

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

UNIVERSITE de TLEMCCEN



Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie et Sciences de la Terre et de l'Univers

Département d'Écologie et Environnement

MEMOIRE

Présenté par

M^{lle} CHAIF Hadjer

En vue de l'obtention du

Diplôme de MASTER

Filière : Écologie et Environnement

Spécialité : Ecologie

Thème

**Évaluation de l'impact écologique des installations
photovoltaïques**

Soutenu le: 24/06/2026 Devant le jury d'examen composé par

Président : Mr MEZIANE Abdelkader

MCB Université de Tlemcen

Encadrente : Mme MOSTEFAOUI Zineb

MCB Université de Tlemcen

Examinatrice : Mme BARKA Fatiha

MCA Université de Tlemcen

Année universitaire 2025 – 2026

Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à **Dieu** Tout-Puissant de m'avoir accordé la force, la patience et le courage nécessaires pour accomplir ce travail. Chaque étape franchie fut une épreuve, et chaque réussite une bénédiction.

Mes remerciements les plus sincères s'adressent à Madame **MOSTEFAOUI Zineb**, qui fut bien plus qu'une enseignante ou une encadrante. Par sa bienveillance, sa patience et ses précieux conseils, elle a su me guider et m'accompagner tout au long de ce travail.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à Monsieur **MEZIANE Abdelkader**, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

Je remercie également Madame **BARKA Fatiha**, d'avoir accepté d'examiner ce travail et de l'enrichir par ses critiques constructives.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance la plus profonde ainsi que mon amour infini à mes très **chers parents**. Aucun mot ne saurait traduire l'ampleur de ma gratitude envers eux. Par leurs sacrifices silencieux, leur soutien inconditionnel et leur confiance constante, ils ont toujours été mon refuge et ma plus grande source de force. Une pensée toute particulière est dédiée à ma **chère mère**, qui a été et qui reste, après Dieu, mon plus grand soutien dans cette vie.

Je n'oublie pas mes chères sœurs **Manel, Bouchra et Asmaa**, qui m'ont toujours soutenue et encouragée avec amour, ainsi que mes frères bien-aimés **Zakaria et Djawed**, dont la présence et les encouragements ont été pour moi un véritable réconfort tout au long de ce parcours.

Enfin, je souhaite adresser un remerciement particulier à moi-même, à celle qui a continué malgré la fatigue, la maladie, la tristesse et la pression ; à celle qui a parfois douté, mais qui n'a jamais abandonné.

Je suis fière du chemin parcouru et d'avoir transformé mes épreuves en force pour atteindre ce rêve.

Ce mémoire représente bien plus qu'un simple travail académique : il incarne une étape marquante de ma vie, façonnée par la persévérance, la détermination et la foi en mes capacités.

Dédicace

À mes chers parents

Vous avez toujours été pour moi un exemple de dévouement et de générosité. Vos efforts et vos sacrifices m'ont permis d'arriver là où je suis aujourd'hui.

Que ce travail témoigne de ma profonde reconnaissance envers vous.

À mes frères et à mes sœurs

Merci pour votre soutien constant et pour tous les moments partagés qui ont rendu ce parcours plus léger.

À mes amis

Et particulièrement à ma chère amie Fatima, Vous avez su, par votre présence et vos mots d'encouragement, m'aider à avancer même dans les moments de doute.

À mes professeurs

Pour le savoir que vous m'avez transmis avec patience et dévouement, et pour avoir guidé mes pas tout au long de ce parcours.

C'est avec une immense gratitude que je dédie ce travail à chacun de vous...

Liste des matières

Introduction générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre 1 : Fondements scientifiques et techniques de l'énergie photovoltaïque

1.1. Introduction.....	5
1.2. L'énergie solaire photovoltaïque	6
1.3. La production d'électricité photovoltaïque	7
1.3.1. Définition de la cellule photovoltaïque (PV)	7
1.3.2. Principe de l'effet photovoltaïque	8
1.3.3. Les différentes générations de cellules photovoltaïques (PV).....	9
1.3.4. Optimisation du rendement	10
1.4. Les systèmes photovoltaïques	10
1.4.1. Système autonome (Off-grid)	10
1.4.2. Système raccordé au réseau (Grid-connected / On-grid)	11
1.4.3. Système hybride (Hybrid)	12
1.5. Enjeux environnementaux de l'énergie photovoltaïque.....	13
1.5.1. Développement du marché solaire	13
1.5.2. Rôle de l'énergie photovoltaïque dans les pays en développement	13
1.5.3. Bénéfices économiques et environnementaux	13
1.5.4. Contribution à la réduction des émissions de CO2	14
1.6. Conclusion	16

Chapitre 2 : Impacts écologiques des installations photovoltaïques sur l'environnement

2.1. Introduction	18
2.2. Impact des installations photovoltaïques sur l'occupation des terres	18
2.2.1. Artificialisation des sols et modification de l'usage des terres	18
2.2.2. Spécificités de l'occupation des terres dans les zones arides.....	19
2.3. Impact des installations photovoltaïques sur les émissions de CO2	19
2.3.1. Émissions de CO2 liées au cycle de vie des installations photovoltaïques	20
2.3.2. Réduction des émissions de CO2 en phase d'exploitation	21
2.3.3. Bilan carbone global des installations photovoltaïques	21
2.4. Vers une meilleure intégration écologique des installations photovoltaïques	22
2.4.1. Planification stratégique du choix du site d'implantation	22
2.4.2. Solutions technologiques pour la réduction de l'emprise au sol	22
2.4.3. Rôle des Études d'Impact Environnemental (EIE) dans la durabilité	22
2.5. Conclusion	23

Chapitre 3 : Étude comparative des performances environnementales et économiques du système PV et des systèmes fossiles en exploitation agricole

3.1. Introduction.....	25
3.2. Présentation générale de l'exploitation agricole	25
3.2.1. Localisation	26
3.3. Estimation des besoins énergétiques	26
3.3.1. Éclairage	26
3.3.2. Ventilation	27
3.3.3. Traite mécanique.....	27
3.3.4. Refroidissement et conservation du lait.....	28
3.3.5. Pompage de l'eau	28
3.3.6. Consommation électrique totale	29
3.4. Limites du système énergétique actuel.....	30
3.5. Dimensionnement du système photovoltaïque.....	30
3.5.1. Calcul de la puissance PV requise.....	31
3.6. Simulation avec le logiciel HOMER	31
3.6.1. Présentation du logiciel HOMER	31
3.6.2. Résultats de simulation	32
3.7. Analyse économique du système photovoltaïque	33
3.7.1. Méthode du coût du cycle de vie (CCV)	33
3.8. Comparaison économique : Système PV vs Système Diesel (2025/2026)	35
3.8.1. Hypothèses et données économiques 2025/2026	35
3.8.2. Calcul du coût du cycle de vie	37
3.8.3. Résultats et comparaison	39
3.8.4. Analyse et discussion	39
3.9. Comparaison des émissions de CO2 évitées.....	40
3.9.1. Facteurs d'émission utilisés.....	40
3.9.2. Équation de calcul	40
3.9.3. Application numérique.....	41
3.9.4. Tableau comparatif des émissions de CO2	41
3.9.5. Diagramme comparatif des émissions de CO2	42
3.9.6. Analyse et discussion	42
3.10. Conclusion	43

Chapitre 4 : Résultats et Recommandations

4.1. Introduction.....	45
4.2. Résultats de la simulation HOMER	45
4.2.1. Tableau récapitulatif des résultats	45

4.2.2. Bilan énergétique annuel de la configuration retenue	46
4.3. Répartition mensuelle de la production électrique PV/réseau	47
4.4. Comparaison des émissions de CO2 : PV vs Diesel	48
4.5. Synthèse générale des résultats	49
4.6. Recommandations	50
4.6.1. Recommandations techniques	50
4.6.2. Recommandations économiques.....	50
4.6.3. Recommandations écologiques.....	50
4.6.4. Recommandations stratégiques	50
4.7. Conclusion	51
Conclusion générale	52

Références bibliographiques

Résumé

Abstract

ملخص

Liste des figures

Figure 1.1 : Origine de la production électrique en Algérie en 2019 (Révolution Énergétique, 2022).	5
Figure 1.2 : Schéma simplifié d'un système photovoltaïque alimentant une habitation et connecté au réseau électrique (Groupe OPNR, s.d.).	6
Figure 1.3 : Électrification des villages isolés par des systèmes photovoltaïques (IUCN, 2010).	7
Figure 1.4 : Principe de l'effet photovoltaïque (ENGIE, s.d.).	8
Figure 1.5 : Schéma d'un onduleur convertissant le courant continu (DC) produit par les panneaux solaires en courant alternatif (AC) utilisé par le réseau électrique et les appareils domestiques (Panneaux Solaires Professionnels, s.d.).	9
Figure 1.6 : Comparaison des générations de cellules photovoltaïques : technologies, avantages et défis (Novaled, s.d.).	10
Figure 1.7 : Principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome (Dufresne, n.d.).	11
Figure 1.8 : Schéma de principe d'un système photovoltaïque raccordé au réseau (Solar Energia, n.d.).	12
Figure 1.9 : Schéma de principe d'un système photovoltaïque hybride (Génie Électromécanique, n.d.).	12
Figure 1.10 : Capacité mondiale du photovoltaïque et ajouts annuels, [2008-2018] (REN21, 2019).	13
Figure 1.11 : Analyse comparative de l'empreinte carbone par type de technologie de production d'électricité (renouvelable et non renouvelable) (National Renewable Energy Laboratory, 2021).	15
Figure 1.12 : Évolution de la capacité photovoltaïque mondiale cumulée [2000-2024] (Lightsource bp, 2025).	15
Figure 2.1 : Étapes de fabrication d'un panneau photovoltaïque. Adapté de Hello Watt.	20
Figure 2.2 : Émissions de CO ₂ par kWh généré selon la source d'énergie (XPair, 2022).	21
Figure 3.1 : Vaches de l'exploitation agricole (Cliché personnel, 2025).	25
Figure 3.2 : Machine à traire (Cliché personnel, 2025).	27
Figure 3.3 : Comparaison des émissions annuelles de CO ₂ .	42
Figure 4.1 : Production mensuelle du système PV/Réseau (30 kWp) (Mostefaoui, 2019).	47
Figure 4.2 : Comparaison des émissions cumulées de CO ₂ sur 25 ans (t CO ₂), Système Diesel vs Système PV.	48

Liste des tableaux

Tableau 3.1 : Caractéristiques géographiques et solaires de la région de Remchi.	26
Tableau 3.2 : Puissance nominale des appareils et heures de fonctionnement (Mostefaoui, 2019).	29
Tableau 3.3 : Simulation HOMER pour différentes puissances photovoltaïques (Mostefaoui, 2019).	32
Tableau 3.4 : Coût initial du système PV 30 kWc, marché algérien 2025 (Algerie360, 2025a).	36
Tableau 3.5 : Paramètres économiques du système diesel (Algerie360, 2026).	36
Tableau 3.6 : Hypothèses économiques générales 2025/2026.	37
Tableau 3.7 : Comparaison économique système PV vs système diesel, prix marché algérien 2025/2026.	39
Tableau 3.8 : Comparaison des émissions de CO ₂	41
Tableau 4.1 : Résultats d'optimisation HOMER pour les différentes configurations simulées (Mostefaoui, 2019).	45
Tableau 4.2 : Synthèse comparative des performances énergétiques, économiques et environnementales.	49

Liste des Abréviations

AC	: Courant Alternatif (Alternating Current)
ACV	: Analyse du Cycle de Vie
ADEME	: Agence De l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie
AIE	: Agence Internationale de l'Énergie
BIPV	: Bâtiment Intégré Photovoltaïque (Building Integrated Photovoltaic)
C acap	: Coût en Capital Annualisé
C ann	: Coût Annualisé Total
C aO&M	: Coût d'Exploitation et de Maintenance Annualisé
C arep	: Coût de Remplacement Annualisé
CCV	: Coût du Cycle de Vie (Life Cycle Cost)
CO₂	: Dioxyde de Carbone
COE	: Coût de l'Énergie (Cost of Energy)
CRF	: Facteur de Recouvrement du Capital (Capital Recovery Factor)
DA	: Dinar Algérien
DC	: Courant Continu (Direct Current)
DOE	: Department of Energy (États-Unis)
EE	: Efficacité Énergétique
EIE	: Étude d'Impact Environnemental
EPBT	: Temps de Retour Énergétique (Energy Payback Time)
GES	: Gaz à Effet de Serre
GSR	: Rayonnement Solaire Global (Global Solar Radiation)
HOMER	: Hybrid Optimization Model for Electric Renewables
IRENA	: Agence Internationale pour les Énergies Renouvelables
kWh	: Kilowattheure
kWc	: Kilowatt-crête (puissance photovoltaïque en conditions standard)
MWh	: Mégawattheure
NPC	: Coût Actuel Net (Net Present Cost)
NREL	: National Renewable Energy Laboratory (États-Unis)
O&M	: Exploitation et Maintenance (Operation & Maintenance)
PV	: Photovoltaïque

REN21	: Renewable Energy Policy Network for the 21st Century
SFF	: Facteur de Fonds d'Amortissement (Sinking Fund Factor)
SIG	: Système d'Information Géographique
STC	: Conditions Standard de Test (Standard Test Conditions)
THI	: Indice de Température et d'Humidité (Temperature and Humidity Index)
USD	: Dollar Américain (United States Dollar)

Introduction générale

Introduction générale :

Au cours des années passées, la consommation d'énergie a augmenté partout dans le monde, à tel point que l'énergie est devenue un moyen indispensable de nos jours. Aujourd'hui, avec la consommation très rapide des différentes énergies non renouvelables, et tout en tenant également compte de l'aggravation quotidienne de l'urgence climatique, il est devenu indispensable de proposer des solutions à ces problèmes, notamment en les remplaçant par des sources d'énergie renouvelables. C'est dans ce contexte que l'énergie solaire prend toute son importance.

Les énergies renouvelables désignent l'ensemble des moyens permettant de produire de l'énergie électrique à partir de ressources naturelles considérées comme inépuisables à l'échelle humaine. Souvent qualifiées « d'énergies vertes » ou « énergies propres ».

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est l'une des filières les plus prometteuses pour l'économie, l'emploi et l'environnement. La tendance mondiale à la baisse des coûts du PV rendra ce dernier compétitif dans un avenir proche. Ainsi la filière PV peut jouer un rôle déterminant dans le développement économique du pays, en tant que secteur d'activité, mais également dans la réduction à terme de la facture énergétique (Hadj Arab, 2011).

Dans les pays en développement, les systèmes photovoltaïques (PV) permettent de répondre efficacement aux besoins énergétiques des populations rurales. Les avantages inhérents à ces systèmes sont la modularité et l'indépendance par rapport aux carburants importés (CEI, 2008).

Le but de ce travail est d'analyser l'impact écologique des installations photovoltaïques dans les zones semi-arides. Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

Le chapitre 1 : Présente les généralités sur l'énergie photovoltaïque, le principe de l'effet photovoltaïque, la conversion de l'énergie solaire en électricité, les différents types de systèmes PV, ainsi que leurs principaux avantages et inconvénients.

Le chapitre 2 : Analyse l'impact écologique des installations photovoltaïques.

Le chapitre 3 : Propose une étude comparative des performances environnementales et économiques du système photovoltaïque par rapport aux systèmes fossiles en exploitation agricole.

Le chapitre 4 : Analyse les résultats obtenus et formule des perspectives ainsi que des recommandations pour l'optimisation des systèmes photovoltaïques.

Chapitre 1 :

Fondements scientifiques et techniques de l'énergie photovoltaïque

1.1. Introduction

Dans les pays industrialisés ainsi que dans les pays en voie de développement, l'énergie joue un rôle très important dans l'amélioration des conditions de vie et l'ouverture de nouvelles perspectives de développement. Cependant, l'utilisation abondante des combustibles fossiles impacte l'environnement, augmentant ainsi les émissions de gaz à effet de serre et le réchauffement climatique (Raihan et al., 2022). Face à ce constat environnemental, le recours aux énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire qui offre une source d'énergie propre, renouvelable et inépuisable, s'impose comme une solution durable pour atténuer ces émissions et préserver l'environnement (Panwar et al., 2011). Pour cela, notre pays doit réduire sa dépendance aux énergies fossiles et encourager le développement des sources d'énergie propres, en particulier l'énergie solaire photovoltaïque.

En effet, l'énergie photovoltaïque est considérée comme une source propre de production d'électricité, du fait qu'elle repose sur la conversion de la lumière du soleil en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque.

Dans le contexte algérien, cette ressource présente une importance particulière. Malgré un potentiel solaire immense (environ 3 000 heures d'ensoleillement par an), l'Algérie reste fortement dépendante des énergies fossiles, qui représentent près de 99 % de sa production électrique (Révolution Énergétique, 2022).

