

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية
الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

N°d'enregistrement

/...../...../...../...../.....



كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية والكهروميكانيك

Département d'automatique et électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

Licence professionnelle

Domaine : Sciences et technologies,

Filière :Energies renouvelables

Spécialité : Energies renouvelables et environnement

Thème

Analyse de l'efficacité des panneaux solaires bifaciaux pour
l'alimentation en énergie des pompes à eau dans les projets
d'agriculture

Présenté par :

BELGHIT Abdellah Anas

DAOUADI Younes

Soutenu publiquement le 25/09/2025

Devant le jury composé de :

Dr. BOUKHARI Hamed	Université de Ghardaïa	Président
Dr. AZZAOUI Mohammed.	Université de Ghardaïa	Encadreur
Dr .AMMAR Hachemi	Université de Ghardaïa	Co-encadreur
Dr. MOSBAH Charaf abdelkarim	Université de Ghardaïa	Examineur
Dr . ADJILA Mohamed	Université de Ghardaïa	Représentant de l'incubateur

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Nous remercions tout d'abord Dieu Tout Puissant de nous avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos encadreurs , Dr .AZZAOUI Mohammed et Dr. AMMAR Hachemi, pour leur disponibilité, leurs précieux conseils, leur accompagnement scientifique ainsi que la confiance et la compréhension dont ils nous ont toujours fait preuve.

Nos remerciements s'adressent également à l'équipe de l'incubateur d'Entreprises de l'Université de Ghardaïa pour leur accompagnement et leur soutien, ainsi qu'à l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables de Ghardaïa(URAER) pour l'appui scientifique et technique qui a enrichi ce travail.

Nous exprimons aussi notre profonde reconnaissance à tous les membres de notre famille, en particulier à nos chers parents, pour leurs sacrifices, leur aide et leur soutien moral indéfectible.

Enfin, nous remercions nos collègues ,amis et toutes les personnes qui , de près ou de loin, ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

À vous tous, nous adressons nos sincères remerciements et notre gratitude la plus profonde.

Dédicace

À l'âme de mon cher père "Makhlouf" Qu'Allah lui accorde Sa miséricorde et le fasse reposer en Son vaste Paradis, Lui qui a semé en moi la passion du savoir dès mon enfance.

Et à la source intarissable de ma force: Mon grand-père El Haj Bouamama Moulay Brahim et Ma grand-mère Zahra Bichi Qu'Allah les préserve et bénisse leur longue vie.

Eux qui m'ont soutenu par leur cœur avant leurs biens, Furent mon appui matériel dans les moments difficiles, Et mon refuge moral quand je trébuchais, Je prie Dieu de leur rendre leur bonté au centuple.

À ma tendre mère, mes frères et sœurs, et ma famille, Compagnons des efforts et de la joie de l'accomplissement.

À tous ceux qui m'ont soutenu en silence, Ces pages portent une part de ma gratitude.

DAOUADI Younes

Dédicace

Je dédie ce travail à mes chers parents, leur exprimant ma profonde gratitude pour leurs sacrifices, leur patience et leur soutien constant tout au long de mon parcours universitaire.

À ma famille, pour leurs encouragements constants et leur présence réconfortante.

À mes amis et collègues, pour leur aide, leurs encouragements et les moments de solidarité partagés.

Enfin, je dédie ces mémoires à ma patrie, l'Algérie, en espérant que ce modeste effort, aussi modeste soit-il, contribuera à bâtir un avenir plus durable et prospère.

BELGHIT Abdellah Anas

ملخص

تهدف هذه الدراسة إلى دراسة دور الطاقة الشمسية في دعم الزراعة المستدامة في الجزائر، مع التركيز على تقنية الألواح الشمسية ثنائية الوجه، التي تُعتبر ابتكارًا واعدًا. أُجريت مقارنة بين الألواح أحادية الوجه والألواح ثنائية الوجه التقليدية لتشغيل أنظمة الضخ الزراعية في المناطق الصحراوية باستخدام برنامج محاكاة PVsyst.

أظهرت النتائج أن الألواح ثنائية الوجه توفر كفاءة أعلى، وتقلل من فقدان الحرارة، وتوفر مرونة أكبر في التركيب، مع كونها أكثر فعالية من حيث التكلفة على المدى الطويل. كما تُمثل هذه التقنية حلاً فعالاً لمشاكل ندرة المياه والطاقة في البيئات القاسية، مما يجعلها خيارًا استراتيجيًا لتحسين الأمن الغذائي وأمن الطاقة. يُسهم هذا البحث مساهمة ملموسة في تطوير مشاريع زراعية أكثر استدامة، ويفتح آفاقًا جديدة للبحث العلمي والتطبيقات الصناعية في الجزائر.

الكلمات المفتاحية : الطاقة الشمسية، الألواح ثنائية الوجه، الضخ الزراعي، الزراعة المستدامة، الجزائر.

Résumé

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'étude de l'apport de l'énergie solaire à l'agriculture durable en Algérie, en mettant l'accent sur l'utilisation des panneaux photovoltaïques bifaciaux, considérés comme une technologie innovante et prometteuse. Une comparaison a été réalisée entre les modules monofaciaux classiques et les modules bifaciaux pour l'alimentation des systèmes de pompage agricole dans les zones sahariennes, à travers des simulations effectuées avec le logiciel **PVsyst**. Les résultats obtenus ont montré que les panneaux bifaciaux assurent une meilleure efficacité énergétique, réduisent les pertes thermiques et offrent une plus grande flexibilité d'intégration, tout en garantissant une rentabilité accrue à long terme. Cette technologie se révèle ainsi comme une solution stratégique pour relever les défis liés à la rareté de l'eau et aux conditions climatiques extrêmes. Ce travail apporte une contribution scientifique et technique au développement de l'agriculture durable en Algérie et ouvre la voie à de nouvelles perspectives de recherche et d'innovation.

Mots-clés: énergie solaire, panneaux bifaciaux, pompage agricole, agriculture durable, Algérie.

Abstract

This work focuses on the role of solar energy in supporting sustainable agriculture in Algeria, with particular attention to bifacial photovoltaic panels as an innovative and promising technology. A comparative study was conducted between traditional monofacial modules and bifacial modules for powering agricultural water pumping systems in Saharan regions, using **PVsyst** simulation software. The results demonstrated that bifacial panels provide higher efficiency, reduced thermal losses, and greater flexibility of integration, while ensuring improved long-term cost-effectiveness. This makes them a strategic solution to address the dual challenges of water scarcity and harsh climatic conditions in desert environments. Overall, this research contributes to the promotion of sustainable agricultural practices in Algeria and opens new perspectives for scientific research and industrial applications in the field of renewable energy.

Keywords: solar energy, bifacial panels, water pumping, sustainable agriculture, Algeria.

Contents

Introduction.....	3
Chapitre 1 : Contexte des énergies renouvelables et en jeux des projets agricoles durables	8
1.1.1. Composants du rayonnement solaire et constante solaire.....	8
1. Rayonnement direct(D)	8
2. Rayonnement diffus(S).....	8
3. Rayonnement réfléchi(Albédo)	8
4. Rayonnement global (G).....	9
1.1.2. Distance zénithale.....	10
1.1.3. Potentiel solaire en Algérie.....	10
1.1.4. Spécification de la région Ghardaïa:	11
1.2. Types d'exploitations de l'énergie solaire	11
1.2.1. Energie solaire photovoltaïque	11
1.2.2. Energie solaire thermique	12
1.3. Défis de l'agriculture face aux changements climatiques et à la rareté des ressources :	13
1.3.1. Changement des régimes de précipitations	13
1.3.2. Rareté des ressources naturelles	13
1.4. Rôle des énergies renouvelables dans l'agriculture durable.....	14
1.4.1. L'énergie solaire	14
1.4.2. L'énergie éolienne	14
1.4.3. Avantages économiques et environnementaux.....	14
1.4.4. Défis	14
1.5. Alimentation en eau dans les zones rurales	15
1.6. Intérêt des systèmes solaires pour l'irrigation agricole	15
Conclusion	16
2. Chapitre2: Technologie solaire, les panneaux photovoltaïques	18
bifaciaux et leur intégration dans les systèmes agricole	18
2.1. Introduction.....	18
2.2. Technologie des panneaux solaires	18
2.2.1. Panneaux photovoltaïques.....	19
2.2.2. Fonctionnement des panneaux solaires monofaciaux.....	19
2.2.3. Panneaux solaires bifaciaux	20
2.2.4. Comparaison avec les panneaux solaires monofaciaux	21
2.2.5. Facteurs influençant l'efficacité des panneaux bifaciaux.....	21
2.4.1. Intégration des panneaux bifaciaux dans les systèmes agricoles	22

2.4.2.	Principe de fonctionnement des pompes à eau solaires	23
2.4.3.	Configuration et installation des systèmes de pompage bifaciaux	23
2.4.4.	Méthodologie d'évaluation de l'efficacité	24
2.4.5.	Éclairage agricole avec panneaux bifaciaux	24
2.4.6.	Évaluation et avantages des systèmes d'éclairage solaire avec panneaux bifaciaux :	24
2.4.7.	Avantages et limites des panneaux bifaciaux dans les projets agricoles:	25
	Conclusion.....	26
Chapitre 3 : Évaluation de l'efficacité et analyse des résultats		28
3.1.1.	Présentation du site.....	28
3.1.2.	Présentation du logiciel PVsyst.....	28
3.1.3.	Étapes principales de la simulation	29
	Matériel et méthode	32
3.1	Matériel utilisé.....	32
	Pompe immergée.....	32
	Régulateur/Contrôleur MPPT:	32
	Réservoir de stockage d'eau	32
1.	Comparaison des scénarios simulés	33
2.	Comparaison technique et économique des scénarios photovoltaïques A et B	34
	Conclusion.....	39
Annexe		
	<i>NeoRay "New Ray Solar" ملحق مذكورة تقديم مشروع مبتكر "</i>	3
	المحور الأول: تقديم المشروع.....	3
1.	فكرة المشروع الحل المقترح:	3
	المحور الثاني: الجوانب الابتكارية	4
	محلي: EVA/إطلاق خط إنتاج	4
	خطة مستقبلية لتصنيع الخلايا الشمسية:	5
	الجمع بين الابتكار التكنولوجي والتصنيع المحلي:	5
	المحور الثالث: التحليل الاستراتيجي للسوق	6
	المحور الرابع: خطة الإنتاج والتنظيم	7
	• المرحلة الأولى (2026)	7
	• المرحلة الثانية:	7
	• المرحلة الثالثة:	7
	المحور الخامس: الخطة المالية	8
	Prototype(المحور السادس: النموذج الأولي)	10
	التدرج نحو الإنتاج الصناعي:	10
	المحور السابع: الملاحق والشراكات	11
	اتفاقيات وشراكات مبرمة:	11
	مشروع NeoRay / New Ray الجدول الزمني	12

Liste des tableaux:

Tableau N	Titre
01	Potentiel solaire en Algérie
02	Les résultats comparatifs

Liste des figures:

Figure N	Titre	page
Figure I1	Carte de l'irradiation solaire en Algérie par le CDER	8
Figure I2	Problématiques des ressources en eau	15
Figure II1	Utilisation de l'énergie renouvelable dans l'agriculture (51)	18
Figure II2	Panneaux solaires monofaciaux(25)	19
Figure II3	Panneaux solaires bifaciaux(30)	20
Figure II4	Schéma explicative générale du pompage solaire(31)	23
Figure III1	Énergie réellement utilisée par la pompe chaque mois.	35
Figure III 2	Comparaison mensuelle du volume d'eau pompé.	35
Figure III3	Énergie PV perdue à cause du remplissage du réservoir.	36
Figure III 4	Rendement global et rendement de la pompe	36
Figure III 5	Pertes thermiques des modules(%)	37

Introduction

Introduction

Depuis les débuts de l'humanité, le soleil a été une source principale de chaleur et de lumière, l'homme l'a exploitée dans de nombreuses activités telles que le chauffage et la cuisson. L'énergie solaire est l'une des plus anciennes sources d'énergie utilisées par l'homme au cours de son histoire. Cependant, son utilisation réelle comme source principale d'énergie n'a commencé que dans les temps modernes. Mais avec les progrès scientifiques et technologiques, les chercheurs du XIXe siècle ont commencé à comprendre comment transformer l'énergie solaire en énergie électrique.

L'effet photoélectrique a été découvert en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel, qui a observé que la lumière pouvait générer de l'électricité lorsqu'elle traversait certains matériaux. En 1873, Willoughby Smith a inventé la première cellule solaire pratique, basée sur cet effet, utilisant du silicium. Au début du XXe siècle, les scientifiques ont progressivement amélioré cette technologie, menant au développement de cellules solaires pouvant être utilisées dans diverses applications.

Au XXe siècle, l'énergie solaire a connu des progrès considérables, en particulier dans les années 1970, lorsque le monde a commencé à chercher des alternatives aux énergies fossiles en raison de la crise énergétique mondiale. Aujourd'hui, l'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus utilisées au monde, notamment grâce aux avancées technologiques ayant permis le développement de panneaux solaires à haute efficacité.

Dans le contexte de l'agriculture, l'énergie solaire fournir une énergie durable pour les systèmes de pompage de l'eau est d'une importance cruciale. L'énergie solaire devient la solution idéale pour répondre à ces besoins, en particulier dans les zones éloignées où l'approvisionnement en électricité traditionnelle est difficile. Dans ce cadre, les panneaux solaires bifaciaux émergent comme une solution innovante et prometteuse, car ils captent la lumière des deux côtés, ce qui améliore leur efficacité par rapport aux panneaux traditionnels.

