

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Populaire République algérienne démocratique et
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة بلحاج بوشعيب بعين تموشنت
Université Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Faculté des Science et de Technologie



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en:
Domaine: SCIENCE DE LA MATIERE
Filière: PHYSIQUE
Spécialité: physique des matériaux

**Étude sur : « Systèmes Énergétiques Innovants : L'Utilisation de
l'Énergie Solaire pour l'Élevage de Volaille »**

Présenté par : HADDOUCHE Ahmed Amine

Devant le jury composé de :

<i>Présidente :</i> M ^{elle} . TOUIA Amina	Pr	UBB Ain te emouchent
<i>Examinatrice :</i> M ^{me} . MESSAOUDI Ilhem Souad	MCA	UBB AinTemouchent
<i>Encadreur :</i> M ^{me} . RACHEDI Samia	MCB	UBB de AinTemouchent.

Année universitaire 2024-2025

REMERCIEMENTS

Je remercie tout d'abord le bon **DIEU** Clément et miséricordieux pour m'avoir donné la vie et m'avoir orienté sur le bon chemin de la science, me conférant la volonté de réaliser et d'achever ce travail.

Je tiens à exprimer mes sincères et chaleureux remerciements à l'ensemble de mes enseignants et professeurs :

- **Mme. RACHEDI. S**, pour avoir eu la patience et l'attention de m'encadrer tout au long de la préparation de mon présent travail et m'avoir enseigné.

- **Melle. Touia. A**, pour avoir acceptée de présider le jury devant lequel je présenterai mon travail et m'avoir enseigné.

- **Mme. MESSAOUDI. I. S**, pour sa participation au jury comme examinatrice et m'avoir enseigné.

DEDICACES

Etant arrivé à la fin du cycle de mes études de graduation couronné par la préparation de mon présent mémoire pour l'obtention du diplôme MASTER en physique des matériaux, je tiens à marquer toutes ma reconnaissance à tous ceux et celles qui m'ont soutenu tout au long de mon parcours scolaire. Aussi je dédie mon travail à :

- Mes grands-parents paternels et maternels que Dieu leur assure sa miséricorde, et longue vie.
- Mes parents pour leur soutien permanent sans relâche veillant à ce que je ne manque de rien pour réussir mes études et à me donner la meilleure éducation. Je leur témoigne toute ma reconnaissance et mon profond respect.
- Mes oncles et tantes maternels pour m'avoir reçu et les encouragements qu'ils m'avaient témoignés.
- Mes camarades et amis particulièrement pour la confiance qu'ils m'ont tout le temps témoignée.
- L'ensemble de mes professeurs qui m'ont transmis les connaissances de diverses sciences en m'accompagnant durant tout mon parcours scolaire du début jusqu'à maintenant. Je leurs témoigne

Résumé

Résumé

Le titre "Systèmes Énergétiques Innovants : L'Utilisation de l'Énergie Solaire pour l'Élevage de Volaille" évoque l'intégration de technologies solaires dans les pratiques avicoles. Ce résumé pourrait explorer comment l'énergie solaire est utilisée pour alimenter des systèmes de chauffage, d'éclairage et de ventilation dans les élevages de volaille, réduisant ainsi les coûts énergétiques et l'empreinte carbone. L'étude pourrait également aborder les avantages économiques et environnementaux de ces systèmes, tout en mettant en lumière les innovations spécifiques, telles que des serres solaires ou des panneaux photovoltaïques, qui améliorent le bien-être animal et la productivité.

Abstract

The title "Innovative Energy Systems: Using Solar Energy for Poultry Farming" discusses the integration of solar technologies into poultry farming practices. This abstract could explore how solar energy is used to power heating, lighting, and ventilation systems on poultry farms, thereby reducing energy costs and carbon footprints. The study could also address the economic and environmental benefits of these systems, while highlighting specific innovations, such as solar greenhouses or photovoltaic panels that improve animal.

ملخص

يناقش عنوان "أنظمة الطاقة المبتكرة: استخدام الطاقة الشمسية في تربية الدواجن" دمج تقنيات الطاقة الشمسية في ممارسات تربية الدواجن. يمكن لهذا الملخص استكشاف كيفية استخدام الطاقة الشمسية لتشغيل أنظمة التدفئة والإضاءة والتهوية في مزارع الدواجن، وبالتالي تقليل تكاليف الطاقة والبصمة الكربونية. ويمكن أن تتناول الدراسة أيضاً الفوائد الاقتصادية والبيئية لهذه الأنظمة، مع تسليط الضوء على ابتكارات محددة، مثل البيوت الزجاجية الشمسية أو الألواح الكهروضوئية، التي تعمل على تحسين رفاهة الحيوان وإنتاجيته.

Sommaire

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Liste des figures

Liste des abréviations

Résumé

Introduction générale page 1,2

Chapitre I : Les fondamentaux de l'énergie solaire

I.1. Définition du soleil (Origine de son énergie, ses dimensions, sa composition et sa structure).....	page 2
I.2. Les phénomènes solaires	page 3
I.2.1. Les vents solaires	page 3
I.2.2. Les taches solaires	page 4
I.2.3. Les éruptions solaires	page 4
I.2.4. Les protubérances	// page 5
I.3. Circuit des différentes chaînes proton-proton au cours de la fusion	page 6
I.4. Le spectre solaire.....	page 7
I.5. La puissance solaire (P_T), la constante solaire (I_s) et la puissance moyenne de l'irradiation à l'échelle du globe terrestre P_d	page 8
I.5.1. La puissance solaire (P_s).....	page 8
I.5.2. La constante solaire (I_s).....	// page 8
I.5.3. Puissance moyenne de l'irradiation à l'échelle du globe terrestre.....	page 9
I.6. Identité de la lumière.....	page 11
I.7. Dualité onde-corpuscule de la lumière.....	page 11

I.7.1. Aspect ondulatoire de la lumière	.....
page 11	
I.7.2. Aspect corpusculaire de la lumière	.....
page 12	
I.8. Le système planétaire et la géométrie soleil-terre	.....
page 13	
Le rôle de l'atmosphère et l'irradiation terrestre	.....page 15
I.9. La Masse d'Air AM	.....
page 17	
I.10. L'effet photovoltaïque	.....
page 20	

