PHOTOVOLTAIQUE INJECTEE AU RESEAU, 2022 ».
- [60] Cte, « Sizing-Method-of-an-Autonomous-Photovoltaic-Generator.pdf ».
- [61] M. C. Alonso-García et J. M. Ruiz, « A model for the series-parallel association of photovoltaic devices », *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 14, n° 3, p. 237-247, mai 2006, doi: 10.1002/pip.656.
- [62] « Series, Parallel & Series-Parallel Connection of Solar Panels ».
- [63] G. Chicco, R. Napoli, et F. Spertino, « Performance Assessment of the Inverter-based Grid Connection of Photovoltaic Systems », 2004.
- [64] « Grid-connected photovoltaic inverters: Grid codes, topologies and control techniques, Valeria Boscaïno; 2024 ».
- [65] A. N. Madkor, W. R. Anis, et I. Hafez, « The Effect Of Numbers Of Inverters In Photovoltaic Grid Connected System On Efficiency, Reliability And Cost », *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH*, vol. 4, n° 09, 2015, [En ligne]. Disponible sur: www.ijstr.org
- [66] A. Meflah et T. Allaoui, « Commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque au fil du soleil », 2012.
- [67] R. Algerienne Democratique, M. DE L, E. Superieur, et D. LA Recherche Scientifique, « وزارة التعليم العالي و البحث العلمي الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية Simulation d'un système de pompage photovoltaïque ».
- [68] J.-L. P.-C. Daux, « La chaîne d'énergie du pompage de l'eau », 2006.

- [69] U. Kasdi et M. Ouargla, « Ministère du l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique ».
- [70] « Single-Phase-220V-Solar-PV-Pumping-Inverter-Spring1500-SL ».
- [71] A. Bouchakour, M. Brahami, et A. Borni, « Comparative Study on Photovoltaic Pumping Systems Driven by Different Motors Optimized with Sliding Mode Control », 2017.
- [72] H. Abdelkader et Y. Mohammed, « Solar system design for water pumping », in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, mai 2018. doi: 10.1051/e3sconf/20183706001.
- [73] « Pompe centrifuge, pièces et classifications - Fabricants de pompes ».
- [74] F. Belgacem, M. Mostefai, M. Yahia, et A. Belgacem, « Optimization of Photovoltaic Water Pumping System Based on BLDC Motor for Agricultural Irrigation with Different MPPT Methods », *Periodica polytechnica Electrical engineering and computer science*, vol. 66, n° 4, p. 315-324, 2022, doi: 10.3311/PPee.20140.
- [75] R. Chenni, L. Zarour, A. Bouzid, et T. Kerbache, « Comparative study of photovoltaic pumping systems using a permanent magnet synchronous motor (PMSM) and an asynchronous motor (ASM) », *Journal of Renewable Energies*, vol. 9, n° 1, p. 17-28, avr. 2006, doi: 10.54966/jreen.v9i1.810.
- [76] « Moteur A Courant Alternatif Et Moteur À Courant Continu : Une Comparaison Complète De La Conception, De La Fonctionnalité Et Des Applications 2024 ».
- [77] « Principe de dimensionnement et étude de cas Pompage au fil du soleil BE Alliance Soleil ». [En ligne]. Disponible sur: www.alliancesoleil.com
- [78] « PVsyst SA-Pompage au fil du soleil-Circuit Hydraulique ».
- [79] U. Kasdi et M. Ouargla, « République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique ».
- [80] R. Agadi, K. Sakhraoui, C. Von Hirschhausen, et N. Kebir, « Sustainable Farming through Decentralized Energy Systems: Opportunities and barriers: The Promise of the WEF nexus approach in Algeria's Energy Transformation », in *E3S Web of Conferences*, EDP Sciences, oct. 2023. doi: 10.1051/e3sconf/202343303001.
- [81] J. Schnetzer et L. Pluschke, « Solar-Powered Irrigation Systems: A clean-energy, low-emission option for irrigation development and modernization ».
- [82] J. Reça, C. Torrente, R. López-Luque, et J. Martínez, « Feasibility analysis of a standalone direct pumping photovoltaic system for irrigation in Mediterranean greenhouses », *Renew Energy*, vol. 85, p. 1143-1154, janv. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.07.056.
- [83] « Le Pompage Solaire Photovoltaïque-Manuel de cours ».
- [84] A. Benatiallah, L. Kadi, et B. Dakyo, « Rural electrification by photovoltaic solar energy in Algeria », 2009.
- [85] A. Benatiallah, R. Mostefaou, et K. Bradja, « Performance of photovoltaic solar system in Algeria », *Desalination*, vol. 209, n° 1-3 SPEC. ISS., p. 39-42, avr. 2007, doi: 10.1016/j.desal.2007.04.006.
- [86] A. H. Arab *et al.*, « Connection of the CDER-Algiers photovoltaic system to low-voltage distribution grid », in *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2017, p. 145-150. doi: 10.1016/j.egypro.2017.10.311.

- [87] « Hadhoudi ».
- [88] « Depart Hadhoudi Ourmes ».
- [89] I. Messekher, N. Chabour, et M. R. Menani, « REMONTÉE DE LA NAPPE PHRÉATIQUE DU SOUF. CONSÉQUENCES ET SOLUTIONS ENVISAGÉES ».
- [90] « HIGH RETURN ON INVESTMENT », 2020.
- [91] S. A. Solar Technology, « SUNNY TRIPOWER 15000TL / 20000TL / 25000TL - The versatile specialist for large-scale commercial plants and solar power plants ».
- [92] « Pompe ».
- [93] « Integration of Renewable Energy Sources with Smart Grid ».
- [94] « POWER QUALITY Energy Efficiency Guide VOLTAGE SAG CURRENT SWELL Time ».
- [95] « 4 Mémoire Khicha 2020 à distance ».
- [96] « Smart meters and solar panels_ Everything you need to know ».
- [97] « Essential Guide to Proper Transformer Sizing for Safety ».
- [98] « What Is The Fronius Smart Meter_ - Your Energy Answers ».