Bien que les avantages de l'utilisation des panneaux solaires dans les systèmes de pompage d'eau agricole soient évidents, plusieurs questions restent en suspens concernant l'efficacité des panneaux solaires bifaciaux dans ce domaine. Parmi les principales questions abordées dans cette étude :

- Quel est l'impact des facteurs environnementaux (tels que les variations d'irradiation solaire, la température et l'ombrage) sur la performance des panneaux solaires bifaciaux par rapport aux panneaux traditionnels ?

- Les panneaux solaires bifaciaux fournissent-ils une solution durable et efficace pour les systèmes de pompage d'eau dans les zones arides ou désertiques confrontées à la rareté des ressources en eau ?
- Quels sont les avantages économiques de l'utilisation des panneaux solaires bifaciaux dans l'agriculture par rapport aux panneaux solaires traditionnels, en termes de coûts d'investissement et de maintenance sur le long terme ?

Sur la base de ces questions ,cette étude propose plusieurs hypothèses à tester:

- Les panneaux solaires bifaciaux sont plus efficaces en termes de production d'énergie que les panneaux traditionnels dans les régions avec une irradiation solaire élevée.
- L'utilisation de panneaux solaires bifaciaux réduit les coûts opérationnels et de maintenance des systèmes de pompage d'eau agricole par rapport aux panneaux traditionnels.
- Les panneaux solaires bifaciaux peuvent considérablement améliorer la durabilité des systèmes agricoles dans les zones à climat extrême, en fournissant une énergie plus stable et de plus longue durée.

Cette étude vise à analyser l'efficacité des panneaux solaires bifaciaux pour l'alimentation en énergie des systèmes de pompage d'eau dans les projets agricoles. Pour ce faire, elle cherche à atteindre les objectifs suivants :

- Étudier et analyser l'efficacité des panneaux solaires bifaciaux par rapport aux panneaux traditionnels dans la production d'énergie, en mettant l'accent sur l'impact des facteurs environnementaux tels que l'irradiation solaire et la température.
- Évaluer les avantages économiques de l'utilisation des panneaux solaires bifaciaux dans l'agriculture, en comparant les coûts d'investissement, d'opération et de maintenance avec ceux des panneaux traditionnels.
- Fournir des recommandations basées sur les résultats de l'étude pour améliorer l'utilisation de la technologie des panneaux solaires bifaciaux dans les systèmes de pompage d'eau agricole et garantir la durabilité de ces projets à long terme.

Ce travail se concentre sur l'étude de conception du système multi-source isolé, élaborée en vue de satisfaire les objectifs susmentionnés, sera structurée en trois chapitres :

Le premier chapitre expose le contexte et les enjeux des projets agricoles durables , en mettant en évidence les défis liés aux changements climatiques, à la rareté des ressources en eau et au rôle des énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire, dans l'irrigation agricole . Le deuxième chapitre est consacré à la technologie solaire et aux

panneaux photovoltaïques bifaciaux, en décrivant leur principe de fonctionnement, leurs avantages et leurs limites, ainsi que les facteurs qui influencent leur efficacité .Enfin, le troisième chapitre porte sur l'intégration et l'évaluation de cette technologie dans les systèmes agricoles, à travers une étude comparative appuyée par des simulations, suivie d'une analyse technique, économique et environnementale de leurs performances et de leur contribution à la durabilité.

Le travail du projet sera achevé par une conclusion générale, qui synthétisera les résultats obtenus, répondra à la problématique posée, et proposera des perspectives et des recommandations pour l'avenir .Les limites de l'étude et les axes de recherche futurs seront également abordés, afin d'ouvrir la voie à de nouvelles investigations dans ce domaine.

**Chapitre 1 :
Contexte des
énergies
renouvelables et
enjeux des
projets
agricoles
durables**

1. Contexte des énergies renouvelables et en jeux des projets agricoles durables

1.1.Gisement solaire

Le gisement solaire représente la quantité d'énergie solaire disponible dans une région donnée et exploitable pour la production d'électricité (photovoltaïque) ou de chaleur (thermique). Il constitue un paramètre fondamental dans l'évaluation et la conception des systèmes solaires.

La disponibilité de cette ressource énergétique dépend de plusieurs facteurs:

- La latitude: plus la région est proche de l'équateur, plus le rayonnement solaire est élevé et constant.
- La saison : en hiver, la durée d'ensoleillement diminue, particulièrement dans les zones de hautes latitudes.
- L'heure de la journée: l'intensité solaire est maximale lorsque le soleil est au zénith.
- Les conditions climatiques: la couverture nuageuse, la poussière et l'humidité peuvent réduire considérablement l'irradiance reçue.
- L'orientation et l'inclinaison des capteurs solaires, qui influencent directement la quantité d'énergie captée.

L'énergie solaire reçue est généralement exprimé en:

$$E_s = \int_0^{24h} G(t) dt \quad \dots\dots(1)$$

Où:

- E_s : est l'énergie solaire reçue sur une surface donnée(en Wh/m² ou kWh/m²),
- $G(t)$: est l'irradiance solaire instantanée (en W/m²).

Ainsi, on peut définir :

- Irradiation journalière : en kWh/m²/jour,
- Irradiation annuelle: en kWh/m²/an.

En Algérie, l'irradiation solaire moyenne varie entre 5 et 7 kWh/m²/jour, ce qui classe le pays parmi les régions à fort potentiel solaire.

Les cartes de gisement solaire(ou cartes d'irradiation) constituent un outil essentiel permettent de:

- Identifier les zones à fort potentiel,
- Optimiser l'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires,
- Améliorer la rentabilité des projets solaires.

En pratique, l'évaluation du gisement solaire est une étape préalable incontournable pour dimensionner correctement une installation photovoltaïque ou thermique.

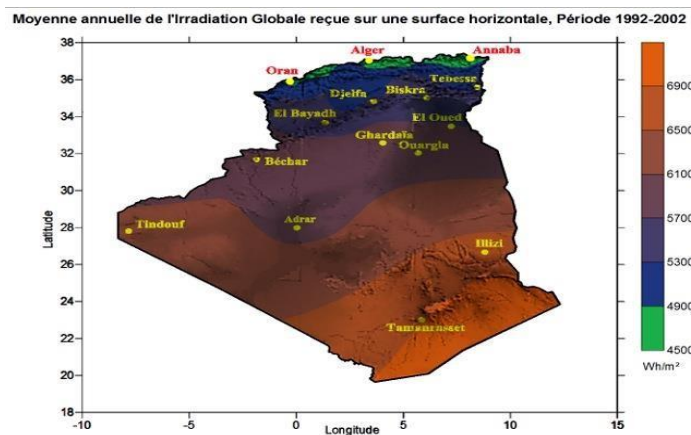


Figure11: Carte de l'irradiation solaire en Algérie par le CDER .

1.1.1. Composants du rayonnement solaire et constante solaire

Le Soleil est l'unique étoile du système solaire et la plus proche de la Terre, sa lumière nous parvient en environ 8 minutes. Il joue un rôle fondamental dans la vie sur Terre en fournissant une immense quantité d'énergie. La température de sa surface varie entre 3 500°C et 5 900°C (CNEREE. 2020).

Le rayonnement solaire correspond à l'énergie électromagnétique émise par le Soleil. Lors de sa traversée de l'atmosphère terrestre, il subit des perturbations qui limitent la réception au sol aux composantes les plus significatives : le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi (albédo).

1. Rayonnement direct(D)

Le rayonnement direct représente la portion d'énergie solaire reçue directement du Soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Les rayons sont parallèles, et cette composante peut être captée par des systèmes optiques à concentration.

2. Rayonnement diffus(S)

Le rayonnement diffus résulte de l'interaction de l'énergie solaire avec l'atmosphère (nuages, poussières, particules). Les rayons parallèles sont déviés et répartis dans toutes les directions.

3. Rayonnement réfléchi(Albédo)

L'albédo est la fraction du rayonnement solaire global réfléchi par le sol. Elle dépend de la nature de la surface (sable, neige, etc.) et se caractérise par un coefficient spécifique. En moyenne, l'intensité du rayonnement solaire global en ciel clair est d'environ 1000 W/m².

4. Rayonnement global (G)

Le rayonnement global correspond à la superposition des trois composantes : direct, diffus et réfléchi. C'est cette valeur qui est utilisée pour déterminer le rendement des cellules photovoltaïques.

$$G = D + S + A \quad \dots(2)$$

Où:

G : rayonnement global

D : rayonnement direct

S : rayonnement diffus

A : rayonnement réfléchi

La constante solaire représente la quantité d'énergie que le Soleil envoie à la limite de l'atmosphère terrestre sur une surface perpendiculaire au rayonnement. Elle varie selon le jour de l'année :

$$C = I_0[1 + 0,33 \cos(0,984j)] \quad \dots(3)$$

où:

- C: constante solaire (W/m²)
- I₀=1353W/m²: valeur moyenne
- J : numéro du jour dans l'année

1.1.2. Distance zénithale

La distance zénithale est l'angle entre la direction du Soleil et la verticale du lieu (zénith). Cet angle est complémentaire à l'angle de hauteur solaire (γ) et est essentiel pour le calcul du rayonnement solaire reçu au sol.

L'expression pour calculer l'angle zénithale est la suivante:

$$\cos \theta_z = \sin \varphi \times \sin \delta + \cos \varphi \times \cos \delta \cos h \quad \dots(4)$$

Explications:

- θ_z : angle zénithal (distance zénithale)
- φ : latitude du lieu
- δ : déclinaison solaire(angle de déviation du soleil selon le jour de l'année)
- h : angle horaire(angle selon le temps, 0° à midi solaire)

1.1.3. Potentiel solaire en Algérie

La durée d'ensoleillement dans la majorité du territoire national dépasse 2500 heures par an, et peut atteindre jusqu'à 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m^2 est d'environ 5 kWh sur la majeure partie du territoire, soit près de $1700 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ dans le Nord et $2263 \text{ kWh/m}^2/\text{an}$ dans le Sud du pays . (41)

Tableau N (01): Potentiel solaire en Algérie

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie(%)	4	10	86
Durée moyenne d'insolation (heures/an)	2560	3000	3500
Energie moyenne reçue (kWh/m ² /an)	1700	1900	2650

(CNEREE.2020)

1.1.4. Spécification de la région Ghardaïa:

Présentation du site:

Ghardaïa est située dans le centre-sud de l'Algérie, au nord du Sahara algérien. C'est une région caractérisée par un climat désertique, avec un fort ensoleillement tout au long de l'année, ce qui la rend favorable aux projets solaires.

Coordonnées géographiques:

- Latitude:32.50°N
- Longitude: 3.67°E
- Altitude : 492 mètres (CNEREE.2020)

1.2. Types d'exploitations de l'énergie solaire

1.2.1. Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est obtenue à partir des rayonnements du soleil. Plus précisément, le principe consiste à convertir l'énergie transportée par les photons de la lumière en électricité. C'est pourquoi les panneaux photovoltaïques, qui captent cette lumière, sont souvent installés avec une orientation optimale. C'est là qu'intervient la cellule photovoltaïque. Fabriquée en silicium, lorsqu'elle est exposée à la lumière, elle absorbe l'énergie des photons lumineux.

Ces cellules génèrent un courant électrique continu qui sera ensuite converti en courant alternatif à l'aide d'un onduleur. L'électricité produite peut être immédiatement utilisée pour faire fonctionner les appareils électriques ou pour l'éclairage.

Toute installation solaire (sur un bâtiment ou au sol) nécessite donc trois éléments essentiels pour capter l'énergie solaire, la transformer en électricité et l'utiliser :

- Des panneaux photovoltaïques;
- Un onduleur pour convertir le courant continu en courant alternatif;
- Un système de distribution électrique.

1.2.2. Energie solaire thermique

L'énergie solaire thermique repose sur l'utilisation de la chaleur du soleil, plutôt que de sa lumière, pour produire de l'énergie. Ce type de système chauffe un fluide caloporteur (généralement de l'eau ou un liquide spécifique) à l'aide de capteurs thermiques solaires, souvent installés sur les toits.

Le fluide chauffé est utilisé pour fournir de l'eau chaude sanitaire ou pour alimenter un système de chauffage (comme un chauffage central). Cette méthode est couramment utilisée dans les maisons et les bâtiments commerciaux, notamment dans les régions très ensoleillées.

Les composants principaux d'un système thermique solaire sont:

- Des capteurs thermiques solaires (à plaques plates ou à tubes sous vide) ;
- Un réservoir de stockage d'eau chaude;
- Une pompe ou un circuit de circulation du fluide.

1.2.3. L'énergie solaire concentrée

Les systèmes solaires concentrés utilisent des miroirs ou des lentilles pour concentrer les rayons du soleil sur un point focal précis (comme un tube ou une tour), où un fluide caloporteur (tel qu'une huile thermique ou des sels fondus) est chauffé à très haute température.

Cette chaleur est ensuite utilisée pour produire de la vapeur, qui fait tourner des turbines afin de générer de l'électricité, selon le même principe que dans les centrales électriques classiques.

Parmi les technologies utilisées dans les systèmes d'énergie solaire concentrée (CSP – Concentrated Solar Power), on trouve :

- Les miroirs paraboliques (Parabolic Trough);
- Les tours solaires(Solar Power Towers);
- Les paraboles Stirling (Dish Stirling Systems).

Cette technologie est particulièrement adaptée aux projets industriels ou aux centrales électriques à grande échelle, surtout dans les zones désertiques à fort ensoleillement, comme le sud de l'Algérie.