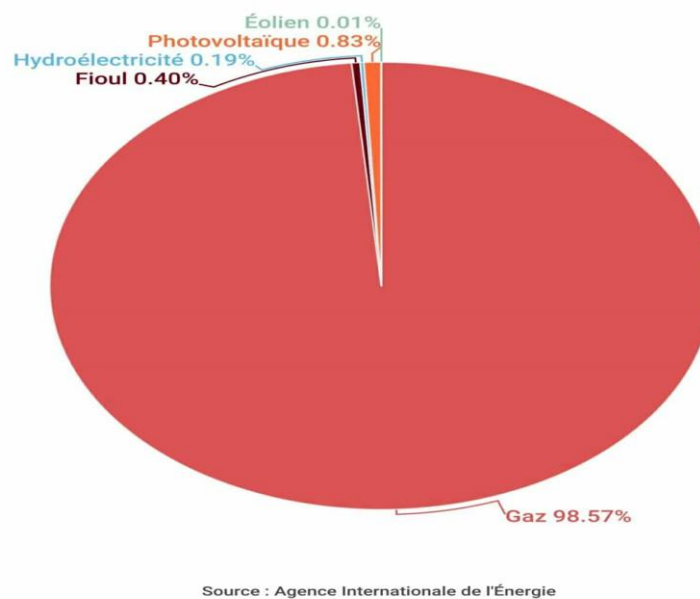


Figure 1.1 : Origine de la production électrique en Algérie en 2019 (Révolution Énergétique, 2022).

Dans ce chapitre, nous présenterons les fondements scientifiques et techniques de l'énergie solaire photovoltaïque, en abordant son fonctionnement, ses bases physiques et les principaux enjeux environnementaux liés à son déploiement.

1.2. L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie renouvelable est définie comme une alternative technologique durable et respectueuse de l'environnement, visant à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à atténuer la pauvreté énergétique. Dans une perspective de croissance à long terme, elle constitue un facteur de production essentiel qui favorise la diversification économique et l'amélioration de la qualité environnementale (Adams et al., 2018). Parmi les différentes sources d'énergie renouvelable, on distingue principalement l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique et l'énergie géothermique, chacune présentant des avantages et des limites spécifiques. Parmi ces sources, l'énergie solaire occupe une place prépondérante. En particulier, l'énergie solaire est abondante et facilement accessible dans de nombreuses régions du monde. Cela en fait une option particulièrement intéressante pour produire de l'électricité de manière durable. Par ailleurs, l'énergie solaire peut être utilisée sous deux formes principales : l'énergie solaire thermique et l'énergie solaire photovoltaïque. Les systèmes solaires thermiques utilisent la chaleur du soleil pour produire de l'énergie thermique. En revanche, les systèmes photovoltaïques permettent de convertir directement la lumière du soleil en électricité. Cette énergie est utilisée grâce aux cellules photovoltaïques, qui convertissent directement la lumière du soleil en électricité par le phénomène appelé effet photovoltaïque. Les photons excités libèrent des électrons dans le matériau semi-conducteur, créant ainsi un courant électrique utilisable dans les habitations ou injecté dans le réseau (DOE, 2024), comme l'illustre la figure suivante.

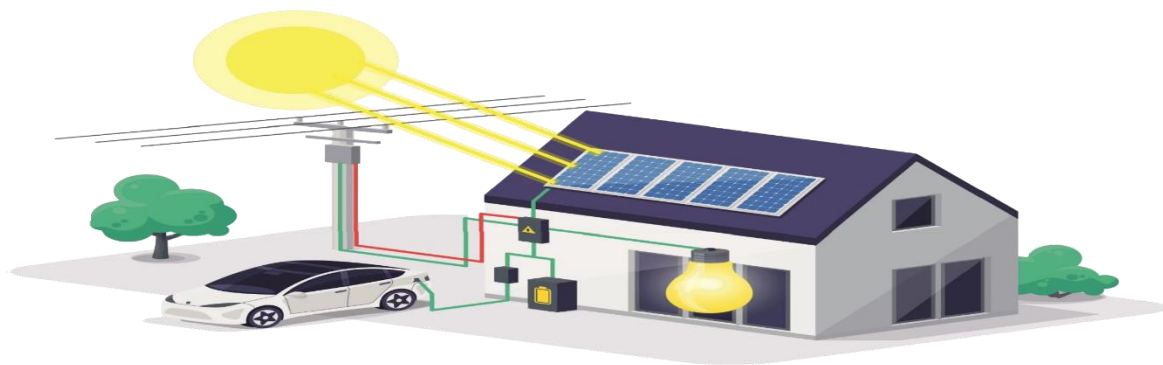


Figure 1.2 : Schéma simplifié d'un système photovoltaïque alimentant une habitation et connecté au réseau électrique (Groupe OPNR, s.d.).

Ces systèmes sont utilisés dans de nombreux domaines : les habitations, l'éclairage public, les installations industrielles et même dans les zones isolées. Un exemple d'application dans ces dernières est présenté dans la figure ci-dessous.



Figure 1.3 : Électrification des villages isolés par des systèmes photovoltaïques (IUCN, 2010).

Ainsi, cette énergie est considérée comme propre, contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la protection de l'environnement. La technologie photovoltaïque a connu une baisse rapide des coûts, et parallèlement à cette réduction et à l'amélioration des performances, le déploiement mondial des systèmes PV a fortement augmenté (Trancik & Cross-Call, 2018).

1.3. La production d'électricité photovoltaïque

1.3.1. Définition de la cellule photovoltaïque (PV)

Une cellule photovoltaïque, lorsqu'elle est exposée à la lumière (photons), génère de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Ainsi, la tension produite dépend de la quantité de lumière reçue et est un courant continu (DC).

Fabrication des cellules photovoltaïques :

Le processus de fabrication des cellules photovoltaïques repose sur la transformation de matériaux semi-conducteurs, principalement le silicium cristallin, en plaques de faible épaisseur appelées "wafers". Ces plaques subissent des traitements de surface essentiels, notamment la texturisation, afin d'optimiser le piégeage de la lumière et d'améliorer le rendement énergétique. Une fois traitées, les cellules individuelles sont assemblées et encapsulées pour constituer des modules photovoltaïques robustes, capables de résister aux conditions environnementales tout en assurant la production d'électricité (Gérenton, 2016).

1.3.2. Principe de l'effet photovoltaïque (Gomard, 2012)

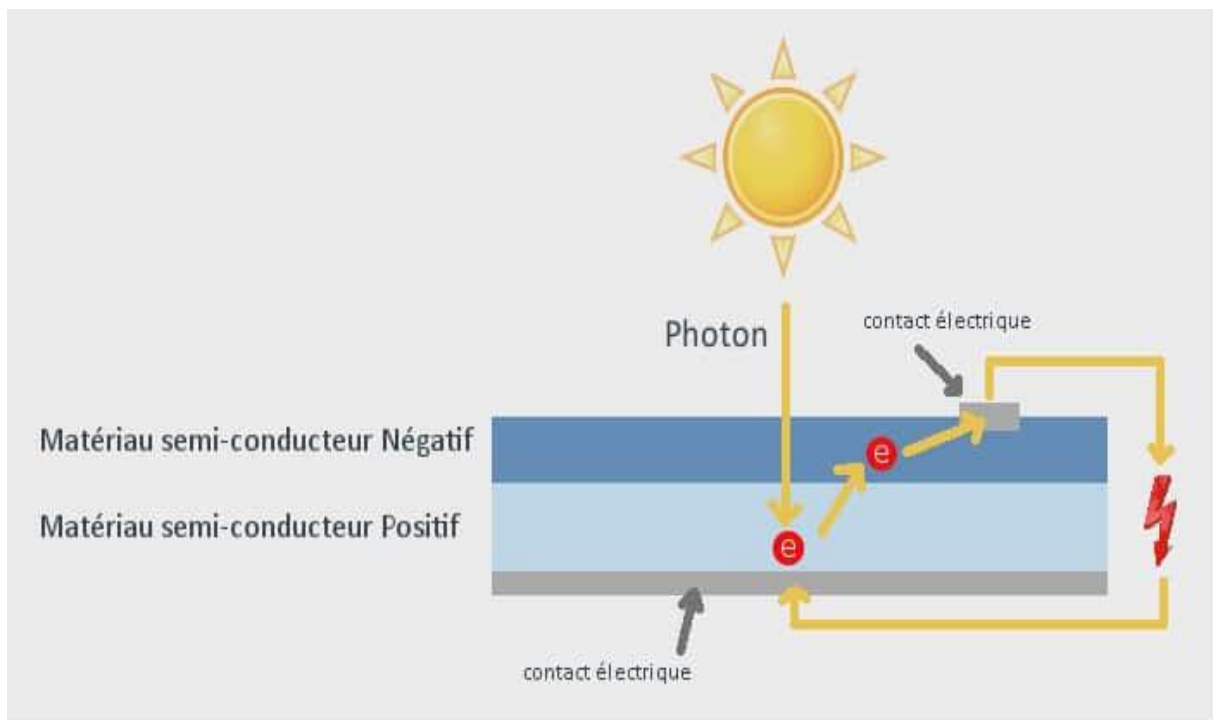


Figure 1.4 : Principe de l'effet photovoltaïque (ENGIE, s.d.).

1. Absorption de la lumière solaire :

Les photons de la lumière sont absorbés par la cellule photovoltaïque, qui est souvent fabriquée à partir de silicium. Cette énergie libère les électrons, produisant des paires de charges (électrons négatifs et "trous" positifs).

2. Séparation des charges :

À l'intérieur de la cellule, il y a un champ électrique, ce qui oblige les électrons à se déplacer dans une direction et les trous (holes) dans la direction opposée, afin d'éviter qu'elles se recombinent, ce qui prévient la perte de leur énergie.

3. Production de courant continu (DC) :

Le mouvement de ces charges vers les électrodes produit un courant électrique continu, prêt soit à être utilisé ou stocké.

4. Conversion en courant alternatif (AC) :

L'onduleur est un appareil utilisé pour transformer le courant continu en courant alternatif, qui est le courant utilisé dans le réseau électrique et les appareils domestiques.

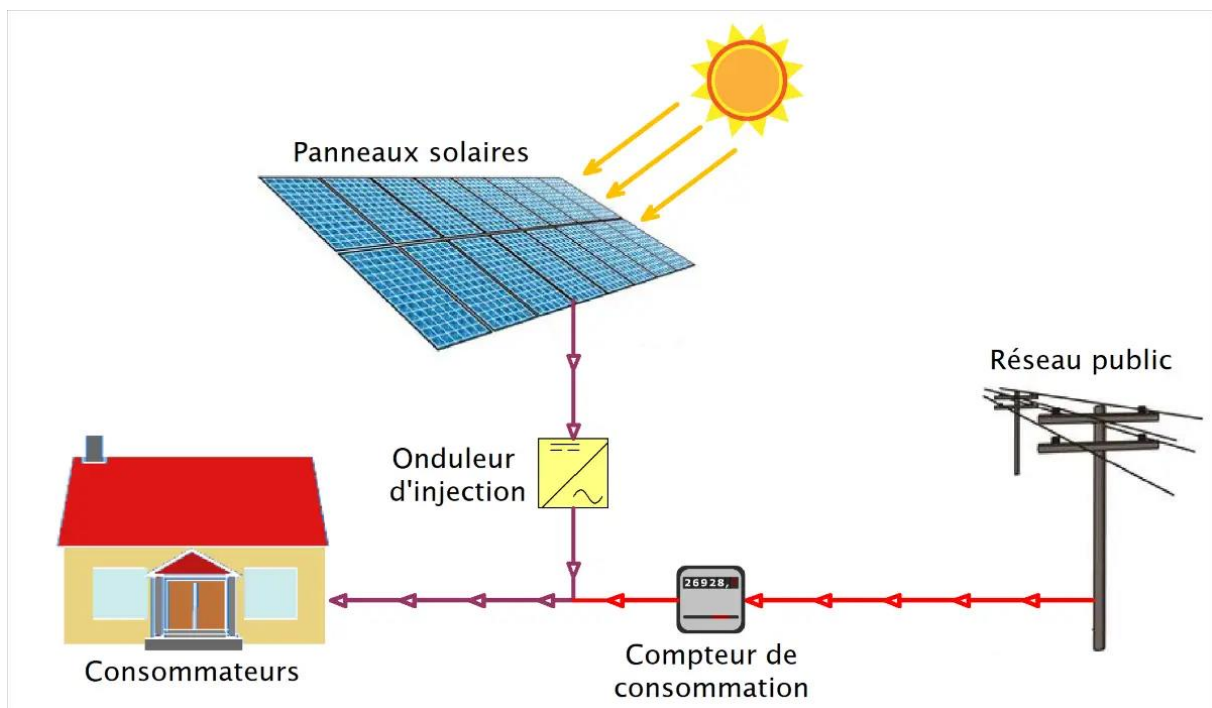


Figure 1.5 : Schéma d'un onduleur convertissant le courant continu (DC) produit par les panneaux solaires en courant alternatif (AC) utilisé par le réseau électrique et les appareils domestiques (Panneaux Solaires Professionnels, s.d.).

1.3.3. Les différentes générations de cellules photovoltaïque (PV)

On distingue trois générations de cellules photovoltaïques :

- Génération 1 : Silicium cristallin (standard, efficace mais consommant beaucoup de matière première).
- Génération 2 : Couches minces (plus légères, utilisant moins de matière, mais rendement légèrement inférieur).

- Génération 3 : Les nouvelles technologies utilisent des structures avancées afin de maximiser le rendement.

	1 ^{re} génération (1G)	2 ^e génération (2G)	3 ^e génération (3G)
Technologie	À base de wafers (jonction unique, silicium mono- ou polycristallin)	Couches minces (CdTe, CIGS, a-Si)	Organique (Polymères, petites molécules), DSSC
Avantages	Haute qualité, peu de défauts, rendement élevé	Utilisation élevée des matériaux, coût plus faible	Non toxique, abondant, faible coût, temps de retour énergétique court, transparent
Défis	Forte consommation de matériau actif (Si)	Rareté ou toxicité de certains matériaux	Optimisation du compromis durée de vie – efficacité – coût

Figure 1.6 : Comparaison des générations de cellules photovoltaïques : technologies, avantages et défis (Novaled, s.d.).

1.3.4. Optimisation du rendement

Le système photovoltaïque a été conçu dans le but de maximiser l'absorption de l'énergie. Des facteurs naturels (comme la réflexion ou la chaleur) peuvent influencer la performance, mais les technologies actuelles intègrent des solutions innovantes (couches anti-reflet, systèmes de refroidissement) pour garantir un rendement optimal au maximum et une exploitation durable de l'énergie solaire.

1.4. Les systèmes photovoltaïques

1.4.1. Système autonome (Off-grid)

Un système photovoltaïque autonome est un système conçu pour produire de l'énergie électrique dans des zones isolées sans connexion au réseau, intégrant des moyens de stockage pour assurer l'alimentation en l'absence de rayonnement solaire (ADEME, 2018).

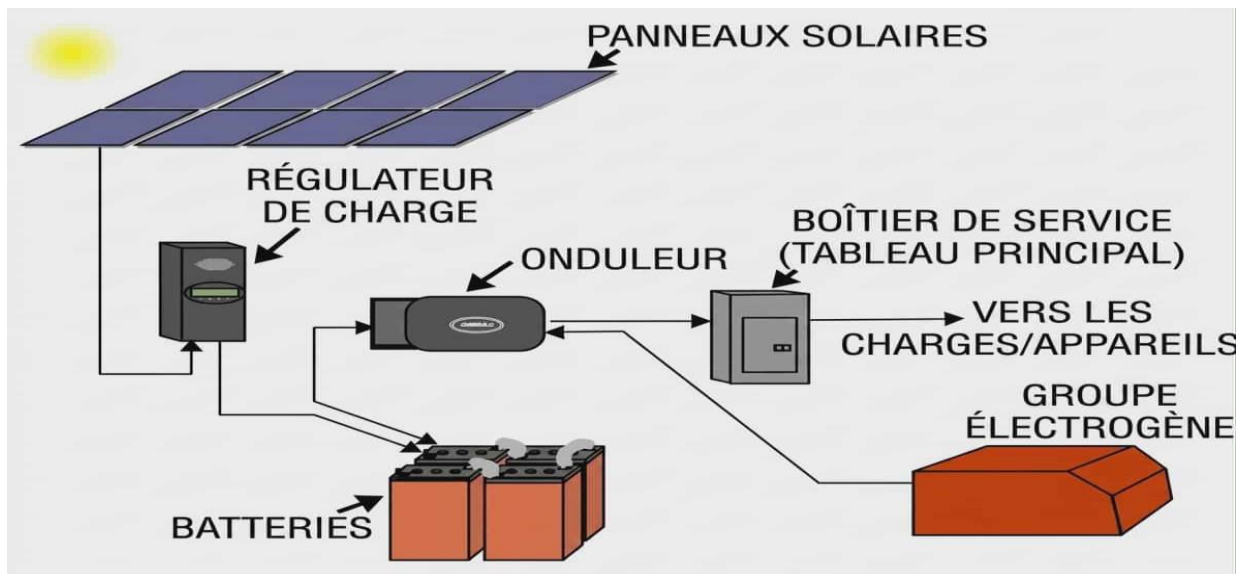


Figure 1.7 : Principe de fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome (Dufresne, n.d.).