Chapitre II : Système photovoltaïque

II.1 Solaire photovoltaïque	.....page 22
II.1.1 Définition	.....
page 23	
II.1.2 Fonctionnement de la technologie ...	.....
page 24	
II.2. État des lieux des technologies traditionnelles	.....
page 24	
II.3. L'effet photovoltaïque :	.....
page 25	
II.4. Les différentes étapes de la conversion photovoltaïque :	.....
page 26	
II.5. Caractéristiques de la cellule PV :	

.....	page 33
II.5.1. Caractéristique courant-tension I(V) )	.....
.....	page 33
II.5.2. L'influence de l'éclairement et de la température sur la caractéristique I(V)	page40
II.5.2.1. L'influence de l'éclairement \square^* :	.....
.....	page 40
II.6. Les différents types de cellules photovoltaïques :	.....
.....	page 41
II.6.1. Cellules monocristallines :	.....
.....	page 42
II.6.1.1. La Méthode de Czochralski (CZ) :	.....
.....	page 43
II.6.1.2. Techniques de fusion de zone (FZ) :	.....
.....	page 43
II.6.2. Cellules polycristallines :	.....
.....	page 44
II.1 DIFFERENTS TYPES DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES.....	page 47
II.1.1 Le système off-grid (hors réseau)	page 47
II.1.2 Le système on-grid.....	page 49
II.2 LES ELEMENTS D'UN KIT PHOTOVOLTAIQUE.....	page 50
II.2.1 Le module photovoltaïque	page 50
II.2.2 Le régulateur de charge	page 54
II.2.2.1 Le rôle d'un régulateur de charge	page 54
II.2.2.2 Les types des régulateurs.....	page 54

II.2.3 SYSTEME DE STOCKAGE (BATTERIE)	page 57
II.2.3.1 Définition	page 57
II.2.3.2 Les différents types de batteries.....	page 57
II.2.4 LE CONVERTISSEUR.....	page 60
II.2.4.1 Définition	page 60
II.2.4.2 Les types de convertisseurs statiques	page 61
II.2.5 Câblage électrique	page 64
II.2.5.1 Câble solaire.....	page 64
II.2.5.2 Connecteurs MC4	page 66

II. 3Système de protection électrique

.....
page 67

II.3.1 Protection courant continue DC

.....
page 67

II.3.1.1. Protection des branches

.....
page 67

II.3.1.2. Protection par coffre DC

.....
page 68

II.3.2. Protection courant alternatif AC

.....
page 70

II.3.3. La mise à la terre

.....
page 72

II.4. Compteur électrique (smart meter)

.....
page 73

Chapitre III : Installation photovoltaïque pour une habitation isolée

III.1 Etapes administratives et techniques

.....
page 62

III.2 Utilisation du logiciel PVsyst, simulation d'un kit photovoltaïque off grid d'une puissance de 1694W	page 66
III.2.1 Définition du logiciel PVsyst version 7.4	page 66
III.2.2 Les différentes étapes suivies pour effectuer la simulation d'un système PV autonome (off grid) d'une puissance de 1694W	page 68
III.2.2.1 Choisir une conception d'un système isolé	page 68
III.2.2.2 Nomination du projet et localisation géographique du site	page 69
III.2.2.3 Évaluation des besoins énergétique de la maison(bilan de puissance)	page 72
III.2.2.4 Choix du type de support, orientation et inclinaison des modules Photovoltaïques.....	page 74
III.2.2.5 Dimensionnement du générateur photovoltaïque	page 75
III.2.2.6 Dimensionnement du système de stockage	page 77
III.2.2.7 Choix du régulateur de charge	page 80
III.2.2.8 Modélisation en 3D simplifiée de la maison et du générateur PV... ..	page 81
III.2.3 Photos des kits photovoltaïques installés au profit de maisons rurales de la Wilay de Sidi-Bel-Abbès	page 94
Conclusion générale	page 100
Références bibliographiques	page 101 ,102
IV.1. Introduction	

IV .2. Définition du logiciel PVsyst version 7.4 :

IV .2.1. Conception du Système :

IV .2.2. Bases de Données :

IV .2.3. Choix de Type de Support, Inclinaison et Orientation

IV .2.4. Outils Avancés et Utilitaires :

IV .2.5. Modélisation 3D et Maquette

IV .3. Les différentes étapes suivies pour effectuer la simulation d'un système PV autonome (off grid) :

IV .3.1. Choisir une conception d'un système isolé

IV .3.2. Nomination du projet et localisation géographique du site :

IV .3.3. Évaluation des besoins énergétique de la installation PV off grid pour poulailler dans la région d'Ain Temouchent (bilan de puissance) :

IV .3.4. Choix du type de support, orientation et inclinaison des modules Photovoltaïques :

IV .3.5. Dimensionnement du générateur photovoltaïque

IV .3.6. Dimensionnement du système de stockage :

IV .3.7. Choix du régulateur de charge

IV .3.8. Dimensionnement de l'onduleur

Abréviations

Symbole	Description
PV	Photovoltaïque
$h\nu$	Photon d'énergie
BC	Bande de conduction
BV	Bande de valence
STC	Conditions de test standardisées
AM	Air Mass
FF	Facteur de forme
V_{CO}	Tension de circuit ouvert
I_{CC}	Courant de court-circuit
P_{max}	Puissance maximale
I_{max}	Courant maximal
V_{max}	Tension maximale
Si	Silicium
ZEC	Zone de charge d'espace
R_s	Résistance en série
R_{shunt}	Résistance en parallèle (Shunt)

Introduction générale

Au cours des dernières décennies, la question énergétique est devenue un enjeu central dans le développement durable des sociétés. L'agriculture, en tant que secteur fortement dépendant des ressources énergétiques, est particulièrement concernée par cette transition. Dans un contexte de raréfaction des énergies fossiles, de hausse des coûts de l'électricité et de lutte contre le changement climatique, l'intégration des énergies renouvelables dans les pratiques agricoles représente une voie d'innovation incontournable.