1.3. Défis de l'agriculture face aux changements climatiques et à la rareté des ressources :

Dans un monde confronté à des défis croissants en matière de sécurité alimentaire et de changements climatiques, l'agriculture durable s'affirme comme une solution stratégique, reposant sur l'intégration de pratiques novatrices visant à garantir une adaptation durable et efficace face à ces enjeux.

L'agriculture représente un secteur fondamental pour la sécurité alimentaire mondiale, elle est confrontée à des défis majeurs liés aux changements climatiques et à la rareté des ressources naturelles. Ces défis ont des implications profondes sur la production agricole et la durabilité des écosystèmes, nécessitant des adaptations technologiques et des stratégies de gestion innovantes pour garantir la résilience du secteur.

1.3.1. Changement des régimes de précipitations

Les précipitations irrégulières peuvent créer des périodes de sécheresse sévères, réduisant l'eau disponible pour l'irrigation des cultures. En revanche, des pluies intenses peuvent entraîner l'érosion du sol et l'inondation des terres agricoles. La variation des températures et des précipitations influence non seulement les cultures agricoles, mais également la biodiversité et les écosystèmes locaux, créant des conditions défavorables pour la croissance et la reproduction des plantes. Les changements climatiques ont un impact direct sur la sécurité alimentaire en réduisant la disponibilité des aliments, en augmentant les coûts de production et en modifiant les zones agricoles cultivables.

1.3.2. Rareté des ressources naturelles

La rareté des ressources naturelles est un autre défi majeur pour l'agriculture. Parmi les ressources les plus critiques, on trouve l'eau, les terres agricoles, et les nutriments du sol. Nous intéressons ici par le problème de l'eau employé dans l'irrigation. L'agriculture est le plus grand consommateur d'eau dans le monde, représentant environ 70 % de la consommation d'eau douce globale (2). Cependant, avec la croissance démographique et les impacts des changements climatiques, les ressources en eau se raréfient dans de nombreuses régions. De plus, la surexploitation des sources d'eau souterraines a conduit à des niveaux alarmants d'assèchement dans certaines zones agricoles.

Afin de répondre à ces défis, l'énergie renouvelables représente comme stratégies adaptés doivent être mises en place, l'intégration de technologies d'énergie renouvelable, comme l'énergie solaire et l'énergie éolienne, dans les systèmes agricoles permet de réduire la dépendance aux énergies fossiles et d'améliorer la durabilité des exploitations agricoles.

1.4. Rôle des énergies renouvelables dans l'agriculture durable

Les énergies renouvelables représentent l'une des solutions les plus importantes pour promouvoir l'agriculture durable. En effet, l'agriculture repose actuellement largement sur des ressources non renouvelables telles que les combustibles fossiles, ce qui entraîne une augmentation des émissions de gaz à effet de serre et une dégradation de l'environnement. Par conséquent, les énergies renouvelables sont devenues indispensables pour améliorer la productivité agricole tout en préservant l'écosystème.

1.4.1. L'énergie solaire

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelable utilisées dans l'agriculture durable. Elle peut être exploitée pour alimenter les systèmes d'irrigation, notamment dans les régions souffrant de pénurie d'eau, en plus de servir à faire fonctionner les pompes agricoles et pour l'éclairage des fermes, ce qui permet de réduire les coûts de l'électricité traditionnelle, renforçant ainsi la durabilité des projets agricoles(46).

1.4.2. L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une autre source d'énergie renouvelable utilisée en agriculture. Les éoliennes peuvent être installées pour produire de l'électricité nécessaire au fonctionnement des équipements agricoles ou des systèmes d'irrigation. Dans les zones rurales où la vitesse du vent est élevée, l'énergie éolienne peut constituer une alternative efficace à l'électricité conventionnelle, contribuant ainsi à réduire les coûts.(33).

1.4.3. Avantages économiques et environnementaux

L'adoption des énergies renouvelables dans l'agriculture permet de réduire les coûts de fonctionnement, de plus, elles contribuent à la réduction des émissions de gaz qui cause l'effet de serre responsables, ce qui a son tour cause le changement climatique, améliorant ainsi la qualité de l'environnement et favorisant la durabilité de l'agriculture à long terme.(27)

1.4.4. Défis

Malgré les nombreux avantages des énergies renouvelables dans l'agriculture, plusieurs défis peuvent entraver leur mise en œuvre, tels que les coûts d'investissement initiaux élevés, notamment dans les zones où les infrastructures sont limitées. (35)

1.5. Alimentation en eau dans les zones rurales

Les zones rurales font face à de grands défis concernant l'alimentation en eau, en particulier dans les régions où les ressources en eau sont limitées et où les conditions environnementales sont difficiles. Les changements climatiques ont exacerbé cette problématique, affectant les précipitations et la disponibilité des ressources en eau. De plus, l'absence d'infrastructures modernes de gestion des eaux dans ces zones aggrave encore la situation, car les agriculteurs souffrent d'une gestion inefficace de l'eau et d'un accès limité à des technologies d'irrigation avancées (28) .



Figure I 2:Problématiques des ressources en eau

1.6. Intérêt des systèmes solaires pour l'irrigation agricole

L'énergie solaire permet d'alimenter les systèmes d'irrigation sans recourir à des sources d'énergie non renouvelables qui souvent difficiles à obtenir dans les régions rurales. Grâce aux panneaux solaires photovoltaïques, les pompes agricoles peuvent fonctionner efficacement, réduisant ainsi les coûts d'énergie pour les agriculteurs et contribuant à leur durabilité (44).

L'avantage majeur des systèmes solaires pour l'irrigation réside dans leur rentabilité et leur durabilité. Ces systèmes sont généralement autonomes, nécessitent peu de maintenance et offrent une solution durable adaptée aux zones rurales où l'accès à l'électricité est limité(5).L'Algérie a adopté cette technologie dans de nombreuses régions rurales pour surmonter les problèmes d'approvisionnement énergétique et améliorer la gestion de l'eau (43).

Conclusion

En conclusion, la transition vers une agriculture durable s'impose face aux défis environnementaux et à la raréfaction des ressources. Les énergies renouvelables, telles que le solaire, l'éolien et la biomasse, constituent un pilier essentiel de ce changement, en améliorant la productivité et en réduisant l'impact environnemental, notamment en zones rurales. Malgré les obstacles liés aux coûts et aux infrastructures, le soutien politique et le financement adéquat sont indispensables pour réussir cette transition vers une agriculture plus durable et résiliente.

**Chapitre 2 :
Technologie
solaire, les
panneaux
photovoltaïques
bifaciaux et
leur
intégration
dans les
systèmes
agricoles**

2. Chapitre: Technologie solaire, les panneaux photovoltaïques bifaciaux et leur intégration dans les systèmes agricole

2.1. Introduction

La technologie photovoltaïque (PV) représente une méthode révolutionnaire pour exploiter l'énergie solaire et la convertir en électricité . Elle repose sur le principe de l'effet photoélectrique , selon lequel certains matériaux génèrent un courant électrique lorsqu'ils sont exposés à la lumière du soleil. Les technologies permettant de mettre à profit les rayons du soleil ont énormément évolué ces dernières années. Le soleil, source infinie et gratuite, constitue une option écologique durable, car il ne génère pas d'émissions nuisibles et n'a pas d'impact négatif sur l'environnement, contrairement aux combustibles fossiles.

L'efficacité des cellules dépend du type de matériaux utilisés (silicium monocristallin, poly cristallin, couches minces) ainsi que des facteurs environnementaux tels que l'intensité du rayonnement solaire et la température. L'énergie solaire ne se limite pas à la production d'électricité : elle est également utilisée pour le chauffage de l'eau, du bâtiment ou pour la cuisson (32).



Figure II 1: Utilisation de l'énergie renouvelable dans l'agriculture (51)

2.2. Technologie des panneaux solaires

La technologie solaire fonctionne sur le principe de la conversion de l'énergie solaire en électricité ou en chaleur, selon le type de panneau utilisé. On distingue principalement deux principales catégories de technologies solaires : les panneaux photovoltaïques et les panneaux thermiques, auxquels s'ajoutent des systèmes hybrides combinant ces deux fonctions.

2.2.1. Panneaux photovoltaïques

Les panneaux photovoltaïques sont constitués de cellules en silicium cristallin, qui transforment la lumière solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les modules monocristallins offrent des rendements élevés, compris entre 18 et 22 %, mais restent plus coûteux. Les modules polycristallins, moins chers, présentent des rendements modérés de 15 à 18%,et sont utilisés principalement pour de grandes surfaces. Enfin, les modules à couches minces (thin-film), flexibles et légers, présentent un rendement plus faible de 10 à 13 %, mais conservent de bonnes performances dans des conditions de faible ensoleillement.

2.2.2. Fonctionnement des panneaux solaires monofaciaux

Les panneaux solaires monofaciaux sont le type le plus répandu. Ils possèdent des cellules photovoltaïques sur une seule face, orientée vers le soleil pour capter ses rayons. Ces cellules, généralement fabriquées en silicium, un semi-conducteur, génèrent un courant électrique continu (DC) lorsqu'elles sont exposées à la lumière. Le courant produit est ensuite collecté par des fils métalliques et dirigé vers un onduleur, qui le transforme en courant alternatif (AC), utilisable par les appareils électriques domestiques ou injectable dans le réseau. Cette technologie, simple et éprouvée, constitue la base des installations solaires résidentielles et commerciales.



Figure II 2:Panneaux solaires monofaciaux(25)

2.2.3. Panneaux solaires bifaciaux

Les panneaux photovoltaïques bifaciaux représentent une innovation majeure dans le domaine de l'énergie solaire. Contrairement aux panneaux classiques qui ne captent la lumière que sur leur face avant, ces modules exploitent les deux faces. La face avant capte la lumière directe du soleil, tandis que la face arrière absorbe la lumière réfléchie par le sol, les toits clairs, la neige ou même la végétation, transformant ainsi ce qui serait perdu avec des panneaux classiques en électricité supplémentaire.

Cette double captation permet un rendement électrique supérieur de 5 à 15 % et optimise la production d'énergie même dans des environnements à lumière diffuse. L'efficacité dépend de l'angle d'inclinaison, de la hauteur d'installation et de la nature du sol ou de la surface réfléchissante. Les surfaces sombres ou peu réfléchissantes limitent le gain, tandis que les surfaces à fort albédo maximisent la production.

La conception en verre trempé («bi-verre») assure une durabilité et longévité accrues, résiste aux intempéries et aux contraintes environnementales, et permet une recyclabilité jusqu'à 95 % des composants, favorisant la durabilité écologique. Ces panneaux sont adaptables à différents types d'installations : en toiture, en façade, sur parkings ou au sol, et conviennent aux projets résidentiels, commerciaux, agricoles et industriels (30)(39)(42).

En combinant performance énergétique, robustesse et flexibilité, les panneaux bifaciaux constituent une solution stratégique pour maximiser la production d'énergie solaire tout en optimisant l'espace disponible.



Figure II 3:panneaux solaires bifaciaux (30).

2.2.4. Comparaison avec les panneaux solaires monofaciaux

Dans le domaine photovoltaïque, deux technologies dominent le marché : les panneaux monofaciaux et les panneaux bifaciaux. Bien qu'ils aient le même objectif – convertir la lumière solaire en électricité – leurs caractéristiques techniques, leurs performances et leurs coûts diffèrent considérablement. Une comparaison entre ces deux types permet de mieux comprendre leurs avantages et leurs limites respectifs :

Les panneaux monofaciaux disposent d'une face arrière opaque et ne produisent de l'électricité que d'un seul côté, ce qui les rend plus simples, plus légers et moins coûteux à installer. En revanche, les panneaux bifaciaux possèdent une face arrière transparente qui leur permet de capter la lumière directe, réfléchie et diffuse, offrant ainsi jusqu'à 30 % de rendement supplémentaire. Ils sont également plus durables grâce à leur protection en verre trempé des deux côtés et présentent une espérance de vie plus longue avec une moindre dégradation. Toutefois, cette technologie reste plus onéreuse, plus lourde et exige une installation spécifique ainsi qu'un entretien régulier. Ainsi, les monofaciaux conviennent mieux aux applications résidentielles et aux petites surfaces, tandis que les bifaciaux s'adaptent davantage aux grandes centrales solaires et aux environnements à fort albédo.

2.2.5. Facteurs influençant l'efficacité des panneaux bifaciaux

L'efficacité des panneaux solaires bifaciaux dépend de plusieurs facteurs externes clés qui influencent la captation de la lumière sur la face arrière et la production globale d'énergie (45).

Réflectivité des surfaces environnantes : La capacité de la face arrière à capter la lumière réfléchie varie selon l'albédo du sol. Les surfaces claires et réfléchissantes comme la neige, le sable ou les toits clairs augmentent significativement la production d'électricité, tandis que les surfaces sombres ou peu réfléchissantes, telles que l'asphalte ou la végétation dense, réduisent le rendement.

Inclinaison des panneaux : L'angle d'installation est crucial pour maximiser l'exposition à la lumière directe et réfléchi. Une inclinaison optimale (souvent 30–40° selon la latitude) permet de combiner une bonne captation sur la face avant avec une interaction efficace de la face arrière avec la lumière réfléchi. Un montage vertical ou légèrement surélevé peut améliorer la captation arrière, mais nécessite un équilibre pour ne pas perdre l'énergie directe.

Conditions environnementales : Le climat influence également la performance. Dans les régions ensoleillées, la production est maximale grâce à la lumière directe et réfléchi. Dans les zones nuageuses ou brumeuses, la lumière directe diminue, mais la lumière réfléchi peut encore contribuer à une production supplémentaire.