Composants principaux (SES, s.d.) :

✓ Les batteries :

Leur rôle consiste à stocker l'énergie excédentaire produite durant la journée, afin de pouvoir l'utiliser ultérieurement (la nuit ou pendant les périodes de faible ensoleillement).

✓ Le régulateur de charge :

Il assure le contrôle et l'organisation du flux d'énergie entre le champ photovoltaïque et les batteries, les protégeant ainsi contre les surcharges et les décharges profondes.

1.4.2. Système raccordé au réseau (*Grid-connected / On-grid*)

On peut le définir comme un système qui fonctionne en connexion directe avec le réseau électrique public, permettant d'injecter l'électricité produite dans le réseau ou éventuellement de la consommer localement, sans nécessité de stockage par batteries pour son fonctionnement (Solar Energy Handbook, 2012).

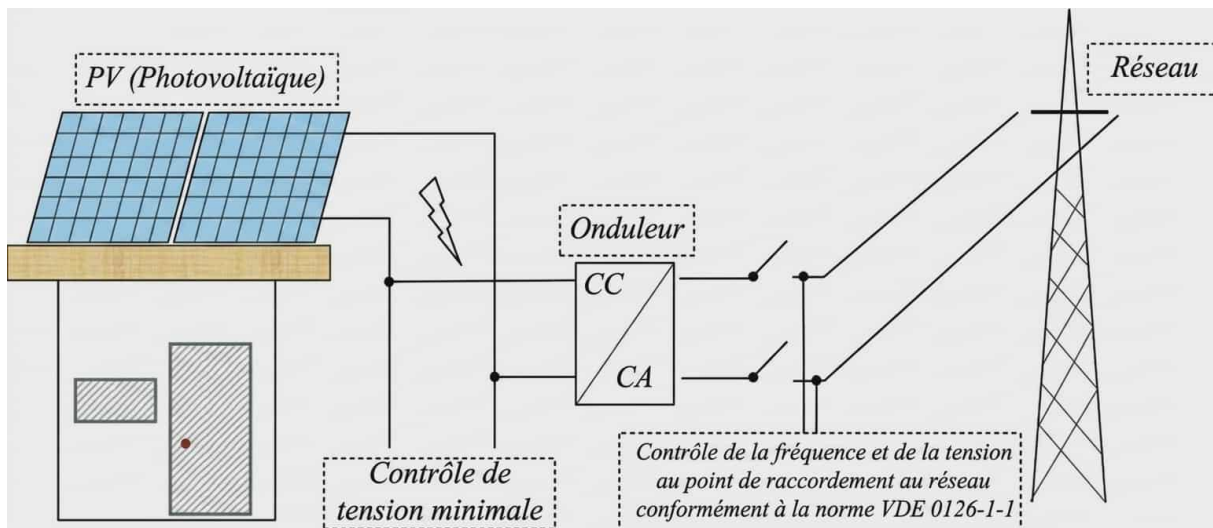


Figure 1.8 : Schéma de principe d'un système photovoltaïque raccordé au réseau (Solar Energia, n.d.).

1.4.3. Système hybride (Hybrid)

Le système hybride est une installation qui associe la production photovoltaïque à une ou plusieurs autres sources d'énergie pour garantir la continuité de l'alimentation électrique, tout en optimisant le recours à l'énergie solaire selon la disponibilité de la ressource.

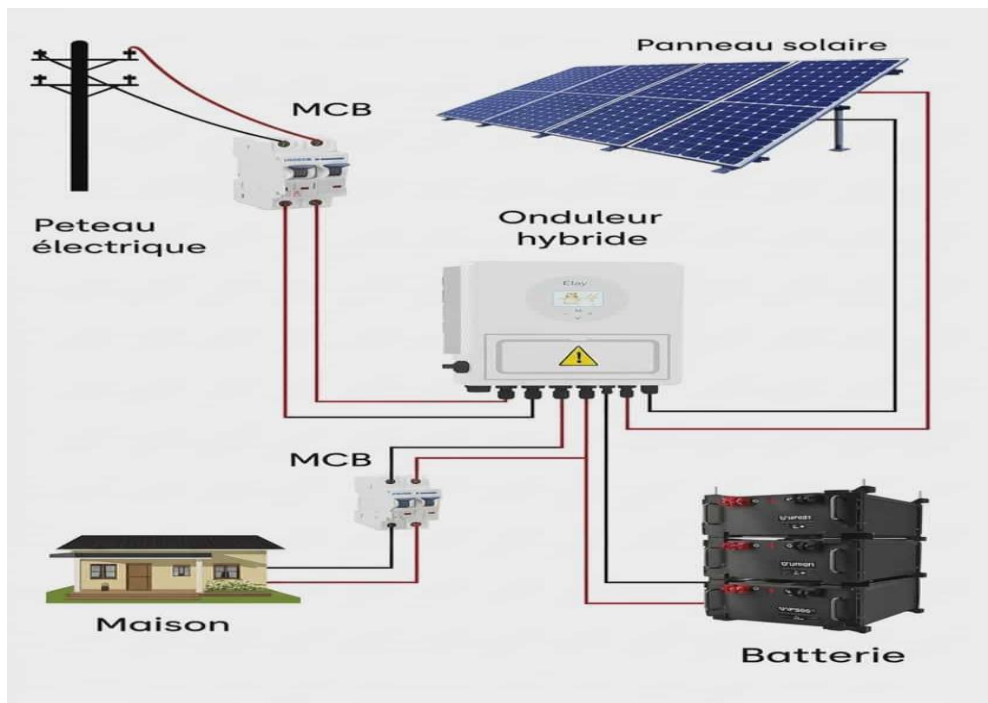


Figure 1.9 : Schéma de principe d'un système photovoltaïque hybride (Genie Électromécanique, n.d.).

1.5. Enjeux environnementaux de l'énergie photovoltaïque

1.5.1. Développement du marché solaire :

En 2018, le marché mondial du photovoltaïque solaire a continué à progresser. Même si la croissance annuelle a été relativement modérée, elle a néanmoins permis de dépasser pour la première fois le seuil de 100 GW de nouvelles capacités installées, en incluant les systèmes raccordés et hors réseau. Dans le même temps, la capacité cumulée mondiale a atteint environ 505 GW, soit une augmentation proche de 25 %. Ce développement rapide apparaît encore plus remarquable si l'on considère qu'il y a une dizaine d'années, la capacité totale installée dans le monde n'était que d'environ 15 GW (REN21, 2019).

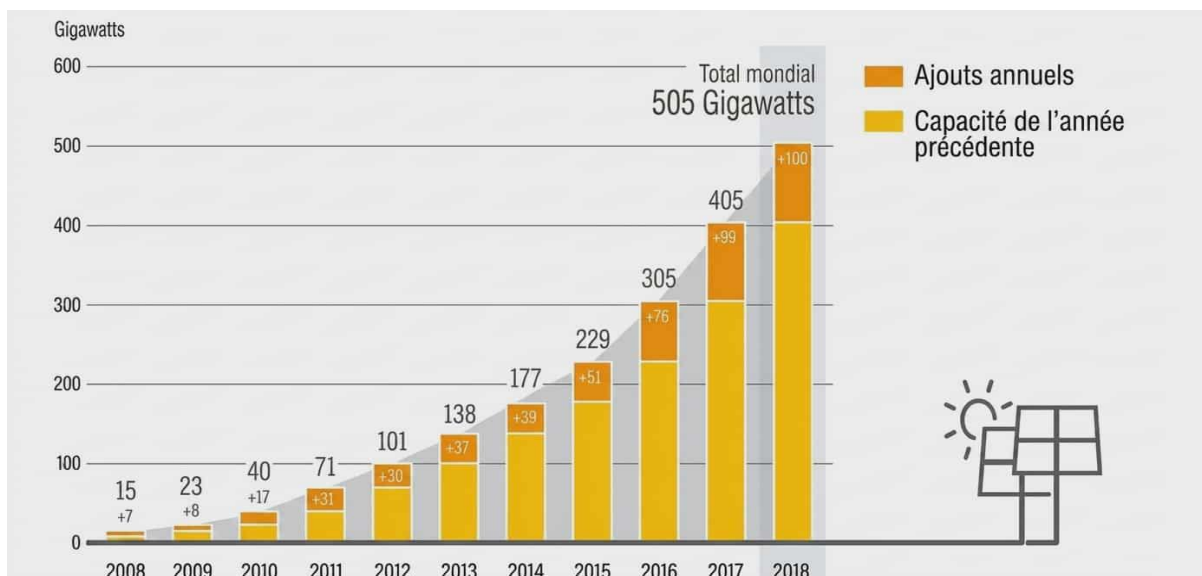


Figure 1.10 : Capacité mondiale du photovoltaïque et ajouts annuels, [2008-2018] (REN21, 2019).

1.5.2. Rôle de l'énergie photovoltaïque dans les pays en développement

Dans les pays en développement, les systèmes de production d'électricité photovoltaïque jouent un rôle important pour répondre à une partie de la demande en énergie électrique. L'intérêt pour cette source d'énergie a augmenté car elle est renouvelable, respectueuse de l'environnement et facile à installer dans différents endroits (Guney & Onat, 2008).

1.5.3. Bénéfices économiques et environnementaux

L'énergie solaire est une source d'énergie inépuisable et propre, qui ne pollue pas l'environnement. Avec la hausse des prix des combustibles ces dernières années, l'énergie

solaire est devenue plus économique qu'il y a quelques années et constitue une option intéressante dans de nombreuses régions. Elle est également un bon substitut aux sources d'énergie traditionnelles comme le pétrole et le charbon, et elle a un avenir très prometteur (Liquin & Zhixin, 2009).

L'énergie solaire présente plusieurs avantages importants. Tout d'abord, l'énergie provenant du soleil est gratuite. De plus, le soleil ne produit pas de gaz à effet de serre et est donc respectueux de l'environnement. Il sera toujours là pendant notre vie et ne s'épuise pas. L'énergie solaire permet également de limiter les consommations d'énergie commerciales inutiles et excessives des bâtiments en utilisant les systèmes naturels de chauffage et de refroidissement. Enfin, elle répond aux besoins énergétiques dans les zones sans réseau électrique (Sani et al., 2019).

1.5.4. Contribution à la réduction des émissions de CO₂

Dans les stratégies énergétiques actuelles, l'énergie solaire est considérée comme un élément clé pour lutter contre le changement climatique. La production d'électricité photovoltaïque a déjà contribué de manière tangible à la réduction des émissions de dioxyde de carbone (CO₂), les estimations indiquant une baisse de 200 à 300 millions de tonnes par an. Ce chiffre reflète un impact significatif sur l'environnement, et il reste possible que cet effet s'amplifie à mesure que l'utilisation des panneaux solaires se développe à travers le monde. Selon la progression réelle du déploiement du photovoltaïque solaire, la réduction des émissions pourrait atteindre entre un et trois gigatonnes par an d'ici 2030, ce qui souligne clairement l'importance de l'énergie solaire pour limiter les effets du changement climatique et renforcer la sécurité énergétique de manière durable (IRENA, 2016).

L'illustration ci-dessous met en évidence la variation des émissions de gaz à effet de serre selon les différentes sources d'énergie, et souligne que l'énergie photovoltaïque a un impact environnemental moindre.

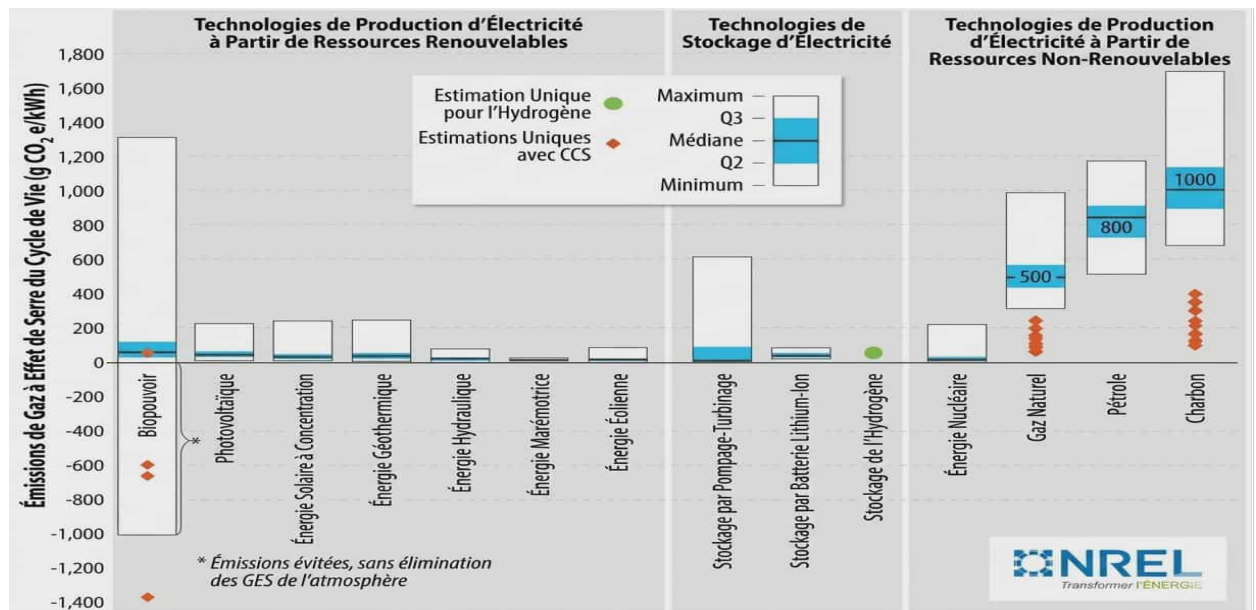


Figure 1.11 : Analyse comparative de l'empreinte carbone par type de technologie de production d'électricité (renouvelable et non renouvelable) (National Renewable Energy Laboratory, 2021).

- Pour conclure, l'énergie photovoltaïque est une énergie dont l'importance a émergé et qui connaît une croissance rapide et continue dans le monde entier, ce qui montre que son adoption augmente tant dans les pays développés que dans les pays en développement.

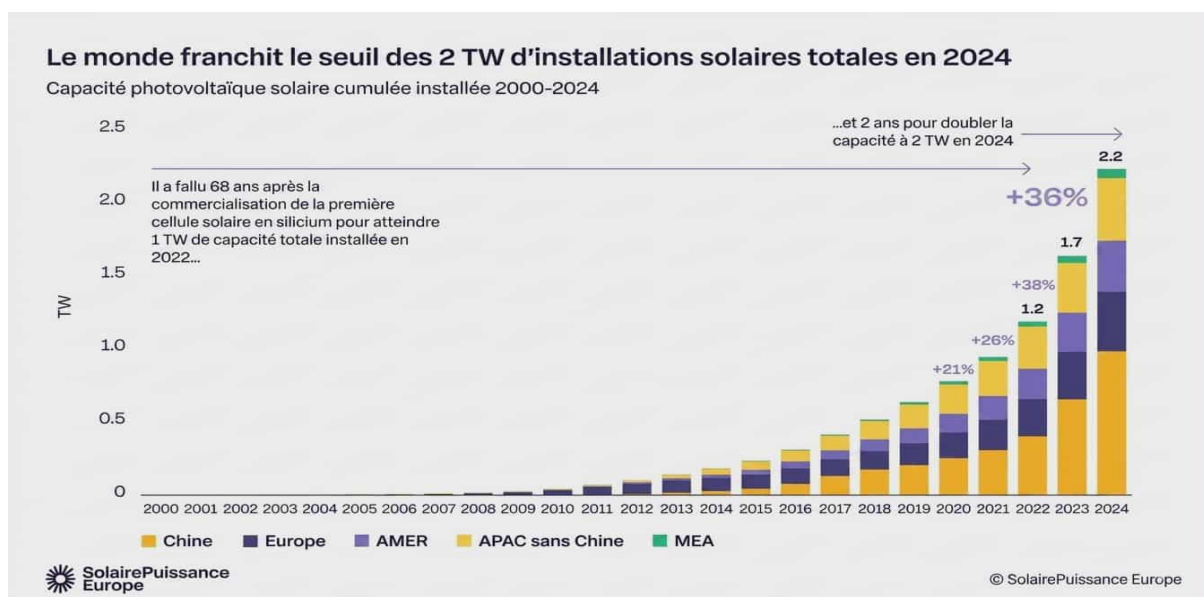


Figure 1.12 : Évolution de la capacité photovoltaïque mondiale cumulée [2000-2024] (Lightsource bp, 2025).