Parmi les sources d'énergie renouvelable, l'énergie solaire occupe une place de choix, en raison de son accessibilité, de sa propreté et de son potentiel de déploiement, notamment dans les zones rurales. Son application dans le secteur de l'élevage avicole ouvre des perspectives nouvelles : production d'électricité pour les équipements, chauffage des bâtiments, régulation thermique, éclairage intelligent... Autant d'outils permettant d'allier performance, autonomie énergétique et bien-être animal.

Cependant, la mise en œuvre de ces technologies pose également plusieurs interrogations : quels sont les impacts réels sur la rentabilité économique des exploitations ? L'énergie solaire permet-elle d'améliorer significativement le confort et la productivité des volailles ? Quelles sont les contraintes techniques et financières qui freinent encore son adoption dans les fermes avicoles ? Autant de questions qui nécessitent une analyse multidimensionnelle.

L'objectif de ce mémoire est donc d'étudier l'apport de l'énergie solaire comme solution innovante au service de l'élevage de volaille. Il s'agira d'analyser ses avantages techniques et économiques, d'en mesurer les effets sur le bien-être animal et la production, tout en identifiant les limites actuelles et les perspectives d'évolution. Pour cette raison nous allons nous concentrer sur les installations photovoltaïques off-grid, et Nous explorerons les différents composants d'un système solaire résidentiel, les avantages qu'il offre en termes d'indépendance énergétique et d'économies à long terme, ainsi que les considérations pratiques et techniques pour sa mise en œuvre efficace.

De plus Nous explorerons les moyens par lesquels nous pouvons transformer cette ressource naturelle en une source d'énergie inestimable pour notre avantage, contribuant ainsi à la transition vers une économie plus durable et à la réalisation de nos objectifs en matière d'énergie propre et renouvelable, car il est flagrant que l'Algérie est un pays qui est bien placé

Pour exploiter pleinement le potentiel de l'énergie solaire et Nous parlerons du programme PV Système, de son objectif, de son utilisation et des résultats possibles.

Pour répondre à cette problématique, notre démarche s'articulera autour de plusieurs axes. Dans un premier temps, une revue des technologies solaires appliquées à l'élevage sera présentée. Ensuite, l'impact économique de ces installations sera étudié, suivi d'une analyse des effets sur le bien-être animal et la productivité. Enfin, les défis actuels et les pistes d'amélioration possibles seront discutés.

À travers ce travail, nous souhaitons mettre en lumière les enjeux et les opportunités liés à l'intégration de systèmes énergétiques innovants dans le secteur avicole, dans une perspective de durabilité, d'efficacité et de modernisation de l'agriculture.

Chapitre I :
Les fondamentaux de l'énergie
solaire

I.1. Définition du soleil (Origine de son énergie, ses dimensions, sa composition et sa structure) :

Le soleil est une étoile qui a une forme presque sphérique dite pseudo-sphérique de type naine jaune ayant un diamètre au voisinage de 1391 000 km faisant environ 109 fois celui de la terre, et une masse de 2×10^{30} Kg approximativement 330 000 fois celle de la terre.

Celui-ci établit l'équilibre du système planétaire (situé dans la galaxie de la voie lactée), en occupant la partie centrale autour de laquelle gravitent les 8 planètes.

Le soleil est défini comme une boule de gaz constituée principalement de 75% d'hydrogène, de 23% d'hélium et les 2% restant sont répartis en d'autres éléments tels que le carbone, l'azote, et le néon.

Sa densité moyenne est de 1.4 g/cm^3 et sa température de surface est de 5785 K, tandis qu'au niveau du noyau ces grandeurs sont beaucoup plus importantes, d'où sa température au noyau atteint 15 millions K, avec une densité de 150 g/cm^3 et une pression de 10^{11} bar permettant ainsi à des réactions de fusion thermonucléaire d'avoir lieu transformant l'hydrogène en hélium afin de générer continuellement une énergie colossale de l'ordre de 386×10^{24} J par seconde.

Cette énergie produite au niveau du noyau est transportée sous forme de rayons gamma et de rayons X sur une distance correspondant aux deux tiers du rayon solaire (zone radiative) ; au-delà, le transport d'énergie est assuré par convection.

La zone convective est située au-dessus de la zone radiative, et à ce niveau-là l'énergie est transportée principalement par convection, c'est-à-dire par des mouvements de matière chaude lesquels montent vers la surface puis redescendent après avoir refroidi.

La photosphère constitue la surface visible du soleil, avec une épaisseur ne dépassant pas 300 km et une température de 5800 K environ.

La couche suivante est invisible appelée la chromosphère, d'une épaisseur estimée à quelques milliers de kilomètres.

La zone où se rencontrent la photosphère et la chromosphère présente une température relativement basse, autour de 4000K ; mais à partir de cette zone d'intersection la température augmente à nouveau pour atteindre plusieurs centaines de milliers de degrés.

La couche périphérique est appelée la couronne laquelle représente la dernière couche solaire, ayant plusieurs millions de kilomètres d'épaisseur, et une température intérieure s'élevant à plus d'un million de degrés.

Il est à noter que la stabilité du soleil est due à l'équilibre mécanique entre la gravitation agissant vers l'intérieur et aux différentes pressions produites au niveau du noyau lors des réactions de fusion thermonucléaire agissant en sens inverse (Figure I.1). [1]