Ainsi, l'optimisation de la réflectivité, de l'inclinaison et de l'environnement d'installation est essentielle pour tirer pleinement parti du potentiel énergétique des panneaux bifaciaux.

2.4.1. Intégration des panneaux bifaciaux dans les systèmes agricoles

Face à la croissance de la demande énergétique et au besoin de sécuriser la production alimentaire, l'intégration de panneaux bifaciaux dans les systèmes agricoles apparaît comme une solution novatrice. Cette approche permet non seulement de produire de l'électricité, mais aussi de soutenir l'agriculture à travers des applications concrètes comme le pompage de l'eau et l'éclairage des serres.

2.4.2. Principe de fonctionnement des pompes à eau solaires

Un système de pompage solaire associe des modules photovoltaïques, un convertisseur électronique et une pompe électrique. Le courant produit par les panneaux alimente un groupe motopompe, pouvant être de type volumétrique, centrifuge ou hélicoïdal, fonctionnant soit en courant alternatif, soit en courant continu. On distingue deux principales configurations : le pompage direct avec stockage dans un réservoir en hauteur, et le pompage indirect utilisant des batteries. Le premier est le plus recommandé car il assure une disponibilité continue en eau avec moins de contraintes techniques

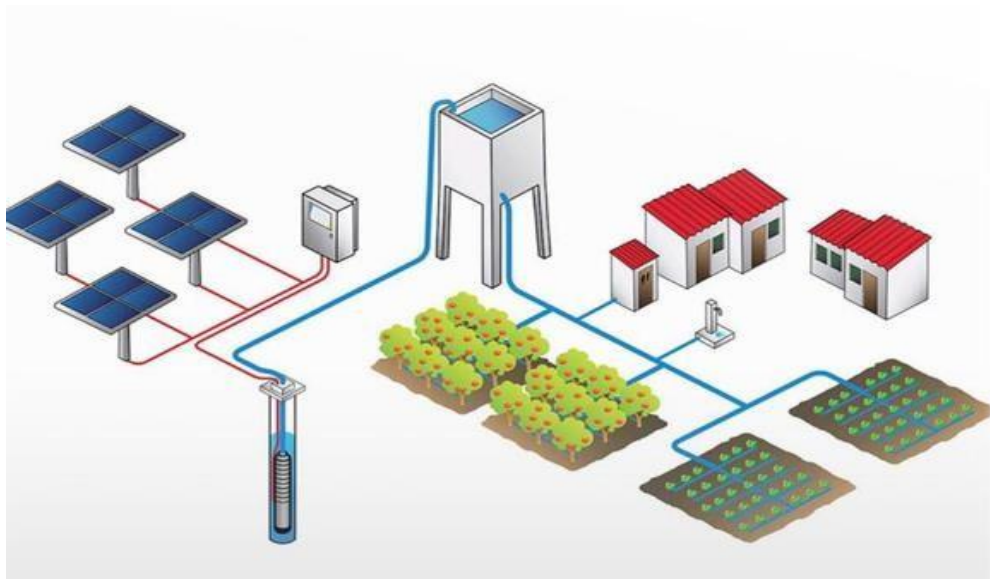


Figure II 4: schéma explicative générale du pompage solaire(31)

2.4.3. Configuration et installation des systèmes de pompage bifaciaux

La mise en œuvre d'un système de pompage à panneaux bifaciaux requiert plusieurs éléments essentiels : les modules bifaciaux eux-mêmes, un contrôleur MPPT (Maximum PowerPoint Tracking), une pompe électrique adaptée, une structure de montage optimisée selon la latitude et un réservoir de stockage. L'efficacité du système dépend principalement de l'orientation sud des panneaux, de leur inclinaison correspondant à la latitude, de leur hauteur d'installation, ainsi que du choix de la pompe en fonction de la profondeur et du débit requis. La maintenance régulière et la robustesse de l'installation face aux conditions climatiques constituent aussi des facteurs clés.

2.4.4. Méthodologie d'évaluation de l'efficacité

L'évaluation de l'efficacité repose sur plusieurs critères : l'efficacité spectrale, l'efficacité lumineuse, l'efficacité agronomique et la réponse physiologique des plantes. Ces paramètres sont mesurés à l'aide d'instruments comme les capteurs quantiques, les compteurs d'énergie et les capteurs environnementaux. Les données sont collectées de manière périodique et analysées statistiquement, permettant de déterminer le rapport entre le rendement agricole obtenu et le coût énergétique associé.

2.4.5. Éclairage agricole avec panneaux bifaciaux

L'éclairage des fermes grâce à l'énergie solaire consiste à stocker l'électricité produite dans des batteries afin d'alimenter des lampes LED pendant la nuit ou par faible ensoleillement. Les panneaux bifaciaux augmentent la production énergétique grâce à la captation double, ce qui assure un éclairage continu et stable. L'installation se compose de panneaux bifaciaux reliés à un régulateur de charge, des batteries et des lampes LED agricoles disposées selon les besoins des cultures. Ce système présente de nombreux avantages : amélioration de la productivité agricole, réduction des coûts énergétiques, indépendance vis-à-vis du réseau et impact environnemental positif.

2.4.6. Évaluation et avantages des systèmes d'éclairage solaire avec panneaux bifaciaux :

L'éclairage solaire en agriculture est évalué selon trois critères principaux:

Efficacité spectrale : correspondance du spectre lumineux produit avec les besoins de la photosynthèse. **Efficacité énergétique** : quantité de lumière produite par rapport à la consommation d'énergie des batteries. **Efficacité agronomique**: comparaison de la croissance et de la productivité des plantes sous éclairage solaire avec d'autres types d'éclairage. Les mesures sont réalisées à l'aide de capteurs quantiques ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$), de moniteurs d'énergie et de détecteurs de température et d'humidité. Les données hebdomadaires sont enregistrées et analysées statistiquement pour évaluer aussi l'efficacité économique, à travers le rapport rendement/coût (Belkacem, Fatiha, 2021).

L'utilisation des panneaux solaires bifaciaux renforce significativement ces systèmes:

Rendement accru: production d'énergie 15 à 30% supérieure aux panneaux monofaciaux, garantissant un éclairage continu même en journée nuageuse ou en soirée.

Optimisation de l'espace : double captation de la lumière permettant de réduire la surface nécessaire pour la même production électrique.

Durabilité et économies: diminution de la dépendance au réseau électrique, réduction des coûts opérationnels à long terme et impact écologique positif (40).

Ainsi, l'éclairage solaire agricole avec panneaux bifaciaux combine performance énergétique, continuité d'éclairage et efficacité économique, tout en favorisant la durabilité écologique et la croissance optimale des cultures.

2.4.7. Avantages et limites des panneaux bifaciaux dans les projets agricoles:

L'utilisation des panneaux solaires bifaciaux dans le secteur agricole offre un potentiel considérable pour concilier production énergétique et exploitation optimale des terres. Grâce à leur conception innovante permettant de capter la lumière solaire sur leurs deux faces, ces panneaux se distinguent par une efficacité énergétique accrue et trouvent naturellement leur place dans les systèmes agrivoltaïques, où cultures et production électrique coexistent harmonieusement sur une même surface (16). Leur intégration permet d'optimiser l'espace agricole, puisque la production d'électricité se fait sans réduire la surface cultivable, renforçant ainsi la valeur ajoutée des exploitations. De plus, l'ombrage partiel généré par les modules peut améliorer la productivité agricole en protégeant certaines cultures contre le stress thermique et en réduisant l'évaporation de l'eau, ce qui constitue un atout majeur dans les zones chaudes et arides. À cela s'ajoute un rendement énergétique supérieur, lié à la captation de la lumière réfléchi par le sol ou la végétation, ainsi qu'un impact écologique positif résultant de la combinaison entre agriculture et énergies renouvelables, participant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la transition énergétique.

Cependant, cette technologie présente également certaines limites qui doivent être prises en considération. Le coût initial d'investissement demeure plus élevé que celui des panneaux monofaciaux, et l'installation requiert une configuration spécifique incluant une orientation et une inclinaison optimales, ainsi qu'une gestion appropriée de l'albédo. De plus, une maintenance régulière s'impose dans les environnements agricoles souvent poussiéreux. Le rendement supplémentaire apporté par ces panneaux reste aussi fortement dépendant des conditions locales : il est optimisé dans les zones caractérisées par un fort albédo, comme les sols clairs, sablonneux ou enneigés, mais peut être limité dans les régions nuageuses ou présentant des surfaces peu réfléchissantes.

En définitive, malgré ces contraintes, les panneaux bifaciaux apparaissent comme une solution innovante et durable, particulièrement pertinente pour les projets agricoles de grande envergure. Leur intégration permet non seulement d'allier production agricole et production énergétique, mais aussi de renforcer la résilience et la durabilité du secteur agricole tout en contribuant efficacement à la transition énergétique (16).

Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en évidence l'importance de l'énergie solaire et le rôle majeur qu'occupent les technologies photovoltaïques dans la transition énergétique. Après avoir présenté les fondements de la technologie solaire et les différents types de panneaux photovoltaïques, une attention particulière a été accordée aux modules bifaciaux, considérés aujourd'hui comme une innovation stratégique. Leur capacité à exploiter la lumière directe et réfléchie leur confère un avantage significatif par rapport aux panneaux monofaciaux, tant en termes de rendement énergétique que de durabilité. Toutefois, leur performance reste fortement influencée par des facteurs environnementaux tels que l'albédo, l'inclinaison et les conditions climatiques, ce qui implique une conception et une installation adaptées.

Dans le domaine agricole, l'intégration des panneaux bifaciaux ouvre de nouvelles perspectives. Ils permettent d'optimiser l'utilisation de l'espace grâce aux systèmes agrivoltaïques, d'améliorer la productivité agricole par l'ombrage partiel, et de renforcer la durabilité écologique en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. De plus, leur application dans les systèmes de pompage d'eau et d'éclairage agricole démontre leur pertinence pour répondre simultanément aux besoins énergétiques et alimentaires. Néanmoins, les coûts d'investissement, les exigences techniques et la maintenance régulière représentent des limites à prendre en compte dans leur déploiement.

En définitive, les panneaux photovoltaïques bifaciaux apparaissent comme une solution prometteuse et durable pour concilier sécurité énergétique et sécurité alimentaire. Leur intégration dans les systèmes agricoles constitue une étape importante vers le développement d'une agriculture plus résiliente et une gestion optimisée des ressources, tout en contribuant activement à la transition énergétique.

Chapitre 3
:
Évaluation
de
l'efficacité
et analyse
des
résultats

3.1. Évaluation de l'efficacité et analyse des résultats

Dans ce chapitre, nous allons réaliser un travail comparatif consistant à tester le fonctionnement d'une pompe à eau alimentée par deux types de panneaux solaires différents :

- Un panneau solaire monofacial (face unique) ;
- Un panneau solaire bifacial (double face).

Les deux dans les mêmes conditions climatiques, hydrauliques et techniques, afin d'évaluer objectivement l'efficacité énergétique et hydraulique de chaque configuration.

L'étude a été menée à l'aide du logiciel PVsyst 7.4.7, en simulant deux variantes sur les mêmes paramètres correspondant au site agricole situé à Metlili Chaamba, au sud de l'Algérie.

L'objectif est double

Comparer les résultats des panneaux solaires bifaciales à celles d'un système identique utilisant un panneau solaire monofacial classique, dans les mêmes conditions d'installation.

Évaluer les performances d'un système de pompage d'eau fonctionnant à l'aide de panneaux bifaciaux dans un contexte agricole.

3.1.1. Présentation du site

Le site d'étude est situé à Metlili Chaamba (wilaya de Ghardaïa), dans une région à climat désertique caractérisée par :

- un fort ensoleillement (irradiation annuelle élevée),
- une altitude de 540 m,
- une latitude de 32.27°N et une longitude de 3.63°E,
- des besoins agricoles en eau constants tout au long de l'année.

3.1.2. Présentation du logiciel PVsyst

Pour la simulation du système de pompage photovoltaïque, nous avons utilisé le logiciel PVsyst (version 7.4.7), un outil reconnu pour la modélisation, la simulation et l'analyse de performances des systèmes solaires photovoltaïques.

Ce logiciel permet d'évaluer la production énergétique d'un champ photovoltaïque en fonction des conditions climatiques locales. Il offre aussi la possibilité de simuler des systèmes spécifiques comme les pompes solaires pour l'irrigation. Ainsi il fournit des résultats détaillés concernant les pertes énergétiques, les rendements et la couverture des besoins en eau.

3.1.3. Étapes principales de la simulation

Définition du site et des données climatiques : localisation géographique (latitude, longitude, altitude) et données météorologiques (irradiation, température).

Paramétrage du champ photovoltaïque: choix du type de modules, nombre de panneaux, orientation (inclinaison et azimut).