Cette technologie possède de nombreux avantages : sur le plan environnemental, cela se fait à travers la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la limitation de la pollution, ou sur le plan économique, car elle offre une alternative pratique aux sources d'énergie traditionnelles coûteuses telles que le pétrole et le charbon. De plus, l'énergie solaire joue un rôle principal dans la transition énergétique et soutient également les politiques durables de lutte contre le changement climatique.

1.6. Conclusion

Bien qu'il faille manipuler avec précaution certains des matériaux utilisés, l'énergie photovoltaïque reste une source propre et renouvelable, qui réduit les gaz à effet de serre et protège l'environnement (Fthenakis & Kim, 2015). C'est dans cette perspective que, dans ce chapitre, nous avons pu présenter les concepts généraux relatifs à l'énergie solaire et à l'énergie photovoltaïque. Le principe de l'effet photovoltaïque a également été expliqué, ainsi que la présentation des différents types de systèmes photovoltaïques, à savoir les systèmes autonomes, les systèmes raccordés au réseau et les systèmes hybrides. Ce chapitre a également mis en évidence l'importance croissante de cette technologie au niveau mondial, en raison de ses multiples avantages environnementaux et économiques. Elle constitue ainsi une alternative prometteuse aux sources d'énergie traditionnelles, comme le montre sa contribution à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la satisfaction de la demande énergétique croissante. Par conséquent, le développement des systèmes photovoltaïques apparaît comme un élément clé pour soutenir la transition énergétique mondiale et relever les défis posés par le changement climatique.

Chapitre 2 :

Impacts écologiques des installations photovoltaïques sur l'environnement

2.1. Introduction

Face à l'urgence climatique, les technologies photovoltaïques occupent désormais une place centrale parmi les solutions de décarbonation. Le potentiel solaire dépasse largement les besoins mondiaux en électricité. C'est une alternative crédible aux combustibles fossiles, avec une ressource pratiquement inépuisable (Hosenuzzaman et al., 2015). Installer ces infrastructures à grande échelle dans des milieux naturels n'est pourtant pas sans conséquences.

Ce chapitre n'a pas pour but de présenter le solaire comme parfait. On regarde ce qui se passe sur le terrain, concrètement : l'intégration de ces installations dans leur environnement et les moyens de réduire leur empreinte.

On commence par l'occupation des terres. La demande en espace crée parfois des tensions avec d'autres usages, mais l'agrivoltaïsme change pas mal la donne en permettant de produire de l'énergie et de cultiver sur la même parcelle (Dupraz et al., 2011). Les zones arides et semi-arides méritent une attention particulière, leur ensoleillement quasi constant en faisant des terrains particulièrement adaptés (Isaías et al., 2019).

Vient ensuite le bilan carbone. La fabrication génère une “dette carbone” au départ, c'est vrai, mais le photovoltaïque reste largement avantageux : jusqu'à 89 % d'émissions de gaz à effet de serre évitées par rapport aux réseaux électriques classiques (Fthenakis et al., 2008).

Enfin, les impacts environnementaux ne sont pas une fatalité. Tout dépend de la planification. Les systèmes d'information géographique (SIG) permettent aujourd'hui de choisir des sites efficaces sans trop sacrifier la biodiversité locale (Zoghi et al., 2017).

2.2. Impact des installations photovoltaïques sur l'occupation des terres

2.2.1. Artificialisation des sols et modification de l'usage des terres

Pour évaluer ce que le solaire peut vraiment apporter à la production électrique, il faut d'abord savoir combien d'espace ces centrales nécessitent réellement (Ong et al., 2013). Les panneaux ont besoin de place au sol, leur installation modifie forcément la configuration du terrain, ce qui n'a rien d'étonnant, et l'effet reste limité dans la plupart des cas. La majorité de ces projets s'implantent dans des zones peu exploitées, souvent arides ou semi-arides, ce qui évite en général la concurrence avec des terres agricoles productives.

Dupraz et al. (2011) vont plus loin avec le système agrivoltaïque : faire cohabiter deux usages sur une même surface, production d'énergie et culture, sans avoir besoin d'étendre les terres cultivées. Le photovoltaïque cesse alors d'être un concurrent de l'agriculture pour devenir un complément. La logique rappelle un peu l'agroforesterie, sauf qu'ici les arbres sont remplacés par des panneaux. Les auteurs notent un effet positif qu'on n'attend pas forcément : l'ombre projetée par les structures réduit le stress hydrique des cultures et limite les températures foliaires excessives.

Ong et al. (2013) montrent aussi que les besoins fonciers des centrales photovoltaïques restent comparables à ceux d'autres technologies de production électrique, sachant que cela varie selon le type d'installation et sa configuration. L'amélioration continue du rendement des panneaux tend par ailleurs à réduire la surface nécessaire par unité produite.

2.2.2. Spécificités de l'occupation des terres dans les zones arides

Les régions arides et semi-arides couvrent environ 40 % des terres émergées et abritent une part importante de la population mondiale. On les imagine souvent stériles. Pourtant ces écosystèmes jouent un rôle clé dans les cycles biogéochimiques planétaires, notamment pour le stockage du carbone. Ils restent très fragiles : précipitations irrégulières, sols peu fertiles, vulnérabilité élevée à la désertification. Reynolds et al. (2007) soulignent que restaurer ces terres une fois dégradées reste un processus complexe et souvent peu efficace, d'où l'intérêt de privilégier des approches de gestion adaptées plutôt que correctives.

Ces régions sont considérées comme particulièrement propices à l'implantation de technologies solaires grâce à un ensoleillement intense et quasi permanent. Des études récentes confirment des niveaux élevés de rayonnement solaire global (GSR), avec une fréquence de ciel dégagé qui dépasse celle des régions humides. Les modèles de prévision actuels permettent en plus d'estimer ce rayonnement avec une précision élevée, ce qui stabilise la production et réduit les fluctuations, un atout naturel pour ces systèmes (Jamei et al., 2023).

Zhang et al. (2024) ajoutent que développer le photovoltaïque dans ces zones arides limite les conflits d'usage des terres. Utiliser des terrains à faible valeur agricole permet de préserver les surfaces cultivables et de soutenir la sécurité alimentaire, tout en développant les énergies renouvelables.

2.3. Impact des installations photovoltaïques sur les émissions de CO2

2.3.1. Émissions de CO₂ liées au cycle de vie des installations photovoltaïques

Le photovoltaïque a la réputation d'être propre, et c'est globalement vrai. Sa fabrication, elle, consomme beaucoup d'énergie, qu'on désigne souvent par le terme d'"énergie grise" pour désigner cette consommation, liée surtout à l'extraction des matières premières et à la purification du silicium. Cette dernière étape représente à elle seule près de 45 % de l'énergie totale mobilisée sur l'ensemble du cycle de vie du panneau (Fthenakis et al., 2008). Ces opérations industrielles génèrent inévitablement du CO₂, dans une mesure qui dépend surtout du mix énergétique utilisé en production (Fthenakis et al., 2008).

Ces émissions restent quand même bien inférieures à celles des énergies fossiles. Le photovoltaïque permet d'éviter au moins 89 % des émissions de gaz à effet de serre par rapport aux réseaux électriques traditionnels (Fthenakis et al., 2008). L'impact réel de cette phase dépend largement des sources d'énergie mobilisées en production, ce qui plaide pour une fabrication plus propre dans l'industrie elle-même.

La Figure 2.2.1 détaille les étapes de fabrication d'un panneau, de la production du silicium jusqu'au module fini.

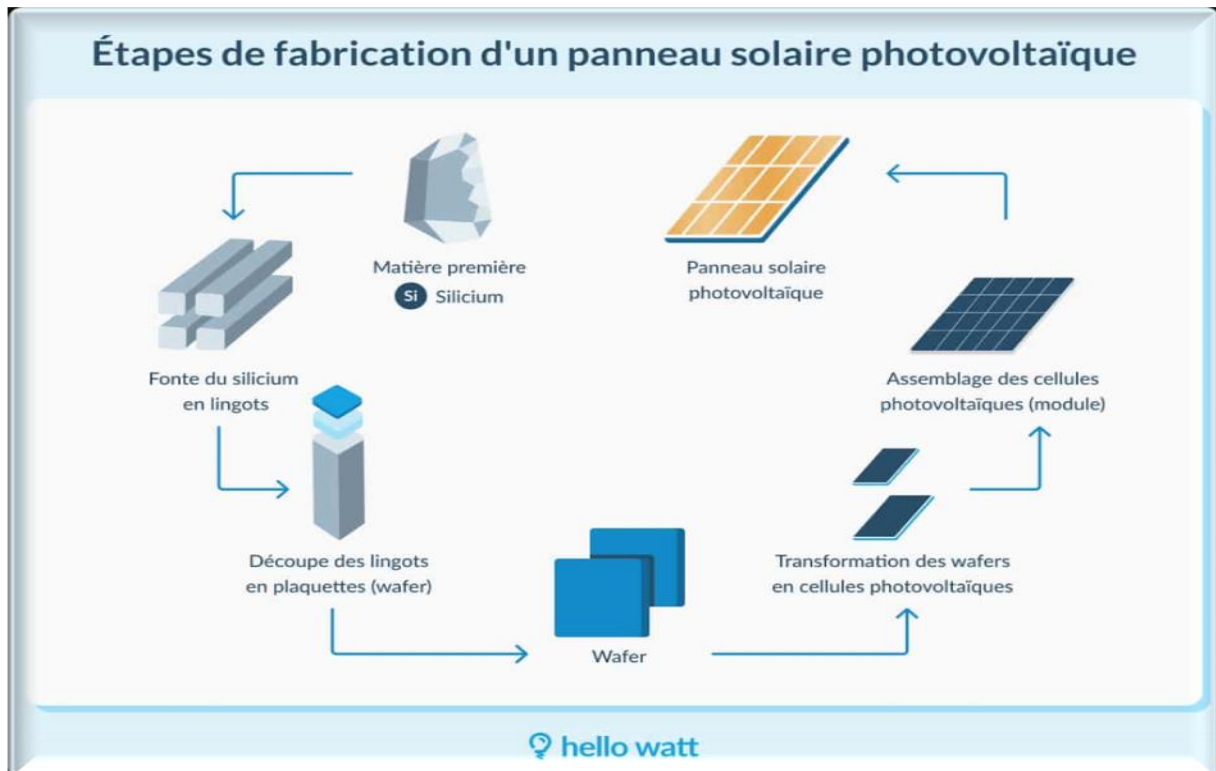


Figure 2.1: Étapes de fabrication d'un panneau photovoltaïque. Adapté de Hello Watt

2.3.2. Réduction des émissions de CO₂ en phase d'exploitation

À la différence des systèmes thermiques classiques, une cellule photovoltaïque produit de l'électricité par conversion directe. Aucune combustion n'entre en jeu, donc aucun recours aux combustibles fossiles (Urbina, 2023).

La phase d'exploitation ne génère ni CO₂, ni fumée, ni polluant atmosphérique (Nicholson & Heath, 2021). C'est probablement l'étape la plus favorable sur le plan environnemental dans tout le cycle de vie du système.

2.3.3. Bilan carbone global des installations photovoltaïques

Quand on évalue l'impact environnemental global du photovoltaïque, un point ressort : malgré son statut d'énergie bas-carbone, il commence sa vie avec une dette. Celle-ci vient de l'extraction des matières premières et de la fabrication du silicium, pas du fonctionnement des panneaux eux-mêmes (Fthenakis et al., 2008). La dette se rembourse vite, cela dit. Selon Muteri et al. (2020), les panneaux compensent leur empreinte carbone initiale en moins d'un an à 4,65 ans, selon le type de technologie et la localisation géographique. Passé ce délai, le système devient nettement bénéfique pour le climat : il produit une électricité dont les émissions restent 10 à 20 fois inférieures à celles des énergies fossiles tout au long de sa durée de vie (National Renewable Energy Laboratory, 2012). La Figure 2.2.3 illustre cet écart par rapport au gaz, au pétrole et au charbon.

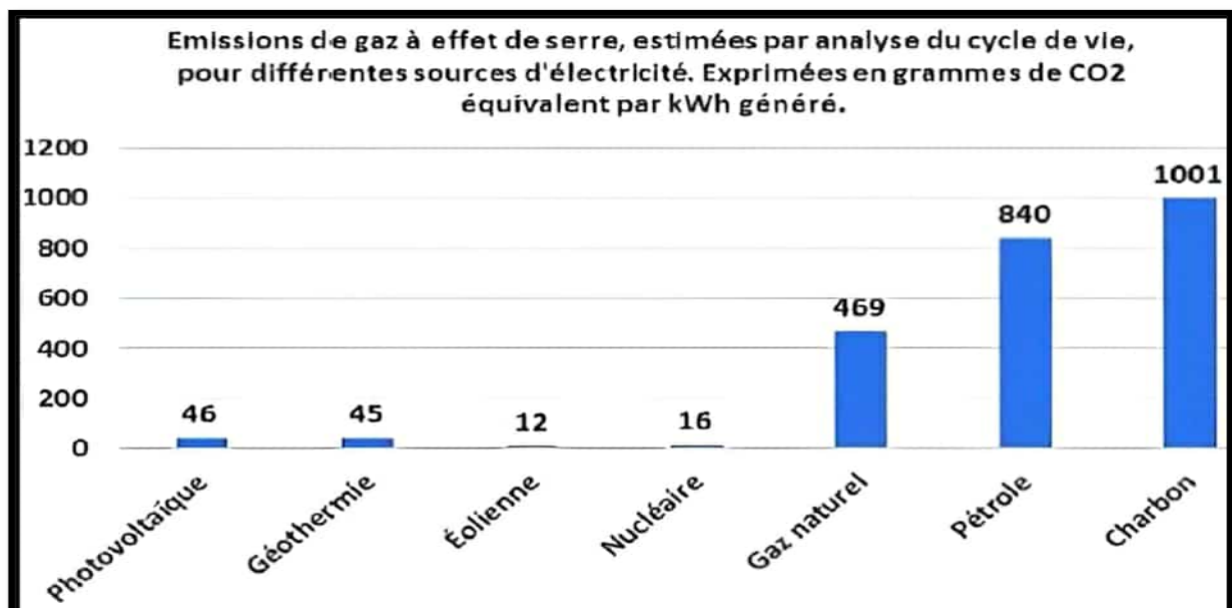


Figure 2.2 : Émissions de CO₂ par kWh généré selon la source d'énergie (XPair, 2022).

Le photovoltaïque ne se réduit pas à une solution technique de production électrique. C'est aussi un levier sérieux pour avancer vers la neutralité carbone, en conciliant besoins énergétiques et protection du climat sur le long terme (Urbina, 2023).

2.4. Vers une meilleure intégration écologique des installations photovoltaïques

2.4.1. Planification stratégique du choix du site d'implantation

Tout commence par le choix du site. C'est la première décision qui détermine vraiment l'impact environnemental du projet, surtout dans des écosystèmes sensibles comme les zones semi-arides. Bošnjaković et al. (2023) montrent qu'implanter ces centrales sur des terres déjà dégradées, ou les intégrer à des infrastructures existantes, réduit nettement les conflits d'usage et protège les habitats naturels de la fragmentation. Choisir un site bien ensoleillé raccourcit aussi le “temps de retour énergétique” (EPBT), ce qui rend le projet plus rentable écologiquement en compensant plus vite les émissions liées à sa fabrication (Ramirez-Camargo & Schachter, 2019). Intégrer un couvert végétal sous les panneaux crée par ailleurs un microclimat local qui les refroidit par évapotranspiration, optimisant ainsi les conditions environnementales et écologiques du site (Li et al., 2026).

2.4.2. Solutions technologiques pour la réduction de l'emprise au sol

Pour limiter la surface occupée, les efforts actuels portent surtout sur l'amélioration du rendement des cellules, afin de réduire le nombre de panneaux nécessaires pour la même production. Les systèmes photovoltaïques intégrés au bâti (BIPV) permettent en parallèle d'exploiter façades et toits, ce qui épargne de vastes étendues de terres naturelles (Bošnjaković et al., 2023). Les cellules à couches minces (thin-film) jouent aussi un rôle ici : elles demandent moins de matières premières, ce qui réduit la taille des structures métalliques et l'impact physique sur le sol. Le “double usage du sol” via l'agrivoltaïsme ne se contente pas d'optimiser l'espace disponible. Il offre aussi un ombrage qui protège les sols arides de la dessiccation et améliore la gestion des eaux pluviales (Wang et al., 2023).