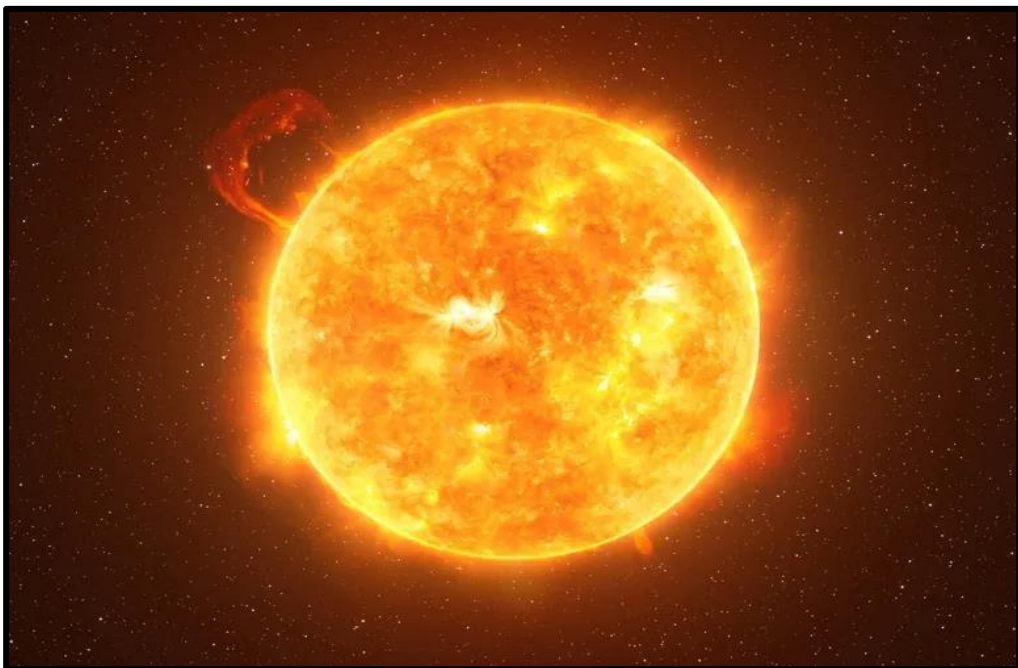


Figure I.1 : Le soleil

I.2. Les phénomènes solaires

I.2. 1. Les vents solaires :

Le vent solaire est constitué de protons et d'électrons quittant la surface solaire à une vitesse de 500 km/s. Il agit comme une irradiation de matière avec une grande portée, se déplaçant à une vitesse d'environ mille fois celle du son lorsqu'il frôle la terre. Sa densité varie entre 5 et 10 particules /cm³ laquelle est plus élevée que la densité moyenne dans l'espace.

Le champ magnétique terrestre dévie la majorité du vent solaire, mais une petite fraction parvient à provoquer des aurores polaires. Le vent solaire joue aussi un rôle de barrière en

bloquant les particules énergétiques du rayonnement cosmique (Figure I.2). [KHEDIM Ahmed, centre de publication universitaire, Tunis 2003].

I.2. 2. Les taches solaires :

Les taches solaires sont des régions sombres qui apparaissent dans l'atmosphère du Soleil, souvent situées entre les latitudes 40° nord et 40° sud. Ces zones sont caractérisées par des températures plus basses, autour de 4000 K. Les taches solaires sont également un indicateur clé de l'activité solaire et des cycles solaires (Figure I.2). [2]

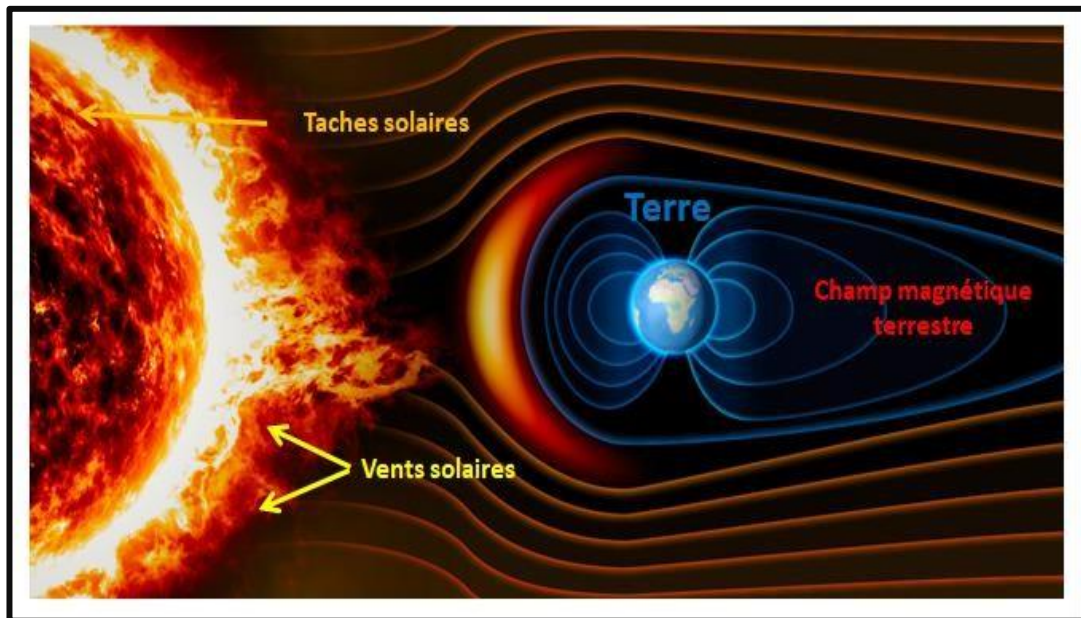


Figure I.2 : illustrant les taches et les vents solaires

I.2.3. Les éruptions solaires :

Les éruptions solaires sont des explosions soudaines et intenses d'énergie à la surface du Soleil. Elles sont souvent précédées d'une protubérance locale et libèrent une énorme quantité d'énergie, équivalente à la production de millions de centrales électriques sur une période de cent ans.

Ces éruptions sont accompagnées de manifestations radiatives dans le domaine X et radio, et peuvent émettre des particules de haute énergie pouvant quitter le soleil (Figure I.3). [3]



Figure I.3 : illustrant les éruptions solaires

I.2. 4. Les protubérances :

Les protubérances sont de longues structures sombres composées de matière relativement froide et dense. Elles s'étendent au-dessus de la surface solaire et peuvent atteindre 20 000 km dans la couronne solaire. Ces structures sont souvent associées à des zones brillantes appelées facules et peuvent durer plusieurs rotations solaires (Figure I.4). [3]