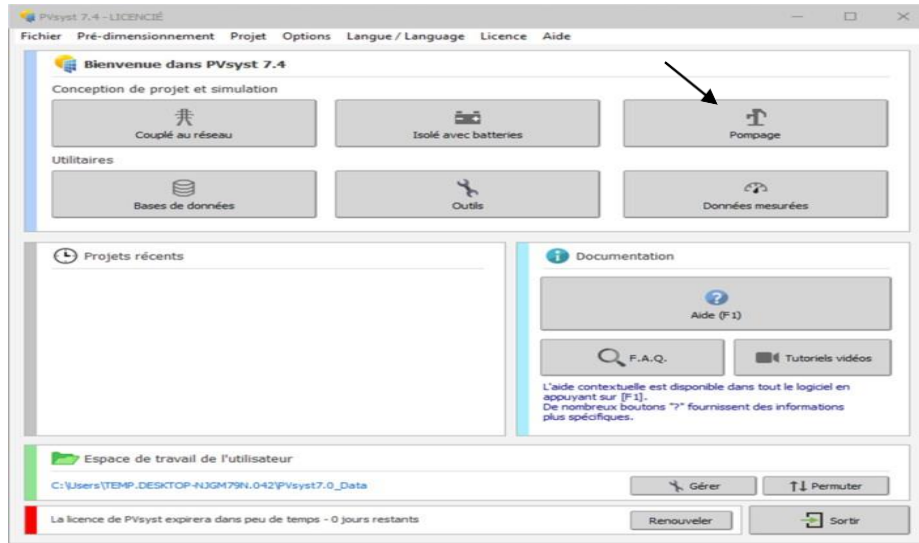
Définition du système hydraulique: profondeur du puits, hauteur manométrique, volume du réservoir, besoins journaliers en eau.

Sélection de la pompe : modèle, technologie, plage de fonctionnement et rendement.

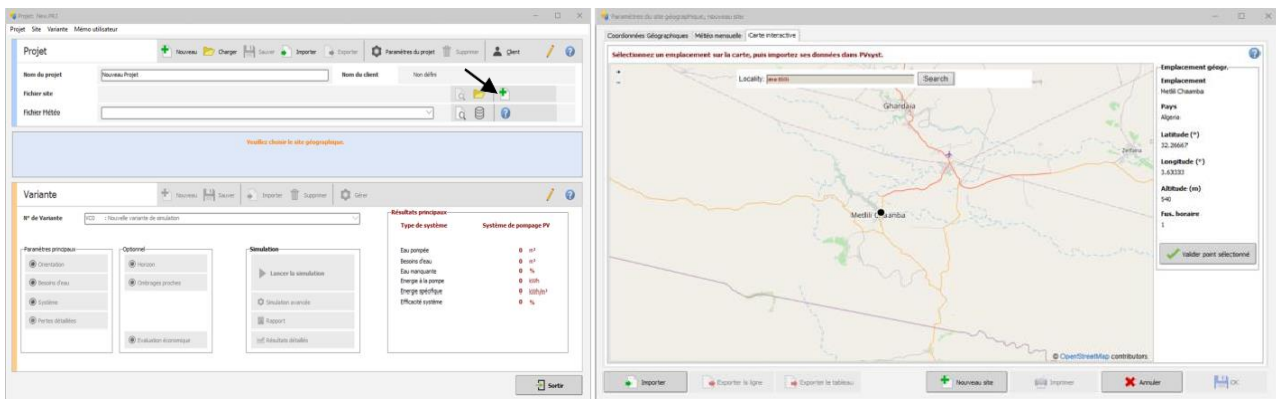
Simulation et analyse: génération de rapports incluant l'énergie produite, l'eau pompée, les pertes et les rendements.

3.1.4. Interface du logiciel

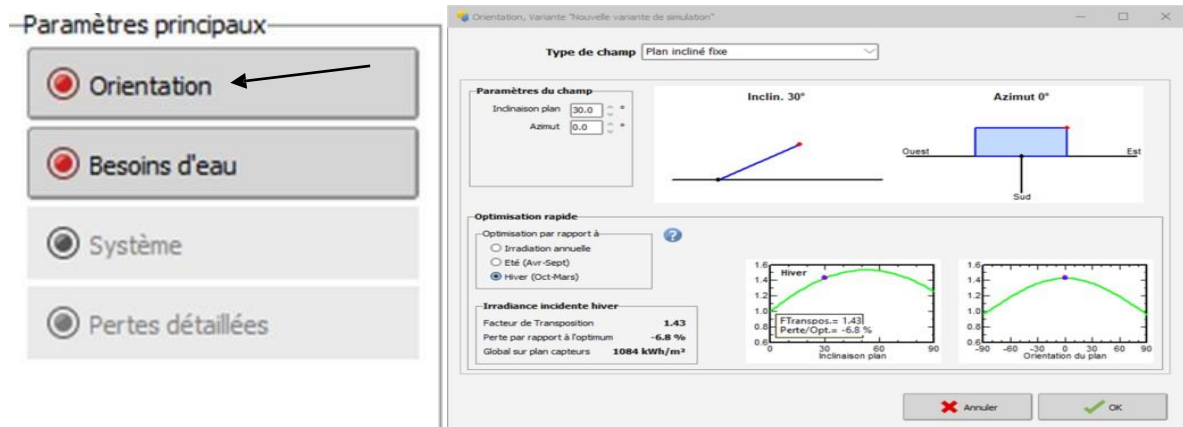
La page d'accueil de logiciel



1) Localisation géographique



2) Orientation (inclinaison et azimut)



CHAPITRE3: ÉVALUATION DE L'EFFICACITE ET ANALYSE DES RESULTAT

3) Profondeur du puits, hauteur manométrique, volume du réservoir, besoins journaliers en eau

Paramètres principaux

- Orientation
- Besoins d'eau** ←
- Système
- Pertes détaillées

4) Sélection de la pompe

Paramètres principaux

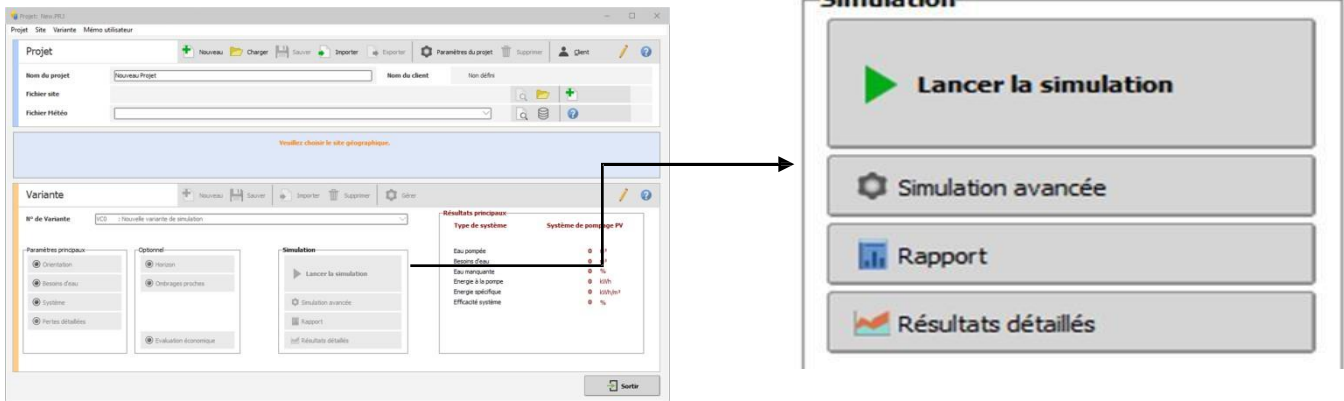
- Orientation
- Besoins d'eau**
- Système** ←
- Pertes détaillées

5) Type de modules, nombre de panneaux

Paramètres principaux

- Orientation
- Besoins d'eau**
- Système** ←
- Pertes détaillées

6) Démarrer la simulation



Matériel et méthode

3.1 Matériel utilisé

L'étude s'appuie sur la modélisation et la simulation d'un système de pompage d'eau alimenté par l'énergie solaire. Les composants du système sont détaillés comme suit :

Pompe immergée

- Marque et modèle : Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12
- Type: pompe centrifuge à courant continu
- Débit maximal : jusqu'à 18 m³/h
- Profondeur maximale d'immersion: 150m
- Tension de fonctionnement : 60–165 VDC
- Courant maximal: 30A
- Rendement élevé adapté à l'irrigation agricole : //////////////
- Contrôle intégré: adaptatif selon la puissance disponible

Régulateur/Contrôleur MPPT:

- Type: intégré au système Lorentz PS2-1800
- Fonction: suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour optimiser la production
- Protection contre la surtension, surintensité et température élevée

Réservoir de stockage d'eau

- Volume : 100 m³
- Rôle : stockage de l'eau pompée pendant les heures d'ensoleillement pour une utilisation différée .

1. Comparaison des scénarios simulés

Afin d'évaluer la pertinence de l'intégration de différentes technologies photovoltaïques dans les systèmes de pompage agricole, deux simulations ont été réalisées avec le logiciel PVsyst. La première simulation (Scénario A) concerne l'utilisation de modules monofaciaux Jinko de 250 WP (10 modules, soit une puissance totale de 2,5 kWp). La seconde simulation (Scénario B) se base sur des modules bifaciaux LONGi de 590 WP (4 modules, soit une puissance totale de 2,36 kWp).

Les résultats comparatifs sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau N (02): Les résultats comparatifs

Critère	Modules monofaciaux	Modules bifaciaux
Nombre de modules	10modules×250Wp	4modules×590Wp
Puissance nominale totale	2,50 kWp	2,36 kWp
Irradiation effective	2193 kWh/m ²	2246 kWh/m ²
Énergie à la pompe(annuelle)	3665 kWh	3671 kWh
Volume d'eau pompé	18 197m ³ /an	18 210m ³ /an
Eau non satisfaite	39m ³ (0,3%)	40m ³ (0,2%)
Énergie non utilisée (réservoir plein)	563 kWh (12,0%)	563 kWh (11,8%)
Rendement du système	78,0%	77,1%
Rendement de la pompe	43,4%	43,4%
Surface totale	16.2m ² (1.62m ² parmodules)	12.7m ² (1.82m ² parmodules)
Pertes thermiques des modules	12,25%	7,62%
Coût économique	206.2500 dz	177.000 0DZ

2. Comparaison technique et économique des scénarios photovoltaïques A et B

Les résultats présentés dans le tableau ci-dessus mettent en évidence plusieurs différences et similitudes entre les deux scénarios étudiés.

Tout d'abord, on constate que le nombre de modules diffère considérablement : dix modules Jinko de 250 Wp ont été nécessaires dans le scénario A, contre seulement quatre modules LONGi de 590 Wp dans le scénario B. Malgré cette réduction du nombre de panneaux, la puissance nominale totale des deux systèmes reste très proche (2,50 kWp contre 2,36 kWp), ce qui témoigne de la puissance unitaire plus élevée des modules bifaciaux.

En termes de type de modules, le scénario A repose sur des panneaux monofaciaux polycristallins, tandis que le scénario B utilise des modules bifaciaux mono cristallins, plus performants et capables de capter la lumière réfléchie. Cela se reflète dans l'irradiation effective, qui est légèrement supérieure pour le scénario B (2246 kWh/m² contre 2193 kWh/m²).

Concernant la production d'énergie, les deux systèmes affichent des résultats quasiment équivalents : 3665 kWh/an pour le scénario A et 3671 kWh/an pour le scénario B. Cette énergie a permis de pomper respectivement 18 197 m³/an et 18 210 m³/an, soit une différence marginale de 13 m³ par an (moins de 0,1 %).

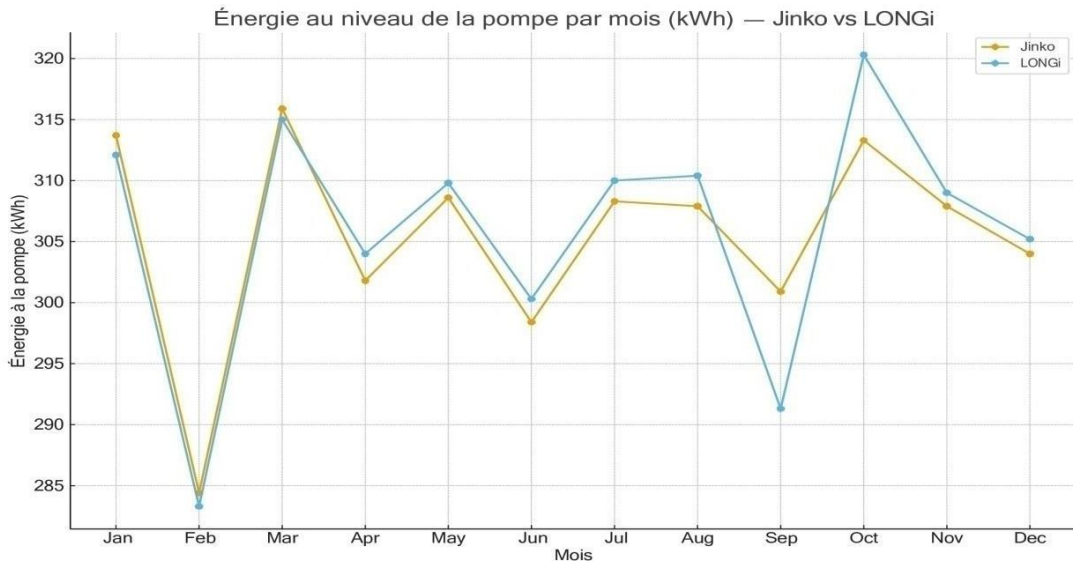


Figure III 1: Énergie réellement utilisée par la pompe chaque mois.