2.4.3. Rôle des Études d'Impact Environnemental (EIE) dans la durabilité

L'Étude d'Impact Environnemental (EIE) reste un outil incontournable, à la fois juridique et scientifique, pour garantir la durabilité d'un projet sur toute sa durée de vie. Bošnjaković et al. (2023) insistent sur l'importance d'une Analyse du Cycle de Vie (ACV) complète, afin de limiter

les risques de fuite de métaux lourds et mieux gérer les déchets en fin de vie. La technologie progresse vers moins de substances toxiques comme le plomb ou l'argent, et ces études permettent de choisir les composants les moins risqués pour l'environnement local (Ludin et al., 2021).

2.5. Conclusion

Ce chapitre montre que le photovoltaïque demeure la solution la plus cohérente pour avancer dans la transition énergétique. Aucune infrastructure humaine n'est neutre pour son environnement, mais les bénéfices du solaire pèsent largement dans la balance. Il répond concrètement au défi climatique tout en restant compatible avec la préservation de la biodiversité, à condition d'une planification sérieuse. Cette énergie représente une réelle opportunité pour protéger durablement notre planète, plutôt qu'une menace pour les écosystèmes.

Chapitre 3 :

Etude comparative des performances environnementales et économique du systèmes PV et des systèmes fossiles en exploitation agricole

3.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'analyse d'une exploitation agricole située dans la ville de Remchi, wilaya de Tlemcen. L'objectif est de déterminer ses caractéristiques, ses besoins énergétiques et son mode de fonctionnement actuel, afin d'évaluer la possibilité d'intégrer un système photovoltaïque solaire comme alternative durable et adaptée aux conditions locales.

La problématique centrale de ce chapitre peut être formulée comme suit : comment améliorer la performance énergétique de l'exploitation agricole étudiée en intégrant des systèmes photovoltaïques, dans le contexte d'une région semi-aride à fort ensoleillement ?

Ce chapitre s'articule autour de trois parties principales :

- La présentation de la ferme et l'identification de ses besoins énergétiques.
- Le dimensionnement du système PV proposé.
- L'étude économique comparative entre le système photovoltaïque et le système diesel conventionnel.

3.2. Présentation générale de l'exploitation agricole

L'exploitation étudiée est une ferme laitière située dans la région de Remchi, wilaya de Tlemcen, dans le nord-ouest de l'Algérie. Cette région est caractérisée par un climat méditerranéen semi-aride, avec des étés chauds et secs et des précipitations faibles et irrégulières. Ces conditions influencent directement les besoins en énergie et en eau de l'exploitation. La ferme s'étend sur une superficie d'environ 450 m² comprenant une salle de traite, une salle de stockage des produits agricoles, ainsi qu'un espace de pâturage. Elle compte 50 vaches laitières se nourrissant de maïs, ainsi qu'un effectif d'ovins et de volailles.



Figures 3.1 : Vaches de l'exploitation agricole (Cliché personnel, 2025)

3.2.1. Localisation

La région de Remchi présente les caractéristiques géographiques suivantes :

Tableau 3.1 : Caractéristiques géographiques et solaires de la région de Remchi.

Paramètre	Valeur
Latitude	35,06196° N
Longitude	-1,43362° E
Altitude	~109–200 m
Ensoleillement annuel	2800-3200 heures/an
Rayonnement global moyen	5,48 kWh/m ² /jour (mois favorable)

3.3. Estimation des besoins énergétiques

La consommation électrique de la ferme laitière couvre cinq postes essentiels : l'éclairage, la ventilation, la traite mécanique, le refroidissement du lait et le pompage de l'eau. Les paramètres utilisés sont issus des données techniques de la ferme et de la littérature scientifique, et leur somme donne la consommation journalière totale de l'exploitation.

3.3.1. Éclairage

L'éclairage artificiel est indispensable au bon fonctionnement d'une ferme laitière moderne. Des études ont démontré qu'une photopériode de 16 heures de lumière favorise la production laitière chez les vaches Holstein via la stimulation de la prolactine (Auchtung et al., 2005). Sur le plan énergétique, l'éclairage représente environ 10% de la consommation électrique totale, soit jusqu'à 1 kWh par vache et par semaine (Upton et al., 2010). La consommation électrique quotidienne d'éclairage est donnée par l'équation suivante :

$$E = N \times P \times t$$

Où N est le nombre total de lampes.

P : la puissance unitaire de chaque lampe (W).

t : la durée journalière d'éclairage (h/jour).

3.3.2. Ventilation

La ventilation joue un rôle capital dans le maintien du confort thermique des vaches laitières, en particulier dans les régions à étés chauds comme Tlemcen. L'exposition des bovins à des températures élevées provoque un stress thermique qui se traduit par une augmentation de la fréquence respiratoire, une élévation de la température rectale, une réduction de la consommation de matière sèche et, par conséquent, une baisse significative de la production laitière (Oliveira et al., 2025). Des études ont confirmé que lorsque le THI (Temperature and Humidity Index) dépasse 68, les vaches à haute production commencent à manifester des signes cliniques de stress thermique. L'utilisation de ventilateurs électriques couplés à des systèmes d'aspersion d'eau constitue la stratégie la plus efficace pour réduire la charge thermique sur les animaux. La consommation électrique quotidienne de la ventilation est calculée par :

$$E = N \times P \times t$$

Où N est le nombre de ventilateurs, P : leur puissance nominale (W), t : leur durée de fonctionnement journalier (h/jour).

3.3.3. Traite mécanique

La traite mécanique est une opération réalisée deux fois par jour dans la ferme étudiée. L'exploitation dispose de deux machines à traire desservant chacune 25 vaches, ce qui permet de couvrir l'ensemble du troupeau de 50 vaches en deux lots.

D'après les audits énergétiques réalisés en milieu réel, les pompes à vide utilisées pour la traite mécanique constituent le deuxième poste consommateur d'électricité dans une ferme laitière après le refroidissement, représentant environ 14 Wh par kg de lait produit (Shine et al., 2020).



Figure 3.2 : Machine à traire (Cliché personnel, 2025).

La consommation électrique de la traite est calculée selon l'équation :

$$E = (N \times P \times t) \times 2 \text{ [2 machines]}$$

Où N = 50 vaches, P : est la puissance d'une pompe à vide (W), et t : la durée d'une session de traite (h/jour).

3.3.4. Refroidissement et conservation du lait

Le refroidissement du lait immédiatement après la traite est une étape critique pour garantir sa qualité bactériologique. Le lait doit être ramené à une température de 4°C dans les plus brefs délais après la traite. Des audits réalisés sur des fermes irlandaises ont confirmé que le refroidissement du lait représente le poste le plus énergivore d'une ferme laitière, avec environ 37% de la consommation électrique totale (Upton et al., 2010). La consommation électrique journalière pour le refroidissement est calculée par :

$$E = P (c) \times t (c) + N \times P (r) \times t (r)$$

Où P (c) est la puissance du réservoir de refroidissement (W).

T (c) : sa durée de fonctionnement journalière (h).

N : le nombre de machines de réfrigération.

P (r) : leur puissance (W).

T (r) : leur durée de fonctionnement (h).

3.3.5. Pompage de l'eau

L'eau est le nutriment consommé en plus grande quantité par les bovins laitiers. Les vaches laitières à haute production sont particulièrement sensibles à la disponibilité et à la qualité de l'eau : toute restriction de l'apport hydrique entraîne rapidement une baisse de la consommation de matière sèche et de la production laitière. Murphy (1992) a démontré que la consommation d'eau est fortement corrélée à la production de lait et à l'ingestion de matière sèche. En conditions normales, une vache Holstein en lactation peut consommer entre 80 et 150 litres d'eau par jour selon son niveau de production et la température ambiante. En période estivale, cette quantité peut augmenter considérablement en raison du stress thermique. La quantité totale d'eau journalière nécessaire à la ferme inclut la consommation des animaux, les besoins hygiéniques et l'irrigation éventuelle :

$$Q = Q \text{ (vaches)} \times N \text{ (vaches)} + Q \text{ (hygiène)} + Q \text{ (arrosage)}$$

La consommation électrique pour le pompage est ensuite calculée à partir du débit de la pompe et du volume à pomper :

$$E = P \times t$$

Où : $t \text{ (pompe)} = Q \text{ (eau)} / Q \text{ (pompe)}$ représente la durée journalière de fonctionnement de la pompe.

3.3.6. Consommation électrique totale :

La consommation électrique totale journalière de la ferme est obtenue en additionnant les consommations de chaque poste :

$$E = E \text{ (éclairage)} + E \text{ (ventilation)} + E \text{ (traite)} + E \text{ (C\&R)} + E \text{ (pompe)}$$

- Le tableau suivant présente une synthèse des équipements, de leurs puissances et de leurs durées de fonctionnement caractéristiques pour la ferme de 50 vaches (Mostefaoui, 2019).

Tableau 3.2 : Puissance nominale des appareils et heures de fonctionnement (Mostefaoui, 2019).

Type d'équipement	Puissance (W)	Nombre	Fonctionnement (h/j)	Consommation (Wh/j)
Éclairage (hiver)	30 / 40	10 + 20 lampes	16	≈3 800
Ventilation (été)	750	5 ventilateurs	16	60 000
Traite	550	5 pompes à vide	3	8 250
Refroidissement lait	1 235	3 réservoirs	14	51 870
Réfrigération (chambre froide)	980	1 unité	24	23 520
Pompage eau	450	1 pompe	5	2 250

La consommation électrique varie selon les saisons en raison des conditions climatiques :

- La période hivernale (novembre, décembre, janvier, février et mars) : **122 kWh/jour** (sans ventilation, avec fonctionnement normal de l'éclairage, de la traite, du refroidissement et du pompage).
- La période intermédiaire (avril, mai, septembre et octobre) : **110 kWh/jour** (ventilation limitée à **5 heures** par jour).
- La période estivale (juin, juillet et août) : **158 kWh/jour** (ventilation portée à 16 heures par jour en raison des fortes chaleurs).

La consommation annuelle totale de la ferme est **estimée à 42,34 MWh/an**.

3.4. Limites du système énergétique actuel

L'exploitation agricole repose actuellement sur le réseau électrique conventionnel (Sonelgaz) pour l'ensemble de ses besoins. Cette configuration présente plusieurs contraintes :

- **Contrainte économique** : Sur la base du tarif agricole estimé à **4,5 DA/kWh** (Sonelgaz), la facture annuelle atteint environ **190 530 DA/an**, avec un risque de hausse des tarifs à moyen terme (Algerie360, 2025).
- **Contrainte technique** : Dépendance totale au réseau, vulnérable aux coupures qui affectent directement la traite et la conservation du lait (Horizons, 2025).
- **Contrainte environnementale** : En Algérie, la production d'électricité repose à près de 99% sur le gaz naturel (facteur d'émission $\approx 0,6 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$ (AIE, 2024)), ce qui génère environ **25,4 tonnes de CO₂/an** pour cette exploitation.

Ces limites justifient pleinement l'intérêt d'un système photovoltaïque, d'autant plus que la région de Tlemcen bénéficie d'un rayonnement solaire global de $5,48 \text{ kWh/m}^2/\text{jour}$ dans les mois les plus favorables.

3.5. Dimensionnement du système photovoltaïque

Avant de procéder au dimensionnement, il convient de préciser le type de système retenu. Le système photovoltaïque choisi est un système couplé au réseau électrique (on-grid), sans batteries. Ce choix est motivé par deux raisons principales :

D'une part, la connexion au réseau Sonelgaz garantit une alimentation continue et fiable de l'exploitation même en période de faible ensoleillement.

D'autre part, les batteries de stockage présentent un impact environnemental négatif à long terme, leur fabrication et leur fin de vie générant des déchets toxiques tels que le cobalt, le nickel et le lithium, qui contaminent les sols, les eaux souterraines et la chaîne alimentaire (Mrozik et al., 2021).

Ce choix permet ainsi d'optimiser les performances environnementales du système tout en évitant l'introduction d'une nouvelle source de pollution au sein de l'exploitation agricole de Remchi.

3.5.1 Calcul de la puissance PV requise

La puissance de pointe du système photovoltaïque est calculée à partir de la consommation journalière maximale (période estivale : 158 kWh/jour) à l'aide de l'équation suivante (Mostefaoui, 2019) :

$$P = (E \times P.i) / (R_g \times F \times \eta)$$

Où :

E : consommation journalière (kWh/jour)

P.i : puissance solaire en conditions standard STC = 1 kW/m² à 25°C

R_g : rayonnement solaire global à Tlemcen = 5,48 kWh/m²/jour

F : facteur de déclassement PV = 0,85 à 0,90

η : rendement de l'onduleur = 95%

3.6. Simulation avec le logiciel HOMER

3.6.1. Présentation du logiciel HOMER

HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) est un logiciel de simulation et d'optimisation développé par le Laboratoire National des Énergies Renouvelables des États-Unis (NREL). Il a été conçu pour modéliser, simuler et optimiser des systèmes énergétiques hybrides combinant différentes sources d'énergie, comme le photovoltaïque, le diesel, les

batteries et le réseau électrique (Givler & Lilienthal, 2005). HOMER effectue une simulation horaire de toutes les configurations possibles du système, ce qui lui confère une précision supérieure aux modèles statistiques basés sur des moyennes mensuelles. Après avoir simulé des milliers de combinaisons, il classe les configurations réalisables par ordre croissant de coût du cycle de vie (NPC), permettant d'identifier la configuration optimale pour un site donné. HOMER calcule la production énergétique photovoltaïque heure par heure à l'aide de l'équation suivante :

$$E_{pv} = C_{pv} \times f_{pv} \times (G / G_{sc}) \times [1 + \alpha \times (T_{pv} - T_{stc})]$$

Où C_{pv} est la capacité nominale du générateur PV.

f_{pv} : le facteur d'efficacité du module.

α : le coefficient de température de puissance ($\sim -0,4\%/^{\circ}\text{C}$ pour le silicium cristallin).

G : le rayonnement sur le module incliné.

$G_{sc} = 1 \text{ kW/m}^2$ la puissance solaire standard.

3.6.2. Résultats de simulation

Quatre puissances PV ont été simulées (25, 30, 35, 40 kWc) avec un angle d'inclinaison optimal de 20° , en configuration PV couplé au réseau. Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 3.3 : Simulation HOMER pour différentes puissances photovoltaïques (Mostefaoui, 2019).

Sensitivity Results Optimization Results									
Sensitivity variables									
PV Slope (deg) 20									
Double click on a system below for simulation results.									
	PV (kW)	Conv. (kW)	Grid (kW)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	
	25	25	1000	\$ 152,500	5,380	\$ 221,271	0.405	0.47	
	25	30	1000	\$ 156,000	5,473	\$ 225,959	0.414	0.47	
	25	35	1000	\$ 159,500	5,566	\$ 230,648	0.422	0.47	
	25	40	1000	\$ 163,000	5,659	\$ 235,336	0.431	0.47	
	30	25	1000	\$ 179,500	5,595	\$ 251,024	0.460	0.53	
	30	30	1000	\$ 183,000	5,688	\$ 255,713	0.468	0.53	
	30	35	1000	\$ 186,500	5,781	\$ 260,401	0.477	0.53	
	30	40	1000	\$ 190,000	5,874	\$ 265,090	0.486	0.53	
	35	25	1000	\$ 206,500	5,831	\$ 281,043	0.515	0.58	
	35	30	1000	\$ 210,000	5,917	\$ 285,639	0.523	0.58	
	35	35	1000	\$ 213,500	6,010	\$ 290,327	0.532	0.58	
	35	40	1000	\$ 217,000	6,103	\$ 295,016	0.540	0.58	
	40	25	1000	\$ 233,500	6,098	\$ 311,455	0.571	0.62	
	40	30	1000	\$ 237,000	6,159	\$ 315,737	0.578	0.62	
	40	35	1000	\$ 240,500	6,249	\$ 320,383	0.587	0.62	
	40	40	1000	\$ 244,000	6,342	\$ 325,072	0.595	0.62	

La configuration de 30 kWc est retenue comme solution optimale. Elle offre un équilibre satisfaisant entre la production solaire et l'apport du réseau. Augmenter la puissance au-delà de 30 kWc améliore certes la fraction renouvelable, mais entraîne des surplus d'énergie injectés dans le réseau sans retour économique significatif dans le contexte algérien actuel. La durée de vie des panneaux PV est de 25 ans.