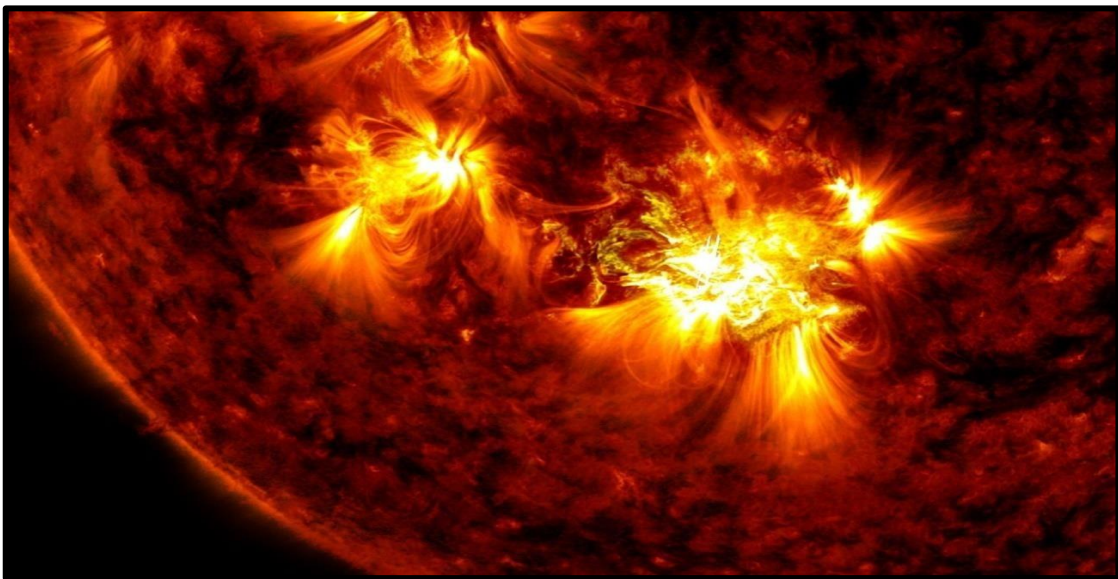
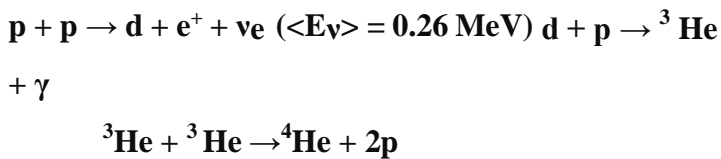


Figure I.4 : Les protubérances solaires

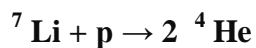
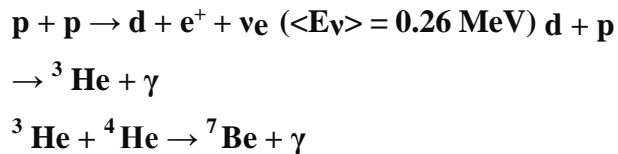
I.3. Circuit des différentes chaînes proton-proton au cours de la fusion :

Les réactions de fusion nucléaire au sein du Soleil, sont principalement des chaînes de fusion proton-proton (pp), lesquelles transforment l'hydrogène en hélium. Les chaînes proton-proton sont classifiées en trois branches (ppI, ppII et ppIII) lesquelles diffèrent par les réactions spécifiques impliquées et les probabilités d'occurrence de chacune.

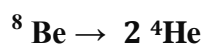
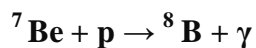
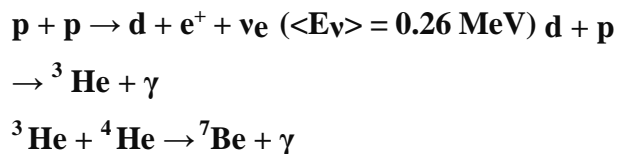
Chaîne proton-proton I (ppI)



Chaîne proton-proton II (pp II)



Chaîne proton-proton III (pp III)



γ : photon dégagé sous forme de rayon gamma

e^+ : positron

E_ν : énergie cinétique moyenne des neutrinos émis

d : deutérium, hydrogène lourd (^2H)

ν_e : neutrino

Il est à noter que Les probabilités de chacune des chaînes de réactions dans le soleil sont les suivantes : 84,92% pour la chaîne pp I, 15,06% pour la chaîne pp II, et 0,02% pour la chaîne pp III. [4]

I.4. Le spectre solaire :

Le spectre solaire s'étend des ondes courtes riches en énergie aux ondes longues. A une distance d'environ 150 millions de kilomètres de la terre ; l'irradiation solaire est fortement affaiblie à son arrivée près de notre planète.

L'atmosphère terrestre agit comme un filtre, ne permettant que le passage du rayonnement solaire à certaines fréquences, principalement dans les fenêtres allant du visible aux ondes radio courtes et ultra-courtes comme le montre la figure I.5. En conséquence, la lumière solaire arrive en grande partie à la surface de la terre. Cette lumière visible est essentielle pour la photosynthèse et la vision humaine, tandis que d'autres parties du spectre solaire ont des implications variées sur les phénomènes physiques, biologiques et environnementaux.

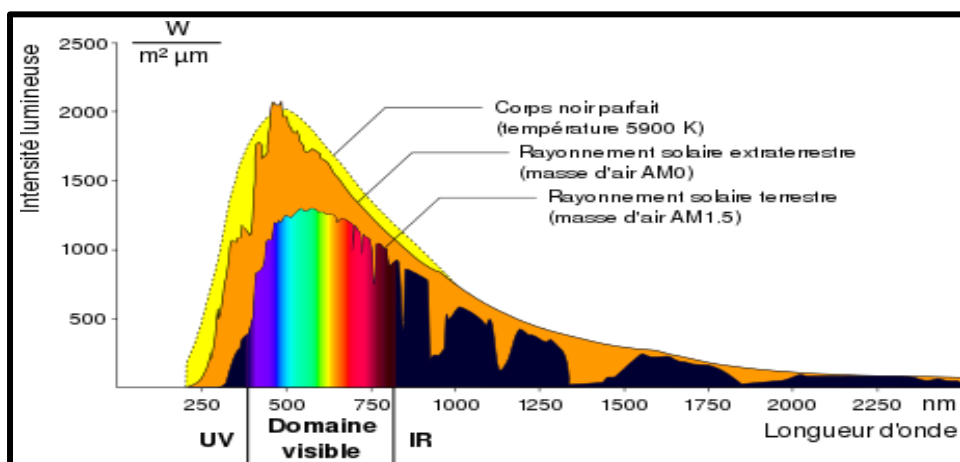


Figure I.5 : Le rayonnement solaire terrestre et extraterrestre

I.2. La puissance solaire (P_T), la constante solaire (I_s) et la puissance moyenne de l'irradiation à l'échelle du globe terrestre P_d :

I.2.1. La puissance solaire (P_s) :

Désigne la quantité d'énergie qu'émet le soleil par unité de temps, cette dernière est calculée à partir de la loi de Stefan-Boltzmann qui décrit la puissance émise par un objet lumineux en fonction de sa température de surface.