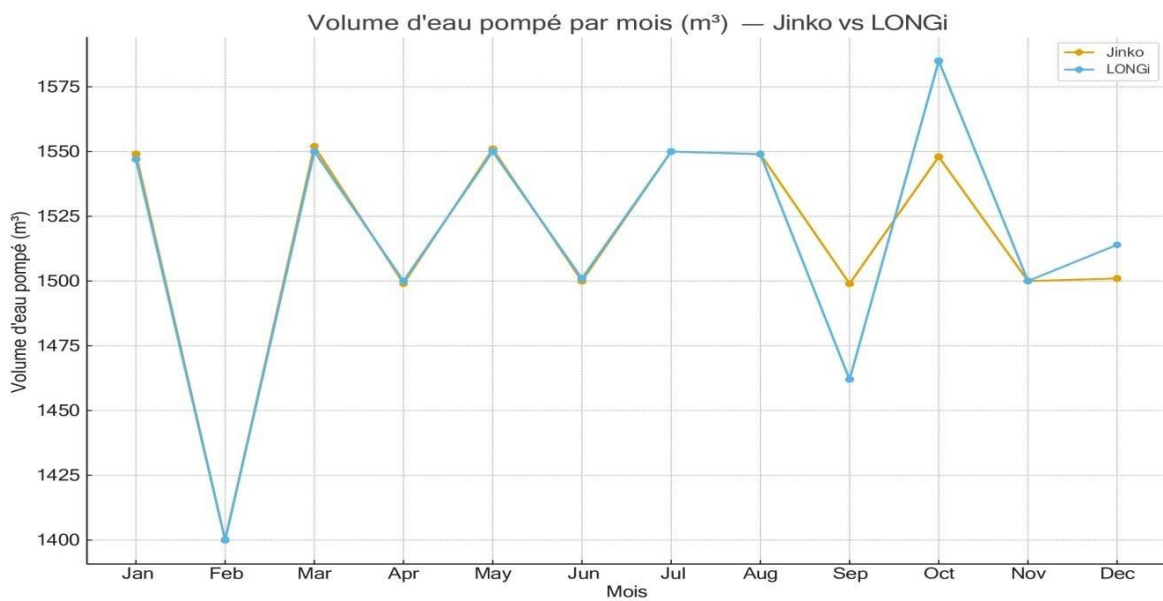


Figure III 2 : Comparaison mensuelle du volume d'eau pompé. Les valeurs proviennent des rapports PVsyst fournis

Les deux systèmes présentent aussi un volume d'énergie non utilisée similaire, dû au réservoir plein (environ 563 kWh, soit 12 % pour A et 11,8 % pour B).

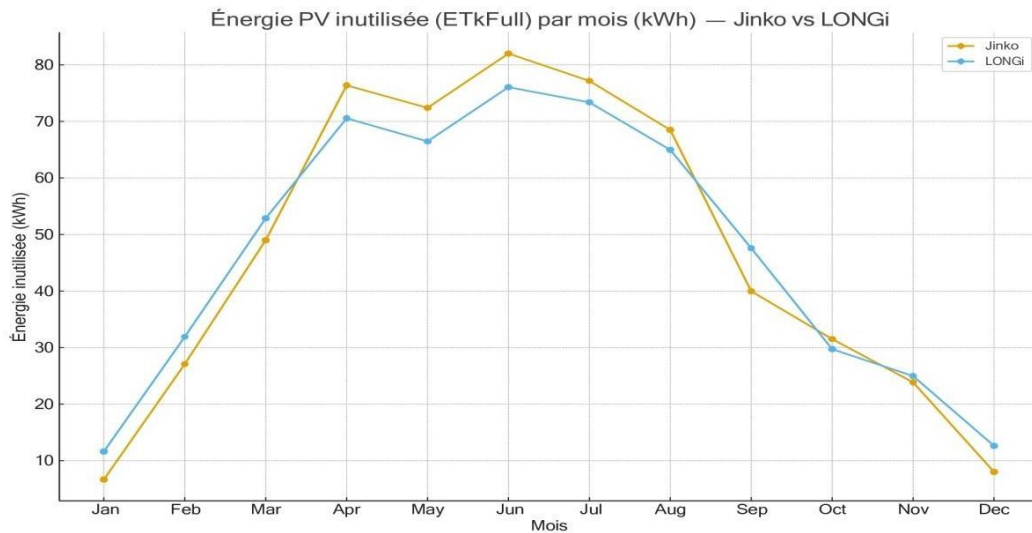


Figure III 3: Énergie PV perdue à cause du remplissage du réservoir.

Le rendement du système global est légèrement plus élevé pour le scénario A (78 % contre 77,1 %), mais la différence reste minime. Le rendement de la pompe est identique dans les deux cas (43,4 %), ces résultats indiquent que la pompe constitue le facteur limitant principal, et que l'avantage des bifaciaux se manifeste surtout dans leur rendement spécifique.

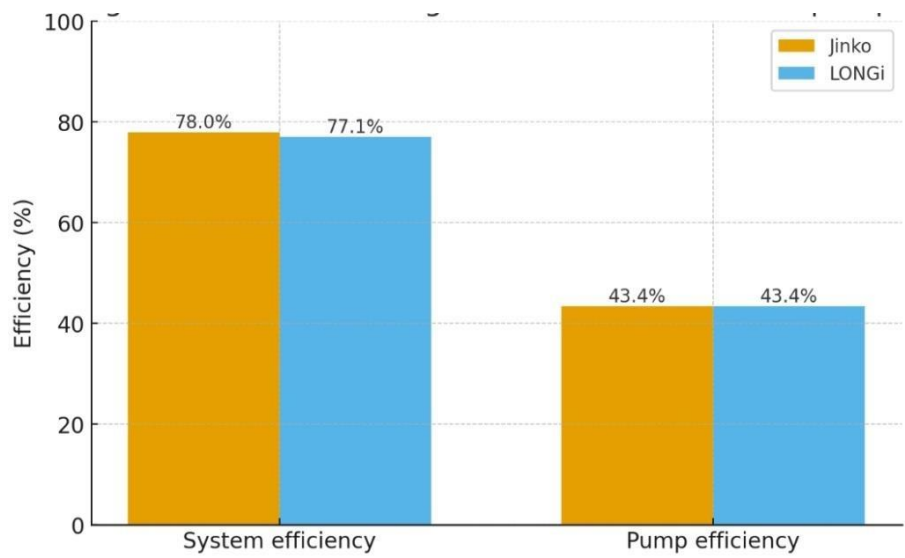


Figure III 4: Rendement global et rendement de la pompe

La différence la plus marquante réside dans les pertes thermiques des modules : elles atteignent 12,25 % dans le scénario A, contre seulement 7,62 % dans le scénario B. Cette réduction s'explique par la meilleure efficacité thermique et structurelle des modules bifaciaux, particulièrement adaptée aux environnements chauds et ensoleillés comme celui de Ghardaïa.

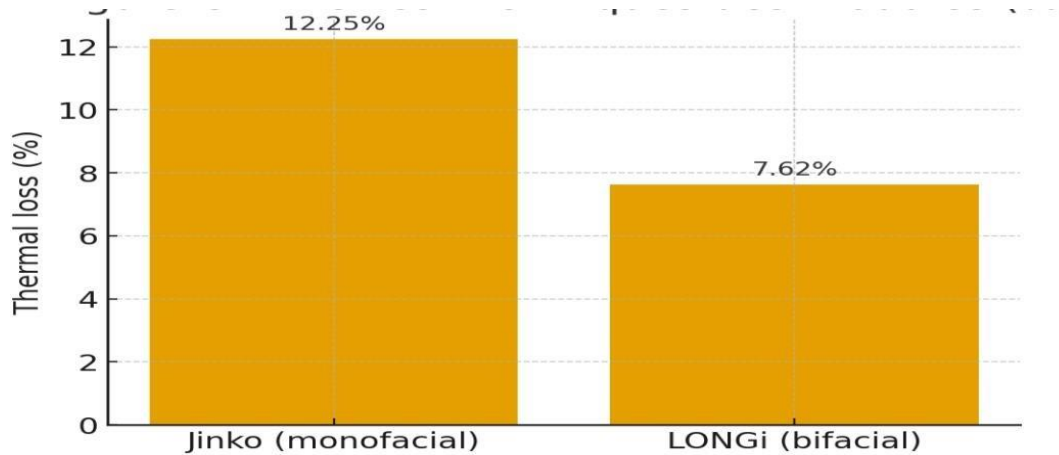


Figure III 5: Pertes thermiques des modules (%)

En résumé, les deux systèmes garantissent une couverture quasi totale des besoins en eau. Cependant, les modules bifaciaux offrent un avantage technique en termes de compacité (moins de panneaux), de performance thermique et de potentiel d'optimisation grâce à leur double captation. Ces éléments font du scénario B une solution plus prometteuse pour les projets agricoles en zones sahariennes, où la durabilité et l'efficacité à long terme constituent des critères essentiels.

Le scénario A, basé sur dix modules monofaciaux Jinko de 250 Wp, requiert une surface de montage plus importante ainsi qu'un câblage et une structure plus complexes. Cette configuration implique des coûts initiaux (CAPEX) plus élevés en termes de matériaux et de main-d'œuvre. En revanche, le scénario B, qui repose sur seulement quatre modules bifaciaux LONGi de 590 Wp, réduit considérablement les besoins en infrastructure, simplifie l'installation et minimise les risques de défaillance liés aux déséquilibres électriques entre chaînes (mismatch). Bien que le coût unitaire des modules bifaciaux soit supérieur (en moyenne +15 à 20 % par rapport aux modules polycristallins classiques), cette différence est compensée par des économies en câblage, structures et maintenance (37). Sur le plan économique, une analyse comparative met en évidence l'écart entre l'investissement initial (CAPEX) et le coût actualisé de l'énergie (LCOE). En effet, si les modules bifaciaux affichent un CAPEX légèrement plus élevé en raison de leur prix unitaire supérieur, ils assurent néanmoins une meilleure production d'énergie et donc un LCOE plus faible à long terme. Le coût économique estimé pour la solution A est de 206,25 DZD, tandis que la solution B présente un coût de 177,00 DZD. La solution A est donc plus coûteuse de 29,25 DZD, soit +16,53 % par rapport à la solution B. Sur la base de cet indicateur, la solution B est économiquement préférable. Pour confirmer cette recommandation, il est conseillé de compléter l'analyse par un calcul détaillé du LCOE, une évaluation précise du CAPEX/OPEX, la production annuelle estimée (kWh) ainsi qu'une analyse de sensibilité.

Sur le plan spatial, les panneaux bifaciaux offrent un atout majeur. Leur conception permet une installation verticale ou semi-verticale, contrairement aux panneaux monofaciaux qui nécessitent généralement une inclinaison fixe optimale. Cette possibilité de montage vertical est particulièrement avantageuse dans les zones agricoles sahariennes, car elle libère de l'espace au sol pour les cultures, facilite le passage des engins agricoles et réduit l'accumulation de sable et de poussière sur les surfaces vitrées (48) ; (49).

Concernant la durabilité, les modules bifaciaux de technologie bi-verre présentent une meilleure résistance aux conditions extrêmes (fortes températures, vent, sable), avec un taux de dégradation annuel estimé à 0,45%, contre environ 0,7% pour les modules monofaciaux (50).

D'un point de vue économique, l'indicateur LCOE (Levelized Cost of Energy) permet d'illustrer l'avantage des modules bifaciaux : les centrales solaires bifaciales affichent un coût moyen actualisé de l'électricité réduit de 5 à 10 % par rapport aux installations monofaciales (38). Si l'on rapporte ces chiffres au cas étudié, le scénario B garantirait un coût par mètre cube d'eau pompée inférieur à long terme.

En définitive, si le scénario A reste satisfaisant en termes de rendement immédiat et de couverture des besoins en eau, le scénario B offre une meilleure rentabilité à long terme, une intégration spatiale optimisée et une résilience accrue aux conditions climatiques sahariennes.

Enfin, au-delà des performances énergétiques et économiques, la surface occupée par les modules constitue un critère déterminant. Le scénario A, avec dix panneaux Jinko de 250 Wp ($\approx 1,62$ m² chacun), nécessite une surface totale d'environ 16,2 m², tandis que le scénario B, composé de quatre modules bifaciaux LONGi de 590 Wp ($\approx 2,57$ m² chacun), occupe seulement 10,3 m². Ainsi, le scénario B permet une réduction d'environ 36 % de l'espace requis pour une puissance quasi équivalente, ce qui représente un avantage majeur dans les zones agricoles sahariennes où l'optimisation de l'espace au sol et la cohabitation avec les cultures sont essentielles.

Conclusion

Ce chapitre a permis de réaliser une étude comparative approfondie entre deux configurations photovoltaïques appliquées au pompage d'eau agricole : les modules monofaciaux et les modules bifaciaux. L'analyse a montré que, malgré une puissance nominale totale proche, les panneaux bifaciaux présentent des avantages significatifs en termes de compacité, d'efficacité thermique, de durabilité et de potentiel d'optimisation énergétique grâce à leur double captation. D'un point de vue hydraulique, les deux systèmes assurent une couverture quasi totale des besoins en eau, avec des volumes pompés très similaires. Cependant, la réduction des pertes thermiques et la possibilité d'une installation verticale confèrent aux modules bifaciaux une meilleure intégration spatiale et une adaptation optimale aux conditions climatiques sahariennes. Sur le plan économique, bien que le coût unitaire des modules bifaciaux soit supérieur, les économies réalisées sur les structures, le câblage et la maintenance, ainsi que le gain en durabilité et en production d'énergie, conduisent à un coût actualisé de l'électricité (LCOE) inférieur à long terme. Enfin, l'analyse a également montré que la surface occupée par les modules représente un facteur discriminant. Le scénario A, avec dix panneaux monofaciaux Jinko de 250 Wp, requiert environ 16,2 m², contre seulement 10,3 m² pour le scénario B basé sur quatre modules bifaciaux LONGi de 590 Wp. Cette réduction d'environ 36 % de l'espace requis renforce l'avantage des bifaciaux, particulièrement dans les zones agricoles sahariennes où l'optimisation de l'espace au sol est essentielle pour permettre la cohabitation avec les cultures et faciliter l'exploitation des terrains.