L'énergie achetée au réseau et l'efficacité énergétique du système sont calculées par :

$$E_{\text{totale}} = E_{\text{pv}} + E_{\text{reseau}}$$

Où :

E totale : l'énergie totale consommée par la ferme (MWh/an)

E pv : l'énergie produite par le générateur photovoltaïque (MWh/an)

E réseau : l'énergie achetée au réseau électrique Sonelgaz (MWh/an)

$$EE = E_{\text{pv}} / E_{\text{totale}}$$

Où :

EE : l'efficacité énergétique du système, exprimant la fraction d'énergie couverte par le solaire

E PV : l'énergie produite par le générateur photovoltaïque (MWh/an)

E totale : l'énergie totale consommée par la ferme (MWh/an)

3.7. Analyse économique du système photovoltaïque

3.7.1 Méthode du coût du cycle de vie (CCV)

L'analyse économique repose sur la méthode du coût du cycle de vie (Life Cycle Cost), qui combine les coûts en capital initial, les coûts d'exploitation et de maintenance, et les coûts de remplacement sur toute la durée de vie du projet. Le coût annualisé total est calculé par (Fuentes et al., 2007) :

$$C_{\text{ann tot}} = C_{\text{acap}} + C_{\text{aO\&M}} + C_{\text{arep}} - C_{\text{sal}}$$

Où : C acap : coût en capital annualisé.

C aO&M : coût d'exploitation et maintenance.

C arep : coût de remplacement.

C sal : valeur de récupération.

Le coût en capital annualisé est (Nacer et al., 2016) :

$$\mathbf{C\ acap = C\ cap \times CRF\ (i,\ N)}$$

Où : C cap : coût initial.

i : taux d'intérêt.

N : durée de vie du projet (ans).

Où le facteur de recouvrement du capital (CRF) est donné par (Nacer et al., 2016) :

$$\mathbf{CRF\ (i,\ N) = i\ (1 + i)^N / [(1 + i)^N - 1]}$$

Où : i : taux d'intérêt réel.

N : nombre d'années.

Le coût de remplacement annualisé, en tenant compte de la durée de vie différente des composants, est (Nacer et al., 2016):

$$\mathbf{C\ arep = C\ rep \times f\ rep \times SFF\ (i,\ R\ comp) - S \times SFF\ (i,\ R\ proj)}$$

Où : C rep : coût de remplacement.

f rep : facteur de durée de vie du composant.

SFF : facteur de fonds d'amortissement.

R comp : durée de vie du composant (ans).

R proj : durée de vie du projet (ans).

S : valeur de récupération.

Le coût actuel net total (NPC) du système est (Nacer et al., 2016) :

$$\mathbf{NPC = C\ ann\ tot / CRF(i,\ R\ proj)}$$

Où : C ann tot : coût annualisé total.

R proj : durée de vie du projet (ans).

Et le coût de l'énergie (COE) est (Nacer et al., 2016):

$$\text{COE} = \text{C ann,tot} / \text{E demand}$$

Où : C ann tot : coût annualisé total.

E demand : énergie annuelle consommée par l'exploitation (kWh/an).

3.8. Comparaison économique : Système PV vs Système Diesel (2025/2026)

Dans la section précédente, l'analyse énergétique a porté sur un système photovoltaïque couplé au réseau Sonelgaz. Cependant, le groupe électrogène diesel demeure une alternative fréquemment utilisée dans les exploitations agricoles algériennes, notamment dans les zones rurales à alimentation instable (Horizons, 2025). Il convient donc de comparer les deux systèmes sur le plan économique.

3.8.1. Hypothèses et données économiques 2025/2026

Les données économiques utilisées dans cette analyse sont issues de sources algériennes récentes et de la littérature spécialisée. Le taux de change retenu est de :

$$1 \text{ USD} = 135 \text{ DZD (2025)}.$$

3.8.1.1. Coûts du système photovoltaïque 30 kWc

En 2025, le prix d'un panneau solaire monocristallin de 400 Wc sur le marché algérien est d'environ 25 000 DA, soit 185 \$ par panneau (Algerie360, 2025a). Pour un système de 30 kWc, il faut 75 panneaux de 400 Wc. En ajoutant le coût de l'onduleur (estimé à 15% du coût des panneaux), la structure de montage, le câblage et l'installation (estimés à 20% du coût des panneaux), le coût total du système PV est estimé à environ 18 750 \$ (2 531 250 DA). Les coûts d'exploitation et de maintenance annuels sont évalués à 2% du coût initial, soit 375 \$/an. La durée de vie des panneaux est de 25 ans.

Tableau 3.4 : Coût initial du système PV 30 kWc, marché algérien 2025 (Algerie360, 2025a).

Composant	Quantité	Prix unitaire (DA)	Coût total (DA)	Coût total (\$)
Panneaux PV 400 Wc	75	25 000	1 875 000	13 889
Onduleur	1	—	281 250	2 083
Structure + câblage + installation	—	—	375 000	2 778
Total	—	—	2 531 250	18 750

3.8.1.2. Coûts du système diesel 30 kW

Le coût d'acquisition d'un groupe électrogène diesel de 33 kVA (30 kW) sur le marché algérien est estimé à environ 1 500 000 DA (11 111 \$). Les coûts d'exploitation et de maintenance sont évalués à 10% du coût initial par an, soit 1 111 \$/an. La consommation spécifique de carburant d'un groupe diesel de cette puissance est d'environ 0,25 L/kWh. Sur la base d'une consommation annuelle de 42 340 kWh/an et d'un prix du gasoil de 31 DA/litre (Algerie360, 2026), le coût annuel du carburant est estimé à environ 2 418 \$/an. La durée de vie d'un groupe diesel est de 8 ans, ce qui implique 3 remplacements sur la durée de vie du projet (25 ans).

Tableau 3.5 : Paramètres économiques du système diesel (Algerie360, 2026).

Paramètre	Valeur
Coût initial groupe diesel 33 kVA	1 500 000 DA (11 111 \$)
Coût O&M annuel (10%)	1 111 \$/an
Prix gasoil (2026)	31 DA/litre
Consommation spécifique	0,25 L/kWh
Coût annuel carburant	2 418 \$/an
Durée de vie	8 ans (3 remplacements sur 25 ans)

3.8.1.3. Tarif électrique Sonelgaz 2025

Le tarif moyen de l'électricité en Algérie est de 4,01 DA/kWh en 2025 (Algerie360, 2025b). Ce tarif est pris en compte dans le calcul du coût de l'énergie achetée au réseau pour le système PV couplé.

Tableau 3.6 : Hypothèses économiques générales 2025/2026.

Paramètre	Valeur 2025/2026
Taux d'intérêt réel (i)	5%
Durée de référence du projet	25 ans
Taux de change	1 USD = 135 DZD
Tarif électricité Sonelgaz	4,01 DA/kWh
Prix gasoil	31 DA/litre
Prix panneau PV 400 Wc	25 000 DA (185 \$)

3.8.2. Calcul du coût du cycle de vie

3.8.2.1. Facteur de recouvrement du capital (CRF)

Le facteur de recouvrement du capital est calculé pour un taux d'intérêt de 5% et une durée de 25 ans :

$$CRF (0,05 ; 25) = 0,05 \times (1,05)^{25} / [(1,05)^{25} - 1]$$

Application numérique : $(1,05)^{25} = 3,386$

$$CRF = 0,05 \times 3,386 / (3,386 - 1) = 0,07095$$

3.8.2.2. Coûts annualisés du système PV

Le coût en capital annualisé du système PV est :

$$C_{\text{acap PV}} = C_{\text{cap}} \times CRF (i, N) = 18\,750 \times 0,07095 = 1\,330 \text{ \$/an}$$

Le coût total annualisé du système PV est :

$$C_{\text{ann PV}} = C_{\text{acap}} + C_{\text{aO\&M}} = 1\,330 + 375 = \mathbf{1\,705 \$/an}$$

3.8.2.3. Coûts annualisés du système diesel

Pour le système diesel, le CRF est calculé sur la durée de vie de 8 ans :

$$CRF(0,05; 8) = 0,05 \times (1,05)^8 / [(1,05)^8 - 1] = \mathbf{0,1547}$$

Le coût en capital annualisé du groupe diesel est :

$$C_{\text{acap diesel}} = 11\,111 \times 0,1547 = \mathbf{1\,719 \$/an}$$

Le coût total annualisé du système diesel (capital + O&M + carburant) est :

$$C_{\text{ann diesel}} = 1\,719 + 1\,111 + 2\,418 = \mathbf{5\,248 \$/an}$$

3.8.2.4. Coût de l'énergie (COE) et coût actuel net (NPC)

Le coût de l'énergie et le coût actuel net sont calculés pour les deux systèmes :

$$COE_{\text{PV}} = C_{\text{ann PV}} / E_{\text{demand}} = 1\,705 / 42\,340 = 0,0403 \$/kWh = \mathbf{5,44 \text{ DA/kWh}}$$

$$COE_{\text{diesel}} = C_{\text{ann diesel}} / E_{\text{demand}} = 5\,248 / 42\,340 = 0,124 \$/kWh = \mathbf{16,74 \text{ DA/kWh}}$$

$$NPC_{\text{PV}} = C_{\text{ann PV}} / CRF(0,05;25) = 1\,705 / 0,07095 = \mathbf{24\,030 \$}$$

$$NPC_{\text{diesel}} = C_{\text{ann diesel}} / CRF(0,05;25) = 5\,248 / 0,07095 = \mathbf{73\,966 \$}$$

3.8.3. Résultats et comparaison

Le tableau ci-dessous résume les résultats de la comparaison économique entre les deux systèmes pour l'exploitation laitière de Remchi en 2025/2026 :

Tableau 3.7 : Comparaison économique système PV vs système diesel, prix marché algérien 2025/2026

Paramètre	Système PV 30 kWc	Groupe Diesel 30 kW	Avantage PV
Coût initial (\$)	18 750	11 111	—
C acap (\$/an)	1 330	1 719	PV -22%
C aO&M (\$/an)	375	1 111	PV -66%
Coût carburant (\$/an)	0	2 418	PV -100%
C ann total (\$/an)	1 705	5 248	PV -68%
COE (\$/kWh)	0,0403	0,124	PV x3 moins cher
COE (DA/kWh)	5,44	16,74	PV x3 moins cher
NPC sur 25 ans (\$)	24 030	73 966	PV -68%

3.8.4. Analyse et discussion

Les résultats de la comparaison économique montrent clairement la supériorité du système photovoltaïque sur le groupe électrogène diesel pour l'exploitation laitière de Remchi. Bien que le coût initial du système PV (18 750 \$) soit supérieur à celui du groupe diesel (11 111 \$), le coût actuel net sur 25 ans du système diesel (73 966 \$) est environ 3 fois plus élevé que celui du système PV (24 030 \$). Cette différence s'explique principalement par trois facteurs :

- Le coût du carburant diesel (2 418 \$/an) qui représente 46% du coût annualisé total du système diesel, et qui augmentera avec la hausse prévisible des prix du gasoil.

- La durée de vie limitée du groupe diesel (8 ans) qui implique 3 remplacements coûteux sur la durée de vie du projet de 25 ans, contrairement aux panneaux PV dont la durée de vie est de 25 ans.
- Les coûts d'entretien élevés du système diesel (1 111 \$/an) comparés à ceux du système PV (375 \$/an), liés à la complexité mécanique du moteur thermique.

3.9. Comparaison des émissions de CO₂ évitées

Si la comparaison économique a montré l'avantage du système PV, il convient également d'examiner son impact sur l'environnement. Dans cette section, nous estimons les émissions de CO₂ liées au fonctionnement du groupe diesel, ainsi que celles évitées grâce à l'énergie photovoltaïque produite par notre installation.

3.9.1. Facteurs d'émission utilisés

Les facteurs d'émission retenus pour cette étude sont issus de sources scientifiques et institutionnelles reconnues :

- Diesel : **2.68 kg CO₂ / litre** de carburant consommé (US EPA, 2026)
- Diesel converti en kWh : **0.67 kg CO₂ / kWh** (sur la base de 0.25 L/kWh de consommation spécifique)
- PV (cycle de vie) : **30 g CO₂eq / kWh** produit (émissions de fabrication, transport et fin de vie incluses) (HelloCarbo, 2022)

3.9.2. Équation de calcul

Le calcul des émissions de CO₂ repose sur une équation simple reliant l'énergie consommée ou produite au facteur d'émission correspondant :

$$\text{CO}_2 \text{ diesel} = E \text{ diesel} \times f \text{ diesel}$$

$$\text{CO}_2 \text{ évité} = E \text{ PV} \times f \text{ diesel}$$

Où :

E diesel : énergie totale annuelle consommée par la ferme = **42 340 kWh/an**

E PV : énergie produite annuellement par le système photovoltaïque 30 kWc = **28 540 kWh/an**
(simulation HOMER)

F diesel : facteur d'émission du diesel = **0,67 kg CO₂/kWh** (US EPA, 2026)

F PV : facteur d'émission cycle de vie du PV = **30 g CO₂eq/kWh** (HelloCarbo, 2022)

3.9.3. Application numérique

En appliquant les équations précédentes aux données de notre système :

Émissions du système diesel :

$$\text{CO}_2 \text{ diesel} = 42\,340 \times 0.67 = 28\,368 \text{ kg CO}_2/\text{an} \approx \mathbf{28.37 \text{ t CO}_2/\text{an}}$$

Émissions du système PV (cycle de vie) :

$$\text{CO}_2 \text{ PV} = 28\,540 \times 0.03 = 856 \text{ kg CO}_2/\text{an} \approx \mathbf{0.86 \text{ t CO}_2/\text{an}}$$

CO₂ évité grâce au système PV :

$$\text{CO}_2 \text{ évité} = 28\,540 \times 0.67 = 19\,122 \text{ kg CO}_2/\text{an} \approx \mathbf{19.12 \text{ t CO}_2/\text{an}}$$

3.9.4. Tableau comparatif des émissions de CO₂

Tableau 3.8 : Comparaison des émissions de CO₂

Paramètre	Système Diesel	Système PV	CO ₂ Évité
Énergie annuelle (kWh/an)	42 340	28 540	—
Facteur d'émission (kg CO ₂ /kWh)	0,67	0,030	—
Émissions annuelles (t CO ₂ /an)	28.37	0.86	19.12
Émissions sur 25 ans (t CO ₂)	709.2	21.5	478.1

3.9.5. Diagramme comparatif des émissions de CO₂

La figure suivante illustre la comparaison des émissions annuelles de CO₂ entre le système diesel et le système photovoltaïque. Le CO₂ évité représente la quantité de gaz à effet de serre que le système PV permet d'éliminer par rapport au scénario diesel.

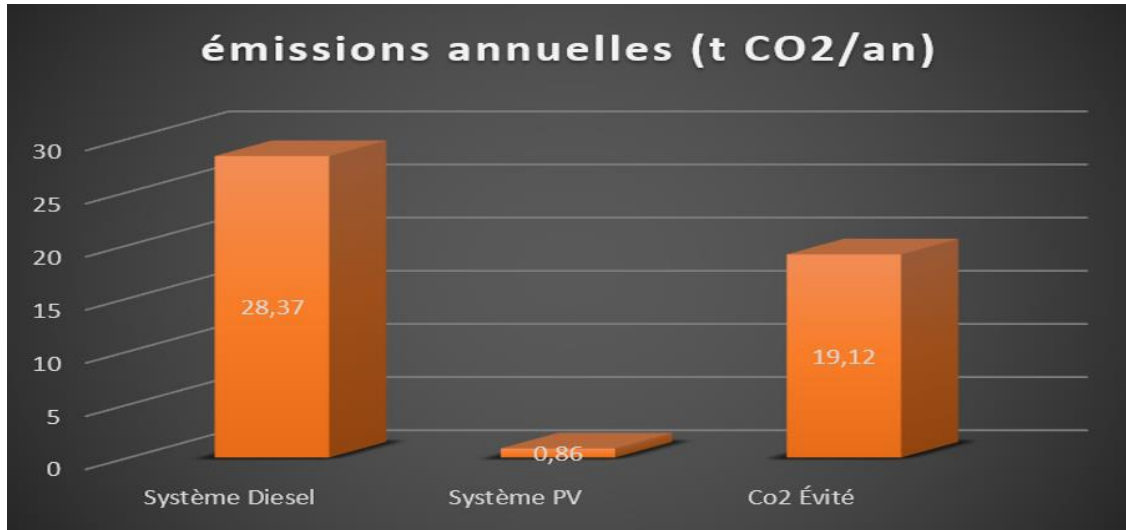


Figure 3.3 : Comparaison des émissions annuelles de CO₂.

3.9.6. Analyse et discussion

Les résultats montrent clairement l'avantage environnemental du système photovoltaïque. Le système diesel génère annuellement 28,37 tonnes de CO₂, tandis que le système PV ne produit que 0,86 t CO₂/an en tenant compte des émissions de cycle de vie (fabrication, transport et fin de vie des panneaux).

Grâce au système photovoltaïque de 30 kWc installé à la ferme de Remchi, on estime que 19,12 tonnes de CO₂ sont évitées chaque année, ce qui représente une réduction des émissions de plus de 95% par rapport au scénario diesel.