Dans un premier temps nous allons calculer la puissance solaire par unité de surface :

$$P = \epsilon \times \sigma \times T^4$$

P: Puissance émise par unité de surface (W/m^2).

ϵ : Émissivité (sans unité).

T : température(K).

σ : constante de Stefan-Boltzmann ($W/m^2 \times K^4$).

Dans le cas du soleil $\epsilon_s \approx 1$, car ce dernier est assimilé à un corps noir.

$$P_s \approx \epsilon_s \times \sigma \times T^4 \approx 5.67 \times 10^{-8} \times (5785)^4 \approx 63503332 \text{ W/m}^2$$

Pour calculer la puissance émise à travers toute la surface du soleil (puissance solaire), il suffit de multiplier par sa superficie notée S_s ayant un diamètre D_s .

$$P_T = P_s \times S_s = P_s \times \pi \times (D_s)^2 \approx 63503332 \times \pi \times (1391 \times 10^6)^2 \approx 3.86 \times 10^{26} \text{ W}$$

I.2.2. La constante solaire (I_s):

C'est la puissance reçue par chaque mètre carré d'une surface située à une distance d'une unité astronomique du soleil, étant la distance moyenne entre la terre et le soleil. Cependant la puissance fournie par le soleil est répartie à travers toute une sphère imaginaire possédant un rayon équivalent à la distance le séparant de la terre appelée sphère (soleil-terre) ou sphère céleste centrée sur le soleil, d'où sa superficie est notée (S_{S-T}) comme représenté dans la Figure I.6.



Figure I.6 : La sphère imaginaire (soleil-terre) sur laquelle la puissance solaire est répartie

$$I_s = \frac{P_T}{S_{S-T}} = \frac{P_T}{4\pi \times (D_{S-T})^2} = \frac{3.86 \times 10^{26}}{4\pi \times (1.5 \times 10^{11})^2} \approx 1365 \text{ W/m}^2$$

I.5.3. Puissance moyenne de l'irradiation à l'échelle du globe terrestre :

Désigne la puissance totale reçue par le globe terrestre, mais qui ne peut pas être interceptée par celui-ci en même temps, c'est-à-dire qu'elle est répartie au fur et à mesure que la terre tourne sur elle-même en 24 heures. Donc il est convenable d'assimiler le globe terrestre à un disque possédant le même rayon que la terre (R_T) appelé disque terre comme le montre la Figure I.7.

$$P_g = \frac{P_d}{S_T} = \frac{P_d}{4 \times \pi \times R_T^2} = \frac{1.74 \times 10^{17}}{4 \times \pi \times (6371 \times 10^3)^2} \approx 341 \text{ W/m}^2$$