Conclusion générale

Conclusion générale

À travers cette étude, nous avons démontré l'importance de l'énergie solaire dans le contexte de l'agriculture durable en Algérie, en particulier dans les régions arides et sahariennes confrontées à la rareté des ressources en eau. L'analyse menée a permis de mettre en évidence le potentiel considérable des panneaux photovoltaïques bifaciaux, qui, grâce à leur double captation, offrent une efficacité énergétique supérieure, une meilleure adaptation aux conditions climatiques extrêmes et une durabilité accrue par rapport aux panneaux monofaciaux traditionnels.

Les résultats des simulations comparatives ont montré que, même avec une puissance nominale proche, les modules bifaciaux présentent des avantages notables en termes de compacité, de réduction des pertes thermiques, de flexibilité d'installation et de coûts d'exploitation à long terme. Ces caractéristiques font des panneaux bifaciaux une solution particulièrement prometteuse pour l'alimentation en eau agricole par pompage solaire, contribuant ainsi à renforcer la résilience et la durabilité des exploitations agricoles.

Toutefois, certaines limites persistent, notamment les coûts d'investissement initiaux plus élevés et les exigences techniques liées à l'installation et à la maintenance. Ces contraintes soulignent la nécessité d'un accompagnement politique et financier adapté, ainsi que de programmes de formation et de sensibilisation pour favoriser l'adoption à grande échelle de cette technologie.

En définitive, cette recherche confirme que l'intégration des panneaux solaires bifaciaux dans les systèmes agricoles représente une voie stratégique pour concilier sécurité énergétique et sécurité alimentaire, tout en contribuant efficacement à la transition énergétique nationale. Pour l'avenir, il serait pertinent d'approfondir les travaux en élargissant l'évaluation à d'autres sites climatiques, en intégrant l'analyse économique détaillée (LCOE, coûts par m³ d'eau pompée) et en étudiant l'impact agronomique de l'ombrage partiel dans des systèmes agrovoltaïques. Ces perspectives ouvrent la voie à de nouvelles recherches et innovations, renforçant ainsi le rôle de l'énergie solaire comme pilier du développement durable en Algérie et en Afrique du Nord.



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
اللجنة الوطنية التنسيقية لمتابعة الابتكار
وحاضنات الاعمال الجامعية

دليل لمشروع

NEORAY

للحصول على شهادة مؤسسة ناشئة

في اطار القرار الوزاري 1257

بطاقة معلومات

فريق الإشراف:

المشرف الرئيسي: الاستاذ عزاوي محمد / المشرف المساعد: الاستاذ عمار هاشمي

فريق العمل:

الكلية	التخصص	فريق المشروع
العلوم و تكنولوجيا	طاقات متجددة و بيئة مهني	الطالب: بلغيث عبد الله انس
العلوم و تكنولوجيا	طاقات متجددة و بيئة مهني	الطالب: دوادي يونس

ملحق مذكرة تقديم مشروع مبتكر "NeoRay / New Ray Solar"

المحور الأول: تقديم المشروع

1. فكرة المشروع الحل المقترح:

يهدف مشروع NeoRay / New Solar إلى تأسيس وحدة صناعية متطورة في الجزائر لإنتاج ألواح شمسية مبتكرة وعالية الكفاءة. يتمحور الحل الذي يقدمه المشروع حول تصنيع ألواح ثنائية الوجه (Bifacial) باستخدام خلايا شمسية من النوع المتقدم (TypeBifacial)، وهي تقنية تسمح بامتصاص الضوء من كلا جانبي اللوح، مما يزيد من إنتاجية الطاقة بشكل ملحوظ مقارنة بالألواح التقليدية.

يأتي هذا المشروع كاستجابة مباشرة للطلب المحلي المتنامي على حلول الطاقة النظيفة، مدفوعا بالبرنامج الوطني الطموح للانتقال الطاقوي في الجزائر، والذي يهدف إلى تنويع مصادر الطاقة وتقليل الاعتماد على المحروقات. كما يساهم المشروع في تعزيز الاكتفاء الذاتي التكنولوجي والصناعي للبلاد في مجال الطاقة المتجددة.

2. الأهداف الرئيسية

- تلبية الطلب المحلي المتزايد على حلول الطاقة النظيفة والمستدامة.
- المساهمة الفعالة في إنجاح استراتيجية الانتقال الطاقوي في الجزائر. تطوير وتصنيع ألواح شمسية بتقنيات متقدمة (N-Type Bifacial) لضمان كفاءة عالية) وعمر افتراضي طويل.
- تقليل التبعية للاستيراد من خلال توطين صناعة مكونات الألواح الشمسية (مثل خط إنتاج EVA). خلق فرص عمل جديدة وتنمية الكفاءات المحلية في قطاع الطاقة المتجددة. توسيع الحصة السوقية محليًا وإقليميًا خاصة في أسواق إفريقيا جنوب الصحراء) على المدى المتوسط.
- تحقيق الاستقلال التكنولوجي والصناعي في مجال الطاقة الشمسية على المدى الطويل من خلال تصنيع الخلايا الشمسية محليًا.

المحور الثاني: الجوانب الابتكارية

يتميز مشروع NeoRay / New Ray Solar بتركيزه على الابتكار التكنولوجي والتصنيع المحلي، مما يمنحه ميزة تنافسية قوية ويساهم في تحقيق أهداف الاستقلالية الطاقوية:

1. تطوير ألواح شمسية N-Type:

• **مردودية أعلى** خلايا N-Type تتميز بكفاءة تحويل ضوئي أعلى مقارنة بخلايا P-Type التقليدية، مما يعني إنتاج كمية أكبر من الكهرباء من نفس المساحة.

• **عمر أطول** تقنية N-Type أقل عرضة للتدهور الناتج عن الضوء (LID) والتدهور الناتج عن الجهد (PID)، مما يضمن أداءً مستقرًا وموثوقًا به على مدى فترة زمنية أطول (عادةً 30 عامًا أو أكثر).

• **أداء أفضل في درجات الحرارة العالية** تحافظ خلايا N-Type على كفاءتها بشكل أفضل في درجات الحرارة المرتفعة، وهو أمر بالغ الأهمية في المناخ الجزائري.

• **تقنية ثنائية الوجه (Bifacial)**: الألواح المصنعة ستكون ثنائية الوجه، مما يسمح بامتصاص ضوء الشمس من الأمام والخلف، وبالتالي زيادة إنتاج الطاقة بنسبة تتراوح بين 5% و 30% حسب ظروف التركيب.

2. إطلاق خط إنتاج EVA محلي:

• **تقليل التبعية للاستيراد**: يعتبر فيلم EVA (Ethylene Vinyl Acetate) مكونًا أساسيًا في تصنيع الألواح الشمسية إنتاج هذا الفيلم محليًا سيقال بشكل كبير من اعتماد المشروع على الاستيراد، ويضمن استقرار سلسلة التوريد.

• **خفض التكاليف**: التصنيع المحلي لـ EVA سيساهم في خفض التكاليف الإجمالية لإنتاج الألواح الشمسية، مما يعزز القدرة التنافسية للمنتج النهائي.

• **تعزيز القيمة المضافة المحلية** يمثل هذا الخط خطوة مهمة نحو توطين صناعة مكونات الطاقة الشمسية في الجزائر.

3. خطة مستقبلية لتصنيع الخلايا الشمسية:

• **الهدف الاستراتيجي:** يطمح المشروع إلى الانتقال من تجميع الألواح إلى تصنيع الخلايا الشمسية نفسها في الجزائر خلال 3-4 سنوات.

• **تحقيق الاستقلال التكنولوجي:** هذه الخطوة ستمثل قفزة نوعية نحو تحقيق الاستقلال التكنولوجي الكامل في صناعة الطاقة الشمسية، ووضع الجزائر كمركز إقليمي للابتكار والتصنيع في هذا المجال.

• **تعزيز البحث والتطوير:** يتطلب تصنيع الخلايا الشمسية استثمارًا كبيرًا في البحث والتطوير، مما سيساهم في بناء قاعدة معرفية وتقنية قوية في البلاد.

4. الجمع بين الابتكار التكنولوجي والتصنيع المحلي:

يركز NeoRay على دمج أحدث التقنيات العالمية مع القدرات التصنيعية المحلية، مما يضمن منتجًا عالي الجودة ومصممًا خصيصًا لتلبية احتياجات السوق الجزائري والإقليمي، مع المساهمة في التنمية الاقتصادية المستدامة.

المحور الثالث: التحليل الاستراتيجي للسوق

يستند مشروع NeoRay / New Raye Solar إلى تحليل دقيق للسوق، يكشف عن فرص نمو واعدة على الصعيدين المحلي والإقليمي:

1. السوق الجزائري:

- **طلب متزايد على الطاقات المتجددة:** تشهد الجزائر تحولاً كبيراً نحو الطاقة المتجددة، مدفوعاً ببرامج وطنية طموحة مثل مشاريع "سونغاز" و"إستراتيجية الانتقال الطاقوي 2030" التي تهدف إلى إضافة 15,000 ميغاواط من الطاقة المتجددة بحلول عام 2035. هذا التوجه يخلق طلباً هائلاً على الألواح الشمسية.
- **نمو الاستيراد سجلت الجزائر زيادة غير مسبوقة في استيراد الألواح الشمسية،** حيث ارتفعت بنسبة 8400 في النصف الأول من عام 2025 ، مما يؤكد الحاجة الملحة لتوطين هذه الصناعة.
- **منافسة محلية محدودة:** السوق الجزائري يعاني من نقص حاد في المصنعين المحليين للألواح الشمسية، مما يمنح مشروع NeoRay فرصة ذهبية للريادة وتغطية جزء كبير من الطلب المحلي.

2. التوجه نحو التصدير إلى أسواق إفريقيا جنوب الصحراء:

- **سوق واعد تمثل منطقة إفريقيا جنوب الصحراء سوقاً ضخماً وواعداً للطاقة الشمسية،** حيث يعيش حوالي 600 مليون شخص بدون كهرباء موثوقة. الطاقة الشمسية هي الحل الأمثل لهذه المناطق نظراً لتكلفتها المنخفضة وسهولة تركيبها.
- **ميزة تنافسية :** الموقع الجغرافي للجزائر وقربها من هذه الأسواق، بالإضافة إلى الخبرة المكتسبة في التصنيع، يمنح NeoRay ميزة تنافسية في التصدير.
- **المساهمة في التنمية الإقليمية :** يطمح المشروع إلى المساهمة في التنمية المستدامة للقارة الأفريقية من خلال توفير حلول طاقة نظيفة و موثوقة.

المحور الرابع: خطة الإنتاج والتنظيم

تعتمد خطة الإنتاج لمشروع NeoRay على منهجية تدريجية ومراحل محددة لضمان التوسع المستدام والتحكم في الجودة:

1. مراحل الإنتاج:

• المرحلة الأولى (2026)

- إنتاج 9000 لوح شمسي كبروتوتيب أولي من نوع N-Type.
- التركيز على اختبار وتحسين جودة الإنتاج الأولي لضمان مطابقة المعايير العالمية.

• المرحلة الثانية:

- إدماج خط إنتاج EVA محليًا.
- يهدف هذا الإدماج إلى تقليل التبعية للاستيراد وخفض تكاليف الإنتاج بشكل كبير.
- توسيع القدرة الإنتاجية الإجمالية للمصنع.

• المرحلة الثالثة:

- تصنيع الخلايا الشمسية بشكل محلي في الجزائر.
- تمثل هذه المرحلة الهدف الاستراتيجي للمشروع لتحقيق الاكتفاء الذاتي التكنولوجي والصناعي.

2. الفريق المسير:

يتكون الفريق المسير لمشروع NeoRay من كفاءات متخصصة وذات خبرة في مجالات الإدارة، الإنتاج، والبحث والتطوير، مما يضمن قيادة فعالة للمشروع:

- **بلغيث عبد الله أنس:** المدير العام.
- مسؤول عن التخطيط الاستراتيجي، إدارة العمليات الشاملة، وتطوير الأعمال.
- **دوادي يونس:** المدير التنفيذي مسؤول عن الإنتاج. يشرف على جميع جوانب عمليات الإنتاج .

المحور الخامس: الخطة المالية

تعتمد الخطة المالية لمشروع NeoRay على إستراتيجية تدريجية ومرنة لضمان الاستدامة المالية والنمو، مع التركيز على تنويع مصادر التمويل

1. التكاليف التقديرية

- تكلفة خط إنتاج EVA تفوق 1000000 دينار جزائري (40,000 دولار أمريكي).
- سعر استيراد الخلايا الشمسية: حوالي 75 دينار جزائري واط سعر تقديري قابل للتغير حسب السوق).

2. إستراتيجية التمويل:

يعتمد المشروع على إستراتيجية مالية تدريجية تجمع بين مصادر التمويل المختلفة لضمان تغطية التكاليف وتحقيق التوسع المستقبلي: * **الشراكات الدولية:** البحث عن شركاء دوليين متخصصين في صناعة الطاقة الشمسية لتقديم الدعم المالي التكنولوجي، ونقل الخبرات. * **التمويل المحلي والدعم المخصص للمشاريع الناشئة :** الاستفادة من برامج الدعم الحكومي، القروض البنكية الميسرة، وصناديق الاستثمار المخصصة للمشاريع المبتكرة والناشئة في الجزائر. * **إعادة استثمار الأرباح:** سيتم إعادة استثمار جزء كبير من الأرباح المحققة في المراحل الأولى لتوسيع خطوط الإنتاج، تطوير القدرات التصنيعية، وتمويل البحث والتطوير.