Ces résultats confirment que le système photovoltaïque constitue non seulement une solution économiquement avantageuse, mais aussi la solution la plus respectueuse de l'environnement pour alimenter en électricité l'exploitation agricole de Remchi.

3.10. Conclusion

Ce chapitre a examiné l'exploitation agricole de Remchi sous trois angles : énergétique, économique et environnemental. Le résultat est clair : un système de 30 kWc raccordé au réseau Sonelgaz, sans batteries, est la configuration qui convient le mieux à cette exploitation. Par rapport au groupe électrogène diesel, les coûts baissent sensiblement, et 19,12 tonnes de CO₂ sont évitées chaque année. Ce dernier chiffre n'est pas anecdotique : il illustre concrètement ce que le passage au solaire peut représenter pour une exploitation agricole de cette taille dans le contexte algérien. Le chapitre suivant reprend ces résultats pour les discuter et en tirer des recommandations applicables.

Chapitre 4 :

Résultats et Recommandations

4.1. Introduction

Ce chapitre présente et discute l'ensemble des résultats obtenus au cours de ce travail, organisés en trois volets complémentaires :

- Les résultats de la simulation HOMER.
- La répartition mensuelle de la production électrique entre le générateur photovoltaïque et le réseau.
- La comparaison des émissions de CO₂ entre le système photovoltaïque et le système diesel.

Ces résultats sont ensuite mis en perspective à travers des recommandations techniques, économiques et écologiques adaptées au contexte de l'exploitation agricole de Remchi et, plus largement, aux exploitations situées dans les zones semi-arides algériennes.

4.2. Résultats de la simulation HOMER

4.2.1. Tableau récapitulatif des résultats

La simulation a été réalisée pour quatre puissances photovoltaïques (25, 30, 35 et 40 kWc), couplées au réseau électrique sans stockage par batteries. Le tableau suivant résume les résultats obtenus :

Tableau 4.1 : Résultats d'optimisation HOMER pour les différentes configurations simulées [Simulation HOMER, (Mostefaoui, 2019)].

PV (kWc)	Onduleur (kW)	Capital (\$)	NPC (\$)	Ren. Frac.
25	25	47 865	221 271	0,47
30	25	56 375	251 024	0,53
35	25	64 885	289 341	0,58
40	25	73 395	325 072	0,62

- L'analyse de ce tableau montre que la configuration de 30 kWc couplée à un onduleur de 25 kW représente le meilleur compromis entre performance énergétique et viabilité économique, avec un coût actuel net de 251 024 \$, une fraction renouvelable de 53 % et un coût de l'énergie de 0,460 \$/kWh. Augmenter la puissance au-delà de 30 kWc améliore la fraction renouvelable, mais génère des surplus d'énergie injectés dans le réseau sans retour économique significatif dans le contexte tarifaire algérien actuel. La configuration de 30 kWc est donc retenue comme solution optimale pour l'exploitation laitière de Remchi.

4.2.2. Bilan énergétique annuel de la configuration retenue

La consommation annuelle estimée de la ferme est de **42,34 MWh/an**. La simulation HOMER prend en compte les pertes système et les fluctuations de charge, ce qui explique la légère différence avec la valeur simulée de **42,70 MWh/an** (Mostefaoui, 2019).

Le bilan énergétique annuel pour la configuration de 30 kWc est le suivant :

- Énergie PV générée : **28,54 MWh/an**
- Énergie achetée au réseau : **25,45 MWh/an**
- Énergie injectée dans le réseau (surplus) : **8,43 MWh/an**
- Consommation annuelle totale de la ferme : **42,70 MWh/an**

L'énergie totale produite par le système et l'efficacité énergétique sont calculées par :

$$E_{\text{totale}} = E_{\text{PV}} + E_{\text{réseau}} = 28,54 + 25,45 = \mathbf{53,99 \text{ MWh/an}}$$

$$EE = E_{\text{PV}} / E_{\text{totale}} = 28,54 / 53,99 = \mathbf{0,53 \rightarrow \text{soit } 53 \%}$$

Ces résultats confirment que **53 %** de l'énergie annuelle de la ferme est couverte par le système photovoltaïque, tandis que les **47 %** restants sont achetés à Sonelgaz. Le surplus de

8,43 MWh/an injecté dans le réseau correspond à l'énergie produite par les panneaux en période de faible consommation et non consommée localement (Mostefaoui, 2019).

4.3. Répartition mensuelle de la production électrique PV/réseau

La figure suivante illustre la production électrique moyenne mensuelle du système PV/réseau de 30 kWc simulé pour la ferme de Remchi :

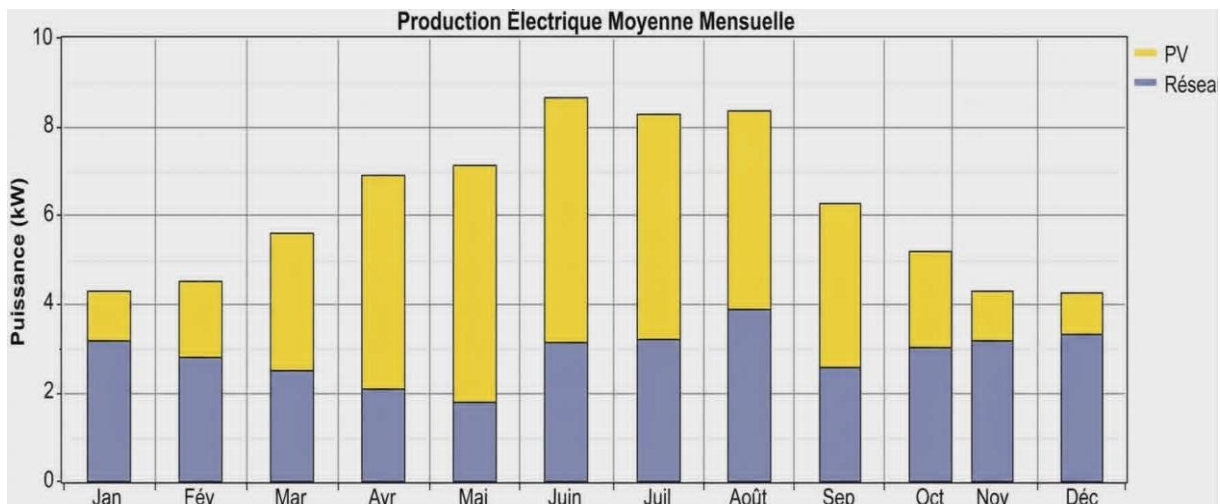


Figure 4.1 : Production mensuelle du système PV/Réseau (30 kWc) (Mostefaoui, 2019).

La figure met en évidence une variation saisonnière marquée :

- ✓ Durant les mois de la période estivale (juin, juillet, août), la production solaire dépasse l'apport du réseau, couvrant plus de la moitié des besoins énergétiques de la ferme. Cette période correspond à la consommation la plus élevée de l'exploitation (158 kWh/jour) due à la ventilation, mais aussi à l'ensoleillement maximal de la région de Tlemcen.
- ✓ En période hivernale (novembre à février), la production photovoltaïque diminue, ce qui accroît la dépendance au réseau. Néanmoins, le système continue d'apporter une contribution non négligeable, confirmant la pertinence du choix d'un système couplé au réseau plutôt qu'un système autonome qui aurait nécessité un surdimensionnement coûteux.

Cette complémentarité saisonnière démontre que le réseau Sonelgaz joue le rôle de source d'appoint en période hivernale, tandis que le système photovoltaïque assure l'essentiel de la couverture énergétique en période estivale, réduisant d'autant la facture énergétique et les émissions associées.

4.4. Comparaison des émissions de CO₂ : PV vs Diesel

Sur la base des facteurs d'émission retenus au chapitre précédent (0,67 kg CO₂/kWh pour le diesel et 30 g CO₂eq/kWh pour le cycle de vie du système photovoltaïque), les émissions annuelles de chaque système ont été calculées et comparées.

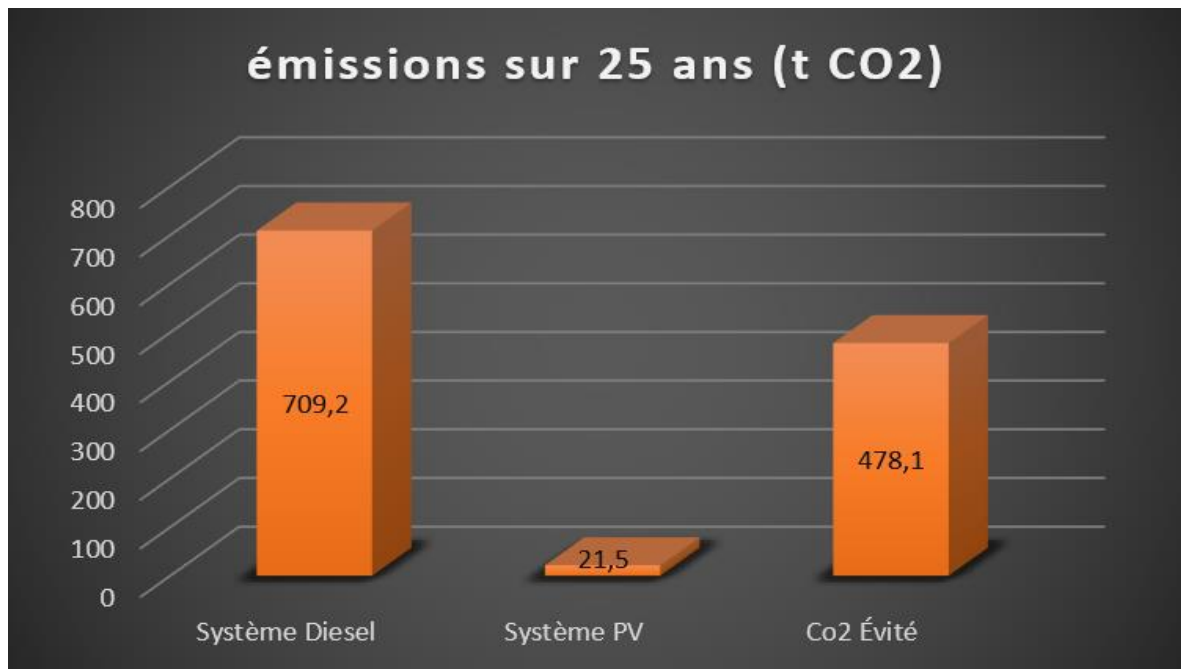


Figure 4.2 : Comparaison des émissions cumulées de CO₂ sur 25 ans (t CO₂), Système Diesel vs Système PV.

Les résultats confirment la nette supériorité environnementale du système photovoltaïque. Le système diesel génère 28,37 tonnes de CO₂ par an, soit **709,2 tonnes sur 25 ans**.

En revanche, le système photovoltaïque, même en intégrant les émissions de son cycle de vie complet, ne produit que 0,86 t CO₂/an, soit **21,5 tonnes sur 25 ans**.

- Grâce au système photovoltaïque, **19,12 tonnes** de CO₂ sont évitées chaque année, soit **478,1 tonnes sur 25 ans**. Cela représente une réduction des émissions de plus de **95 %** par rapport au scénario diesel, confirmant l'avantage environnemental considérable du système photovoltaïque, qui combine à la fois une réduction du coût actuel net et une réduction drastique de l'empreinte carbone de l'exploitation.

4.5. Synthèse générale des résultats

Le tableau suivant résume l'ensemble des indicateurs énergétiques, économiques et environnementaux obtenus pour la configuration optimale retenue :

Tableau 4.2 : Synthèse comparative des performances énergétiques, économiques et environnementales.

Indicateur	Système PV 30 kWc	Système Diesel
Énergie annuelle (kWh/an)	28 540 (PV) + 25 447 (réseau)	42 340
Fraction renouvelable (%)	53 %	0 %
Coût actuel net - NPC (\$, 25 ans)	24 030	73 966
Coût de l'énergie - COE (\$/kWh)	0,0403	0,124
Émissions de CO ₂ (t/an)	0,86	28,37
CO ₂ évité (t/an)	19,12	—
Émissions sur 25 ans (t)	21,5	709,2
CO ₂ évité sur 25 ans (t)	478,1	—
Durée de vie (ans)	25	8 (3 remplacements)

➤ Cette synthèse confirme la cohérence des résultats obtenus : le système photovoltaïque de 30 kWc couplé au réseau s'impose comme la solution la plus équilibrée, conciliant performance énergétique, rentabilité économique sur le long terme et réduction substantielle de l'empreinte carbone.

4.6. Recommandations

Sur la base des résultats obtenus, plusieurs recommandations sont formulées pour optimiser le déploiement des systèmes photovoltaïques dans les exploitations agricoles des zones semi-arides.

4.6.1. Recommandations techniques

- Privilégier les systèmes photovoltaïques couplés au réseau (on-grid) sans batteries afin d'éviter l'impact environnemental négatif et les coûts élevés liés à leur fabrication et fin de vie.
- Retenir un angle d'inclinaison optimal d'environ 20° pour les installations situées dans la région de Tlemcen, conformément aux résultats de la simulation HOMER.
- Dimensionner la puissance photovoltaïque en fonction du profil de consommation réel de l'exploitation, afin d'éviter les surcoûts liés à une production excédentaire faiblement valorisée.

4.6.2. Recommandations économiques

- Sensibiliser les exploitants agricoles à l'intérêt du coût actuel net (NPC) sur la durée de vie du projet, qui s'avère plus avantageux, plutôt qu'au seul coût d'acquisition initial.
- Mettre en place des mécanismes de valorisation de l'énergie excédentaire injectée dans le réseau via des tarifs de rachat incitatifs.

4.6.3. Recommandations écologiques

- Limiter le décapage et le compactage du sol lors de l'installation afin de préserver la structure fragile du sol semi-aride.
- Privilégier le nettoyage à sec ou à très faible consommation d'eau des modules, afin de ne pas alourdir la pression hydrique dans cette zone semi-aride.

4.6.4. Recommandations stratégiques

- Prioriser l'implantation des systèmes photovoltaïques sur des terres dégradées ou à faible valeur agricole pour préserver les surfaces cultivables.
- Intégrer ces installations dans la stratégie énergétique nationale visant à réduire la dépendance de l'Algérie aux énergies fossiles.

4.7. Conclusion

Ce chapitre a permis de confirmer l'ensemble des résultats obtenus par la simulation HOMER appliquée à l'exploitation laitière de Remchi. La configuration de 30 kWc couplée au réseau constitue le meilleur équilibre entre la part d'énergie renouvelable, le coût actuel net et impact environnemental. L'étude de la répartition mensuelle a mis en évidence une forte complémentarité saisonnière entre le système photovoltaïque et le réseau Sonelgaz. Enfin, la comparaison des émissions de CO₂ a confirmé la supériorité environnementale nette du système photovoltaïque, avec 19,12 tonnes de CO₂ évitées chaque année et 478,1 tonnes sur 25 ans par rapport au scénario diesel.

Les recommandations formulées, qu'elles soient techniques, économiques, écologiques ou stratégiques, visent à transformer ces résultats en mesures concrètes, applicables non seulement à la ferme de Remchi, mais également à d'autres exploitations agricoles situées dans les zones semi-arides algériennes.

Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire a permis d'analyser, à travers quatre chapitres complémentaires, l'impact écologique et la pertinence technico-économique des installations photovoltaïques dans les zones semi-arides, en s'appuyant sur le cas concret de l'exploitation laitière de Remchi, wilaya de Tlemcen. Après avoir posé les fondements scientifiques de l'énergie photovoltaïque et analysé ses impacts écologiques, l'étude de cas a permis de dimensionner, à l'aide du logiciel HOMER, un système photovoltaïque de 30 kWc couplé au réseau, puis d'en évaluer les performances économiques et environnementales par rapport à un système diesel conventionnel.

Les résultats démontrent sans ambiguïté la supériorité du système photovoltaïque : coût actuel net de 24 030 \$ contre 73 966 \$ pour le diesel sur 25 ans, coût de l'énergie de 0,0403 \$/kWh contre 0,124 \$/kWh, et 19,12 tonnes de CO₂ évitées chaque année. Ces résultats confirment que, dans le contexte des zones semi-arides de Tlemcen bénéficiant d'un fort potentiel solaire, l'énergie photovoltaïque représente une alternative durable, économiquement viable et écologiquement responsable aux sources d'énergie fossiles utilisées dans le secteur agricole.