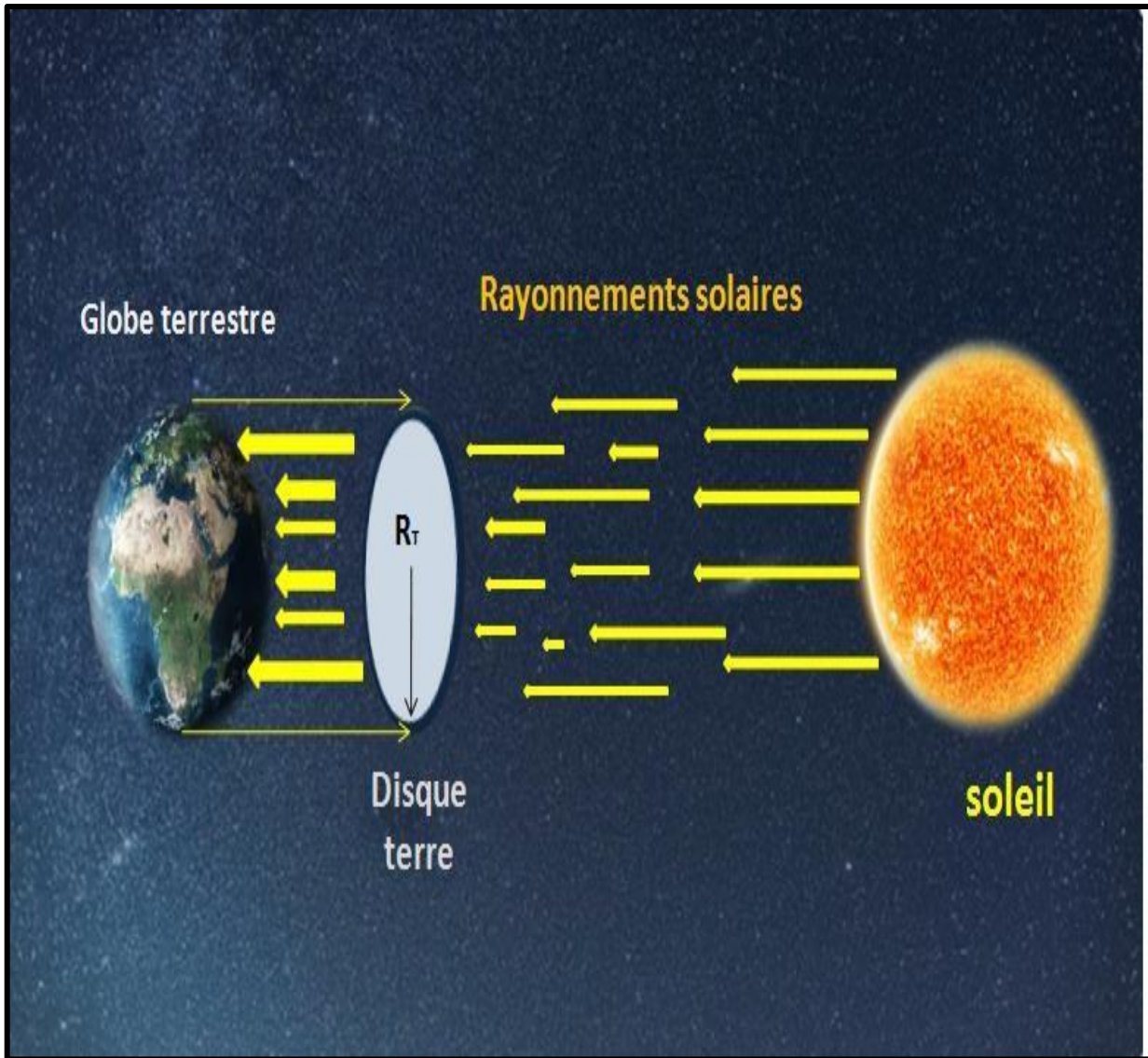


Figure I.7 : Le rayonnement solaire intercepté par le disque terre

$$P_d = S(\text{Disque Terre}) \times I_s = \pi \times (R_T)^2 \times I_s = \pi \times (6371 \times 10^3)^2 \times 1365 \approx 1.74 \times 10^{17} \text{ W}$$

Pour calculer la puissance que reçoit chaque m^2 de la planète terre notée (P_g), il suffit de diviser la puissance reçue par le disque terre sur toute la surface du globe terrestre (ST) de la manière suivante :

I.3. Identité de la lumière :

La lumière est une forme d'énergie spécifique émise par un corps, généralement lorsqu'il atteint une haute température et devient incandescent. Cette énergie se manifeste sous forme de rayonnement autour du corps émetteur, d'où le terme (rayon lumineux) utilisé pour désigner le trajet suivi par la lumière. En général, la lumière est détectée par ses effets sur l'œil et les instruments optiques, mais elle peut également être perçue par ses effets thermiques, chimiques et électriques. La lumière consiste en particules infiniment petites lancées dans toutes les directions par un corps lumineux. [5]

I.4. Dualité onde-corpuscule de la lumière :**I.4.1. Aspect ondulatoire de la lumière :**

La lumière, ainsi que tout type de rayonnement électromagnétique (ondes radio, micro-ondes, infrarouges, lumière visible, ultraviolets, rayons X, rayons gamma), est une forme de propagation de champs électriques et magnétiques oscillants qui s'influencent mutuellement. La variation dans le temps d'un champ électrique crée un champ magnétique, perpendiculaire au premier et l'accompagnant à mesure qu'ils se déplacent dans l'espace. De même, la variation d'un champ magnétique dans le temps génère un champ électrique perpendiculaire, créant une onde électromagnétique.

Les deux champs, électrique et magnétique, sont intimement liés et se propagent à la vitesse de la lumière qui est de 3×10^8 kilomètres par seconde environ dans le vide. Cette onde électromagnétique peut interagir avec la matière, notamment en influençant les charges électriques présentes. Parmi ces deux champs, c'est souvent la composante électrique qui joue le rôle le plus important dans les phénomènes physiques comme la vision, la photochimie, la fluorescence, et autres. Les ondes électromagnétiques se caractérisent également par leur fréquence et leur longueur d'onde, qui sont inversement proportionnelles (Figure I.8). [5]

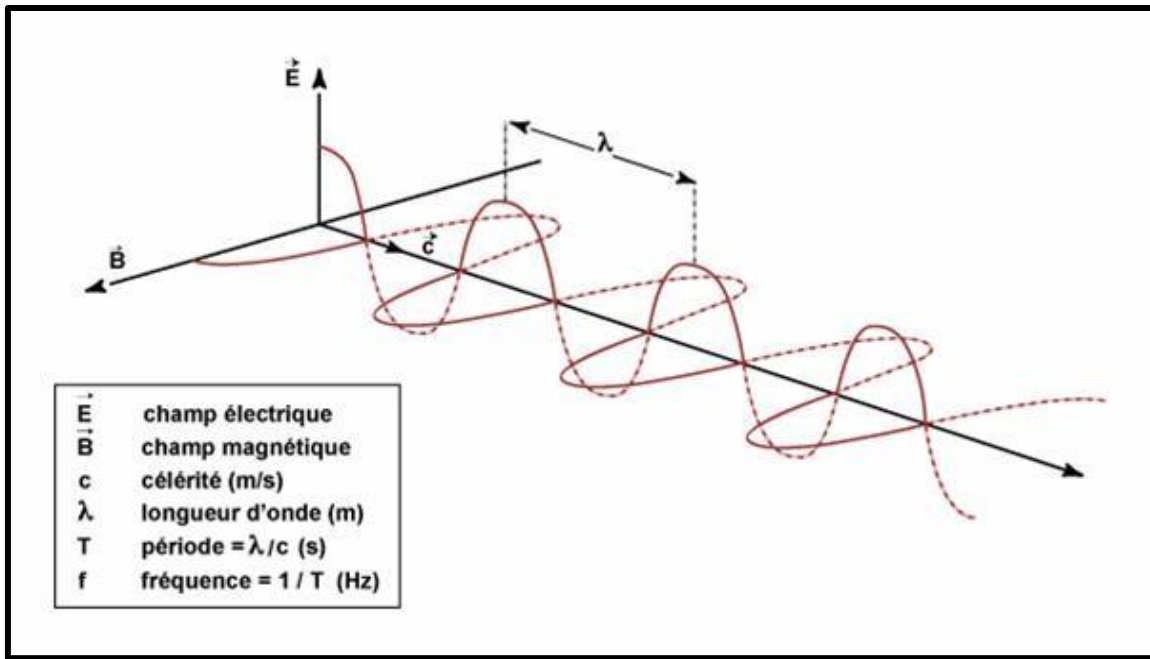


Figure I.8 : le déplacement de la lumière sous forme d'une onde électromagnétique

I.4.2. Aspect corpusculaire de la lumière :

Vers la fin du 19^{ième} siècle, la théorie de la lumière a évolué grâce à la nouvelle compréhension d'Einstein en 1905. Il a introduit une théorie corpusculaire capable de résoudre plusieurs problèmes expérimentaux, bouleversant ainsi le monde scientifique de l'époque.