3. التوقعات المالية

- **النمو التدريجي** من المتوقع أن يحقق المشروع نموًا تدريجيًا في الإيرادات مع كل مرحلة من مراحل التوسع في الإنتاج وتوطين المكونات.
- **تحقيق الربحية** سيساهم توطين إنتاج EVA والخلايا الشمسية على المدى الطويل في خفض التكاليف التشغيلية بشكل كبير مما يعزز من هوامش الربح ويضمن استدامة المشروع.
- **القيمة المضافة** : سيخلق المشروع قيمة مضافة كبيرة للاقتصاد الوطني من خلال توفير منتجات محلية، خلق فرص عمل وتقليل فاتورة الاستيراد.

المحور السادس: النموذج الأولي (Prototype)

يمثل تطوير النموذج الأولي خطوة حاسمة في مسار مشروع Neoray ، حيث سيتم من خلاله التحقق من الجدوى التقنية وتأكيد جودة المنتج:

1. تصميم البروتوتيب الأولي:

- **الكمية المستهدفة:** مخطط لإنتاج 100/10 لوح شمسي من نوع N-Type ثنائي الوجه كنموذج أولي خلال عام 2026.

- **الهدف:** يهدف هذا البروتوتيب إلى إثبات قدرة المشروع على تصنيع ألواح شمسية عالية الكفاءة محلياً، والتحقق من الأداء الفعلي للألواح في الظروف المناخية الجزائرية.

2. الخبرة العملية الأولية

- **تجميع الخلايا الشمسية ولحامها** يمتلك الفريق خبرة عملية أولية في تجميع الخلايا الشمسية ولحامها، وهي مهارات أساسية لعملية التصنيع.

- **التعلم والتطوير:** سيتم استخدام مرحلة البروتوتيب كفرصة للتعلم المستمر، تحسين العمليات، وتدريب الكوادر المحلية على أحدث تقنيات تصنيع الألواح الشمسية.

3. التدرج نحو الإنتاج الصناعي:

- **من النموذج إلى الإنتاج:** سيتدرج المشروع من مرحلة النماذج الأولية إلى الإنتاج الصناعي على نطاق واسع بعد التأكد من جودة المنتج وكفاءة عمليات التصنيع.

- **التحسين المستمر:** سيتم تطبيق مبادئ التحسين المستمر في جميع مراحل الإنتاج لضمان تقديم منتج يتوافق مع أعلى المعايير العالمية.

المحور السابع: الملاحق والشراكات

يعتمد نجاح مشروع NeoRay على شبكة قوية من الشراكات الاستراتيجية والوثائق الداعمة التي تؤكد جديته وقابليته للتطبيق:

1. اتفاقيات وشراكات مبرمة:

- اتفاق نوايا مع Nuuko تم توقيع اتفاق نوايا مع شركة Nuuko بتاريخ 2025/06/19، مما يعكس اهتمام الأطراف الخارجية بالمشروع.
- اتفاق تعاون مع Wuxi Xinrenzhi Technology Co., Ltd Bella: شراكة مع شركة صينية متخصصة في التكنولوجيا، مما يفتح آفاقًا لنقل الخبرات والتكنولوجيا.
- طلب خط إنتاج EVA من شركة JWELL: خطوة عملية نحو توطين إنتاج فيلم EVA، مما يقلل من التبعية للاستيراد.

2. مستندات إضافية:

- شعار Neo New Ray Solar: الهوية البصرية للمشروع، والتي تم إرفاقها.
- عروض تقديمية (Pitch Decks) ووثائق تسويقية توضح فكرة المشروع، أهدافه، وجدواه الاقتصادية، نموذج عمل المشروع

الجدول الزمني Roadmap مشروع NeoRay / New Ray Solar

السنة	الإجازات الرئيسية	الأهداف المرتبطة
2025	- تحضير الملف الرسمي للحصول على Label Projct Label Startup, Innovant. - توقيع اتفاقيات النوايا والشراكات (Xinrenzhi...).NuukoWuxi	الحصول على الاعتماد الرسمي والانطلاق في مرحلة التحضير.
2026	- إطلاق البروتوتيب الأول: - 10/100 لوح شمسي من نوع N-Type. - اختبار وتحسين جودة الإنتاج الأولي.	إثبات قابلية التصنيع وجودة التكنولوجيا محلياً.
2027	- إدماج خط إنتاج EVA محلياً (تقليل التبعية للاستيراد). - توسيع القدرة الإنتاجية.	تعزيز الاستقلالية وتقليل التكاليف.
2028	- الدخول في مرحلة التصدير لأسواق إفريقيا جنوب الصحراء. بناء شراكات جديدة مع موزعين ومؤسسات طاقة.	توسيع الحصة السوقية إقليمياً.
2029	- بدء العمل على مشروع تصنيع الخلايا الشمسية محلياً إدماج البحث والتطوير في تحسين الكفاءة.	الانتقال من التجميع إلى الابتكار الصناعي الكامل.
2030	- تشغيل خط إنتاج الخلايا الشمسية محلياً. - ترسيخ NeoRay كفاعل صناعي رائد في الطاقة المتجددة بالجزائر وإفريقيا.	تحقيق الاستقلال التكنولوجي والمساهمة في الانتقال الطاقي الوطني.

- 1- FAO -"The State of the World's Agriculture and Food Security"-Rome-FAO-2018 -p. 47.
- 2-FAO -"Water for Sustainable Food and Agriculture"-Rome-FAO-2020-p. 92.
- 3-Boucher,A.-"Lesénergiesrenouvelablesdansl'agriculture durable"-Montpellier- Universitéde Montpellier - 2018 - p. 56 (Mémoire de maîtrise).
- 4-Miller,R.(2019).Solar Power for Sustainable Irrigation Systems. New York :Springer.
- 5-Durand,J.(2020). Renewable Energy in Agriculture :Benefits of Solar Systems. Paris: Éditions du CNRS.
- 6-Mansouri, A. (2018). Utilisation des énergies renouvelables en agriculture: Cas pratique en Algérie. Alger : Imprimerie Académique.
- 7-Boussaâ, M. (2019). Gestion des ressources en eau dans les zones rurales algériennes.
- 8-Hilal,F.(2020).Les défis de l'eau en Algérie: Entre pénurie et opportunités. Alger: Dardes Éditions Universitaires.
- 9-Khelifi, Rachid. Énergie solaire et technologies innovantes : Focus sur les panneaux bifaciaux , Alger: Éditions Solaire Algérie, 2020, p. 34-50.
- 10-Benmehidi , Samira. Les panneaux solaires bifaciaux: Innovation et défis en Algérie, Alger: Presses Universitaires d'Alger, 2018, p. 67-89.
- 11-Boudjema, Aymen. Évaluation de l'impact des panneaux bifaciaux sur la production d'énergie solaire dans les régions arides, Alger : Institut Algérien de Recherche en Énergie, 2022, p. 54-70
- 12-Sahli, Samir. Impact des facteurs environnementaux sur l'efficacité des panneaux bifaciaux, Alger: Éditions Solaire Algérie, 2021, p. 42-56.
- 13-Benbella,Ali. Influence de l'inclinaison et de la réflectivité sur la production des panneaux solaires bifaciaux en zone désertique, Alger : Presses Universitaires d'Alger, 2020, p. 130-150.
- 14-Moulay, Ahmed. Étude comparative des facteurs influençant l'efficacité des panneaux solaires bifaciaux et monofaciaux, Alger : Institut Algérien de Recherche en Énergie, 2021, p. 60-75.
- 15-Chebbah ,Mohamed. Intégration des panneaux bifaciaux dans l'agriculture: potentiel et défis ,Alger: Éditions Algériennes d'Énergie, 2021, p. 85-103.
- 16-Merzougui, Kamel. L'impact de la technologie bifaciale dans l'agriculture moderne, Alger:Éditions Presses Universitaires d'Alger, 2020, p. 67-80.
- 16-Boudjema, Aymen. L'efficacité des panneaux bifaciaux dans les projets agrivoltaïques en Algérie, Alger : Institut de Recherche en Énergie Renouvelable, 2021, p. 50-70.
- 17-Ahmed Djawadi , Abdelhamid El yaman ,Zakaria Ben Qatran, Étude des systèmes de pompage photovoltaïque, Université d'El Oued, Algérie, 2020.

- 18-Belkacem Cherif, Salah Eddine Belkhel, Coût d'un système de pompage fonctionnant à l'énergie solaire dans le sud-est algérien, Université Kasdi Merbah Ouargla, Algérie, 2015.
- 19-Messaoud Chelghoum, YacoubGachi, Étude de dimensionnement d'un système de pompage fonctionnant à l'énergie solaire, Université KasdiMerbah Ouargla, Algérie, 2015.
- 20-Amin Himeur – Évaluation des niveaux de référence diagnostiques en imagerie médicale : étude appliquée en Algérie – Université d'Alger – 2023 – pp. 45–60.
- 21-Souad Ben Aïssa – Analyse de l'efficacité des programmes de développement rural en Algérie : étude de cas – Université d'Alger – 2022 – pp. 78–90.
- 22-KhadidjaBoussaïd – Évaluation de l'efficacité des interventions sanitaires en zones rurales : méthodologie et outils – Université d'Alger – 2021 – pp. 102–115
- 23-Boukharri,Abdelkader–Évaluation de l'efficacité des systèmes d'éclairage artificiel dans l'agriculture sous serre– Institut Technique de Développement de l'Agriculture Saharienne(ITDAS),Ouargla,2022, pp.33–48.
- 24-Abdelmalek, Youssef – Analyse économique de l'intégration des technologies d'éclairage agricole utilisant les LED en Algérie – Revue Algérienne des Énergies Renouvelables, Université de Batna, 2021, n°7, pp. 91– 105.
- 25-Benali,D.(2012).Panneaux solaires monofaciaux.
- 26-Boudjema, A. (2021). Avantages et limites des panneaux bifaciaux dans les projets agricoles.
- 27-Boucher,A.(2018).Avantages économiques et environnement aux des énergies renouvelables.
- 28-Boussaâ, M. (2019). Problématiques des ressources en eau dans les zones rurales.
- 29-CDER.(2020).Atlasolairedel'Algérie.CentredeDéveloppementdesÉnergies Renouvelables.
- 30-CDER.(2021).Technologies photovoltaïques bifaciales. Centre de Développement des Énergies Renouvelables.
- 31-Debbache,M.(2020). Schéma explicatif général du pompage solaire.
- 32-Duffie,J.A.,&Beckman,W.A.(2013).SolarEngineeringofThermalProcesses(4th ed.). Wiley.
- 33-Durand, J. (2020). Utilisation de l'énergie éolienne en agriculture.
- 34-FAO.(2020).The State of Food andAgriculture2020.Foodand Agriculture Organization.

- 35-FAO.(2021).Challenges in implementing renewable energies in agriculture .Food and Agriculture Organization.
- 36-Foillard,H. (2025).Ferme solaire–organisme français.
- 37-IEA PVPS. (2023). Trends in Photovoltaic Applications 2023. International Energy Agency – PV Power Systems Programme.
- 38-IRENA.(2022).Renewable Power Generation Costs in 2022. International Renewable Energy Agency.
- 39-Kebache, A., & Abdelhak, N. (2020). Étude sur l'efficacité des panneaux bifaciaux en Algérie.
- 40-Laour,A.(2022).Évaluation des systèmes d'éclairage agricole avec panneaux bifaciaux.
- 41-Lefèvre, J. (2020). Potentiel solaire en Algérie.
- 42-Lorraine,V.(2025).Les panneaux solaires bifaciaux: performance et perspectives.
- 43Mansouri,H.(2018).Applications de l'énergie solaire dans les zones rurales en Algérie.
- 44-Miller, T. (2019). Systèmes solaires pour l'irrigation agricole.-
- 45Moulay,K.,&Ahmed,S.(2021).Facteur influençant l'efficacité des panneaux bifaciaux.
- 46-Smith, P. (2017). Rôle de l'énergie solaire dans l'agriculture durable.
- 47-Veron,L.(2025).Technologie des panneaux photovoltaïques bifaciaux.
- 48-Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2019). Agrophotovoltaic systems: Applications, challenges, and opportunities. Applied Energy, 265, 114737. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114737>
- 49-Fraunhofer ISE. (2021).Bifacial photovoltaics : Technology and applications. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems.
- 50-Bloomberg NEF. (2022). PV Module Reliability Scorecard 2022. Bloomberg New Energy Finance.
- 51-Lecourrier d'Algérie.(2024).Utilisation des énergies renouvelables dans l'agriculture à Ghardaïa



سم: الألية والكهربوميكانيك

غرداية في: 2025/10/19

نعبة: طالبات...
خصص: طالبات...
م. ب. ب. ب.

شهادة ترخيص بالتصحيح والايدياع:

انا الاستاذة (ة) بوخاري حاسم

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

Analyse de l'efficacité des panneaux solaires bifaciaux pour l'alimentation en énergie des pompes à eau dans les projets d'agriculture

من انجاز الطالب (الطالبة):

المهندس عبد الله التاش

د. واديع بوشوش

التي نوقشت/قيمت بتاريخ: 25/09/2025

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

وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة .

مصادقة رئيس القسم

رئيس قسم الألية والكهربوميكانيك

عزواوي محمد

عزواوي محمد



مضاء المسؤول عن التصحيح