La généralisation de telles installations, accompagnée de recommandations écologiques adaptées, telles que la protection du sol, la gestion raisonnée de l'eau et la préservation de la biodiversité locale, pourrait contribuer significativement à la transition énergétique du secteur agricole algérien, tout en renforçant sa résilience face aux changements climatiques et à la volatilité des prix des énergies fossiles.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Adams, S., Klobodu, E. K. M., & Apio, A. (2018). Renewable and non-renewable energy, regime type and economic growth. *Renewable Energy*, 125, 755-767.
- ADEME (2018). *Guide technique : Conception et dimensionnement des systèmes photovoltaïques autonomes*.
- Agence Internationale de l'Énergie (AIE). (2024). *Emissions Factors 2024*. International Energy Agency.
- Algerie360. (2025a). Combien coûtent les panneaux solaires en Algérie en 2025 ?
- Algerie360. (2025b). Vos factures SONELGAZ augmenteront en 2025 : Nous vous révélons les montants du nouvel impôt. Récupéré de <https://www.algerie360.com/vos-factures-sonelgaz-augmenteront-en-2025-nous-vous-revelons-les-montants-du-nouvel-impot/>
- Algerie360. (2026). Prix du carburant : la hausse qui a surpris tous les Algériens expliquée. Récupéré de <https://www.algerie360.com/prix-du-carburant-la-hausse-qui-a-surpris-tous-les-algeriens-expliquee/>
- Auchtung, T. L., Rius, A. G., Kendall, P. E., McFadden, T. B., & Dahl, G. E. (2005). Effects of photoperiod during the dry period on prolactin, prolactin receptor, and milk production of dairy cows. *Journal of Dairy Science*, 88(1), 121-127.
- Bošnjaković, M., Santa, R., Crnac, Z., & Bošnjaković, T. (2023). Environmental impact of PV power systems. *Sustainability*, 15(15), 11888.
- CEI, ENERGIES RENOUVELABLES. 2008.
- Dufresne, S. (n.d.). Off-grid solar power systems. Rimstar. https://rimstar.org/renewnrg/off_grid_solar_power_systems.htm
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, 36(10), 2725–2732.
- Fthenakis, V. M., Kim, H. C., & Alsema, E. (2008). Emissions from photovoltaic life cycles. *Environmental Science & Technology*, 42(6), 2168–2174.
- Fthenakis, V., & Kim, H. C. (2015). Life cycle assessment of photovoltaic technologies: Environmental impacts and resource use. *Science of The Total Environment*, 538, 289-298.
- Fuentes, M., Nofuentes, G., Aguilera, J., Talavera, D. L., & Castro, M. (2007). Application and validation of algebraic methods to predict the behaviour of crystalline silicon PV modules in Mediterranean climates. *Solar Energy*, 81, 1396-1408.
- Génie Électromécanique. (n.d.). Schéma d'installation d'un système solaire hybride. <https://genieelectromecanique.com/schema-dinstallation-dun-systeme-solaire-hybride/>
- Gérenton, F. (2016). *Procédés innovants adaptés aux cellules photovoltaïques PERC en couches minces de silicium cristallin [Thèse de doctorat, INSA de Lyon]*. HAL Thèses.
- Givler, T., & Lilienthal, P. (2005). Using HOMER Software, NREL's Micropower Optimization Model, to Explore the Role of Gen-sets in Small Solar Power Systems; Case Study: Sri Lanka. Technical Report NREL/TP-710-36774, National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado.

- Gomard, G. (2012). *Cristaux photoniques pour le contrôle de l'absorption dans les cellules solaires photovoltaïques silicium ultraminesces*. Thèse de doctorat, École Centrale de Lyon.
- Groupe OPNR. (s.d.). *Autoconsommation solaire*. <https://opnr.fr/autoconsommation/>
- Guney, I., & Onat, N. (2008). *Technological Status and Market Trends of Photovoltaic Cell Industry*. *WSEAS Transactions on Electronics*, 5(7), 303-312.
- Hadj Arab, A. (2011). *L'Energie Solaire Photovoltaïque*. *Bulletin des Energies Renouvelables*, (19), 1-4. Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER).
- Hellocarbo. *Quel bilan carbone pour le photovoltaïque ?*
- Horizons. (2025). 772 exploitations agricoles raccordées à l'énergie électrique à Tizi-Ouzou. Récupéré de <https://www.horizons.dz/?p=240812>
- Hosenuzzaman, M., Rahim, N. A., Selvaraj, J., Hasanuzzaman, M., Malek, A. B. M. A., & Nahar, A. (2015). *Global prospects, progress, policies, and environmental impact of solar photovoltaic power generation*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 284–297.
- International Union for Conservation of Nature (IUCN). (2010, July 9). *Remote villages of Ziarat electrified through solar energy*. <https://iucn.org/content/remote-villages-ziarat-electrified-through-solar-energy>
- IRENA. (2016). *Solar PV in the Global Energy Transition: The Role of Solar Photovoltaics in Meeting Climate and Energy Goals*. Abu Dhabi: International Renewable Energy Agency.
- Isaías, D. H. dos S., Cuamba, B. C., & Leão, A. J. (2019). *A review on renewable energy systems for irrigation in arid and semi-arid regions*. *Journal of Power and Energy Engineering*, 7(10), 21–46.
- Jamei, M., Bailek, N., Bouchouicha, K., Hassan, M. A., Elbeltagi, A., Kuriqi, A., Al-Ansari, N., Almorox, J., & El-kenawy, E. S. M. (2023). *Data-driven models for predicting solar radiation in semi-arid regions*. *Computers, Materials & Continua*, 74(1), 1625–1640.
- Li, Y., Wang, Z., Lei, Y., Yu, X., Che, H., & Zhang, X. (2026). *Ecological effects of photovoltaic deployment in China: a remote sensing assessment*. *Environmental Research Communications*, 8(4), Article 041016.
- Lightsource bp. (2025, June 26). *SolarPower Europe launches Global Market Outlook for Solar Power 2025–2029*. Lightsource bp. <https://lightsourcebp.com/fr/news/solarpower-europe-publie-ses-perspectives-mondiales-2025-2029-pour-le-marche-solaire/>
- Liqun, L., & Zhixin, W. (2009). *Solar Energy Development and Utilization*. *Energy Procedia*, 1(1), 413-420.
- Ludin, N. A., Mustafa, N. I., Cheng, M. Y., Ibrahim, M. A., Teridi, M. A. M., Sepeai, S., ... & Sopian, K. (2021). *Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of lifecycle assessment studies*. *Sustainability*, 13(1), 396.
- Mostefaoui, Z. (2019). *Étude du comportement d'un système d'apport énergétique destiné à alimenter une ferme agricole pilote (Thèse de doctorat)*. Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, Algérie.

- Mrozik, W., Rajaeifar, M. A., Heidrich, O., & Christensen, P. (2021). Environmental impacts, pollution sources and pathways of spent lithium-ion batteries. *Energy & Environmental Science*, 14(10), 6099-6121.
- Murphy, M. R. (1992). Water metabolism of dairy cattle. *Journal of Dairy Science*, 75(1), 326-333.
- Muteri, V., Cellura, M., Curto, D., Franzitta, V., Longo, S., Mistretta, M., & Parisi, M. L. (2020). Review on life cycle assessment of solar photovoltaic panels. *Energies*, 13(1), 252.
- Nacer, T., Hamidat, A., Nadjemi, O., & Bey, M. (2016). Feasibility study of grid connected photovoltaic system in family farms for electricity generation in rural areas. *Renewable Energy*, 96, 305-318.
- National Renewable Energy Laboratory. (2012). Life cycle greenhouse gas emissions from solar photovoltaics (NREL/FS-6A20-56487).
- National Renewable Energy Laboratory. (2021). Life cycle greenhouse gas emissions from electricity generation: Update (Fact Sheet NREL/FS-6A50-80580).
- Nicholson, S., & Heath, G. (2021). Life cycle greenhouse gas emissions from electricity generation: Update (Fact Sheet No. NREL/FS-6A20-80580). National Renewable Energy Laboratory.
- Oliveira, C. P., Sousa, F. C., Silva, A. L., Schultz, É. B., Londoño, R. I. V., & Souza, P. A. R. de. (2025). Heat Stress in Dairy Cows: Impacts, Identification, and Mitigation Strategies—A Review. *Animals*, 15(2), 249.
- Ong, S., Campbell, C., Denholm, P., Margolis, R., & Heath, G. (2013). Land-use requirements for solar power plants in the United States (Technical Report No. NREL/TP-6A20-56290). National Renewable Energy Laboratory.
- Panneaux Solaires Professionnels. <https://www.panneaux-solaires-professionnels.fr/schema-onduleur-photovoltaique/>
- Raihan, A., Muhtasim, D. A., Farhana, S., Hasan, M. A. U., Pavel, M. I., Faruk, O., Rahman, M., & Mahmood, A. (2022). Nexus between economic growth, energy use, urbanization, agricultural productivity, and carbon dioxide emissions: New insights from Bangladesh. *Energy Nexus*, 8, 100144.
- Ramirez-Camargo, L., & Schachter, J. A. (2019). Spatial distribution of energy payback time for crystalline silicon photovoltaic systems: The influence of regional solar irradiation and grid emission factors. *Applied Energy*, 237, 220–234.
- REN21. (2019). *Renewables 2019 Global Status Report*. Paris: REN21 Secretariat.
- Révolution Énergétique. (2022). Comment le soleil pourrait chasser le gaz en Algérie. <https://www.revolution-energetique.com/actus/comment-le-soleil-pourrait-chasser-le-gaz-en-algerie/>
- Reynolds, J. F., Stafford Smith, D. M., Lambin, E. F., Turner, B. L., Mortimore, M., Batterbury, S. P. J., Downing, T. E., Dowlatabadi, H., Fernández, R. J., Herrick, J. E., Huber-Sannwald, E., Jiang, H., Leemans, R., Lynam, T., Maestre, F. T., Ayarza, M., & Walker, B. (2007). Global desertification: Building a science for dryland development. *Science*, 316(5826), 847–851.
- Sani, G. D., Ibrahim, A., Sahabi, S., & Lailaba, B. B. (2019). Renewable Energy: Environmental Impacts and Economic Benefits for Sustainable Development. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 08(08).

- Schéma d'un panneau photovoltaïque. <https://mypower.engie.fr/conseils/panneaux-solaires/panneau-solaire-photovoltaique/schema-panneau-photovoltaique.html>
- Shine, P., Upton, J., Sefeedpari, P., & Murphy, M. D. (2020). Energy Consumption on Dairy Farms: A Review of Monitoring, Prediction Modelling, and Analyses. *Energies*, 13(5), 1288.
- Solar Energia. (n.d.). Grid-connected photovoltaic systems: Components. <https://solar-energia.net/en/photovoltaic-solar-energy/grid-connected/components>
- Solar Energy Handbook, Elsevier, 2012, "Grid-connected photovoltaic systems".
- Trancik, J. E., & Cross-Call, D. (2018). Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules, *Energy Policy*, doi:10.1016/j.enpol.2018.08.015.
- U.S. Environmental Protection Agency. Greenhouse Gas Equivalencies Calculator — Calculations and References. <https://www.epa.gov/energy/greenhouse-gas-equivalencies-calculator-calculations-and-references>
- Upton, J., Murphy, M. D., & Dillon, P. (2010). Dairy Farm Energy Consumption. Moorepark Dairy Conference, Teagasc, Ireland.
- Urbina, A. (2023). Sustainability of photovoltaic technologies in future net-zero emissions scenarios. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 31(5), 442–462.
- Wang, T., Mitloehner, F. M., & Sukumaran, S. (2023). Agrivoltaic systems: Optimizing land use, soil moisture retention, and microclimate management in arid regions. *Journal of Cleaner Production*, 382, 135-148.
- Zhang, L., Hussein, H., & Zhang, H. (2024). Resolving land use conflicts in developing photovoltaic. *Transactions in Energy and Sustainability*.
- Zoghi, M., Ehsani, A. H., Sadat, M., Amiri, M. J., & Karimi, S. (2017). Optimization solar site selection by fuzzy logic model and weighted linear combination method in arid and semi-arid region: A case study Isfahan-IRAN. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 986–996.
- <https://www.energy.gov/eere/solar/solar-photovoltaic-cell-basics>
- https://www.novaled.com/markets/organic_photovoltaics/
- <https://www.ses.com.eg/renewables/off-grid-and-back-up>

Résumé :

Dans ce mémoire, nous avons mené une étude sur l'impact écologique et la faisabilité technico-économique d'un système photovoltaïque destiné à alimenter une exploitation laitière de 50 vaches située à Remchi, wilaya de Tlemcen, dans une zone à fort potentiel solaire.

Dans un premier temps, nous avons estimé les besoins énergétiques annuels de l'exploitation, qui s'élèvent à 42 340 kWh/an, couvrant l'éclairage, la ventilation, la traite mécanique, le refroidissement du lait et le pompage de l'eau.

Sur la base de cette consommation, nous avons dimensionné un système photovoltaïque de 30 kWc couplé au réseau Sonelgaz, sans batteries, retenu comme configuration optimale après simulation avec le logiciel HOMER. Ce système assure 53 % de la couverture énergétique annuelle de la ferme.

La comparaison économique sur 25 ans montre que le système PV revient à 24 030 \$ contre 73 966 \$ pour un groupe électrogène diesel, soit un coût de l'énergie de 0,0403 \$/kWh contre 0,124 \$/kWh. Sur le plan environnemental, le système permet d'éviter 19,12 tonnes de CO₂ par an, représentant une réduction de plus de 95 % par rapport au scénario diesel.

Ces résultats confirment que l'énergie photovoltaïque constitue une technologie propre et prometteuse, à la fois économiquement rationnelle et écologiquement responsable, particulièrement adaptée aux exploitations agricoles des zones semi-arides algériennes.

Mots-clés :

Énergie photovoltaïque, Énergie renouvelable, Impact écologique, Simulation HOMER, Remchi, Exploitation agricole, Bilan carbone.

Abstract :

In this thesis, we conducted a study on the ecological impact and techno-economic feasibility of a photovoltaic system designed to power a 50-cow dairy farm located in Remchi, wilaya of Tlemcen, in a zone with high solar potential.

We first estimated the farm's annual energy needs, which amount to 42,340 kWh/year, covering lighting, ventilation, mechanical milking, milk cooling, and water pumping.

Based on this consumption, we designed a 30 kWc photovoltaic system connected to the Sonelgaz grid, without batteries, selected as the optimal configuration following simulation with the HOMER software. This system covers 53% of the farm's annual energy needs.

The economic comparison over 25 years shows that the PV system costs \$24,030 compared to \$73,966 for a diesel generator, with an energy cost of \$0.0403/kWh versus \$0.124/kWh. On the environmental side, the system avoids 19.12 tonnes of CO₂ per year, representing a reduction of over 95% compared to the diesel scenario.

These results confirm that photovoltaic energy is a clean and promising technology, both economically sound and environmentally responsible, particularly well-suited to agricultural farms in Algeria's semi-arid zones.

Keywords :

Photovoltaic energy, Renewable energy, Ecological impact, HOMER simulation, Remchi, Agricultural farm, Carbon footprint.

الملخص :

في هذا المذكرة، أجرينا دراسة حول الأثر البيئي والجدوى التقنية والاقتصادية لنظام طاقة شمسية كهروضوئية مخصص لتغذية مستثمرة لتربية الأبقار الحلوب تضم 50 رأساً، تقع في بلدية رمشي، ولاية تلمسان، في منطقة تتمتع بإمكانات شمسية عالية.

في مرحلة أولى، قَدَرنا الاحتياجات الطاقوية السنوية للمستثمرة، التي بلغت 340 42 كيلوواط ساعة في السنة، وتشمل الإنارة والتهوية والحلب الآلي وتبريد الحليب وضخ المياه.

على أساس هذه الاستهلاكات، صمّمنا نظاماً كهروضوئياً بقدرة 30 كيلوواط مربوطاً بشبكة سونلغاز، دون بطاريات، وقد تم اختياره كتكوين أمثل بعد إجراء محاكاة ببرنامج HOMER. يؤمّن هذا النظام 53 % من الاحتياج الطاقوي السنوي للمزرعة.

تُظهر المقارنة الاقتصادية على مدى 25 سنة أن تكلفة النظام الشمسي تبلغ 030 24 دولاراً مقابل 966 73 دولاراً لمولد الديزل، بتكلفة طاقة تبلغ 0.0403 دولار للكيلوواط ساعة مقابل 0.124 دولار. أما على الصعيد البيئي، فيتيح النظام تجنّب انبعاث 19.12 طن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً، أي تخفيضاً يتجاوز 95 % مقارنة بسيّنايو الديزل.

تؤكد هذه النتائج أن الطاقة الشمسية كهروضوئية تقنية نظيفة واعدة، اقتصادية وبيئية في آنٍ واحد، وهي الأنسب للمستثمرات الفلاحية في المناطق شبه الجافة بالجزائر.

الكلمات المفتاحية :

الطاقة الكهروضوئية، الطاقة المتجددة، الأثر البيئي، محاكاة HOMER، الرمشي، المستثمرة الفلاحية، البصمة الكربونية.