L'idée principale de cette théorie est que la lumière et les autres formes de rayonnements électromagnétiques transportent leur énergie en paquets discrets appelés quantas ou photons, se déplaçant avec l'onde.

Einstein a affirmé que la lumière est constituée de photons sans masse, lesquelles sont les particules élémentaires de l'énergie électromagnétique (Figure I.9).

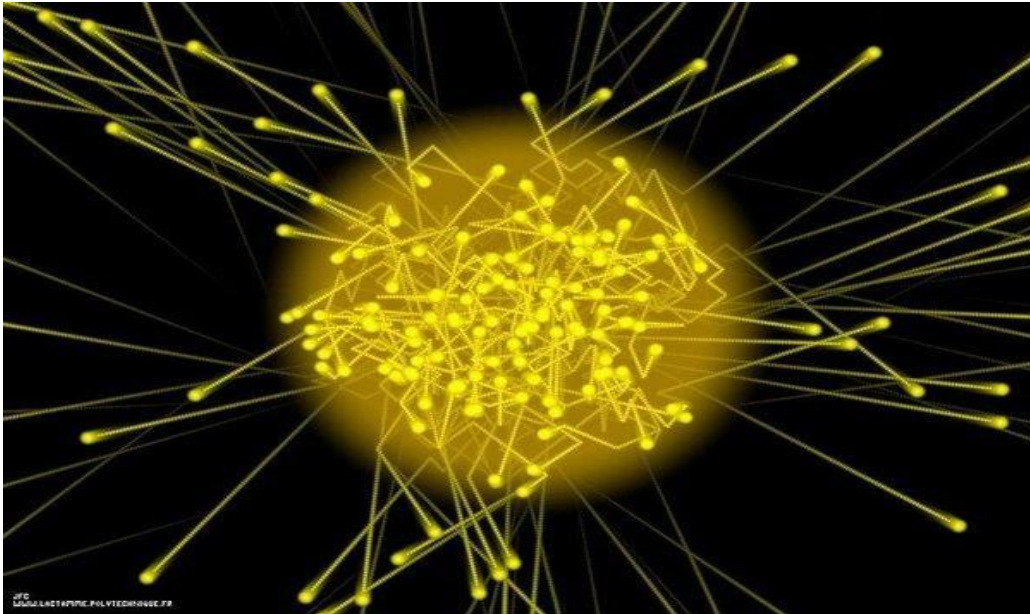


Figure I.9 : Le comportement corpusculaire de la lumière

Les photons sont produits par des vibrations atomiques avec une fréquence déterminée et ont une longueur d'onde plus ou moins grande.

L'énergie transportée par un photon est proportionnelle à sa fréquence selon la formule $E=h \times \nu$, où h est la constante de Planck.

Lors de l'émission et de l'absorption, la lumière et d'autres formes de rayonnements électromagnétiques se comportent comme un courant concentré d'énergie, interagissant avec la matière. À cette échelle, la lumière présente une dualité onde-particule, se comportant parfois comme une onde électromagnétique classique et parfois comme un flux de particules.

Cette dualité onde-particule est une caractéristique fondamentale de la lumière, et elle s'applique également à d'autres particules subatomiques telles que les électrons et les protons.

Les particules comme les photons peuvent se comporter comme des particules ou comme des ondes selon les circonstances. [5]

I.5. Le système planétaire et la géométrie soleil-terre :

Le Soleil est situé au centre de notre système planétaire et les huit planètes orbitent autour de lui dans un circuit écliptique. Les planètes, de la plus proche à la plus éloignée du Soleil, sont Mercure, Vénus, Mars, Jupiter, Saturne, Uranus et Neptune comme le montre la Figure I.10.

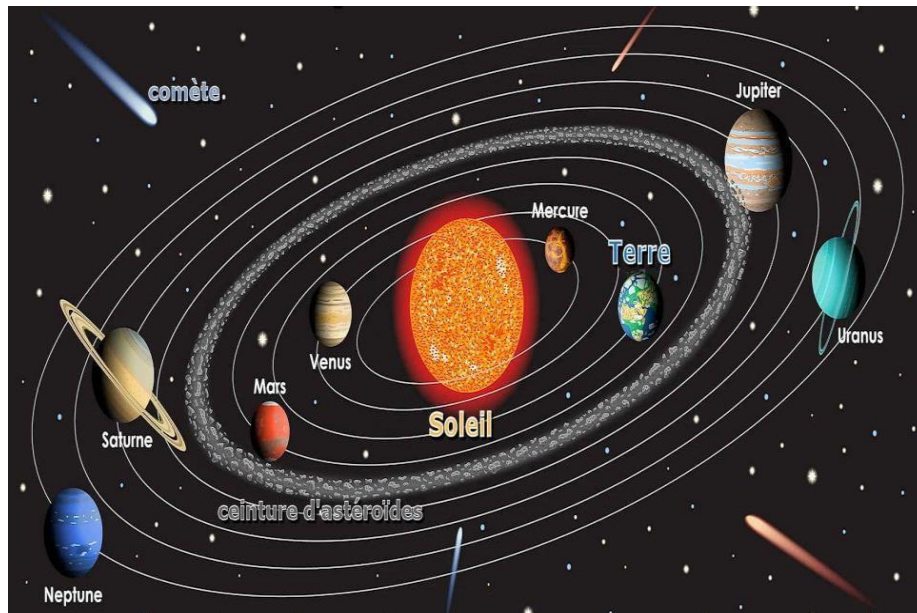


Figure I.10 : Le système solaire

La terre, est la troisième planète à partir du soleil ayant un diamètre équatorial d'environ 12700 km.

Elle effectue une révolution autour du soleil en 365 jours, suivant une orbite elliptique où le soleil est considéré comme un point fixe au centre.

La distance entre la terre et le soleil varie d'environ 3,3 % au cours de l'année, allant de 147 millions de km au point le plus proche à 152 millions de km au point le plus éloigné.

La distance moyenne est de 150 millions de km, également connue sous le nom d'unité astronomique (UA).

La lumière met 8 minutes pour parcourir cette distance et atteindre la terre (Figure I.11).

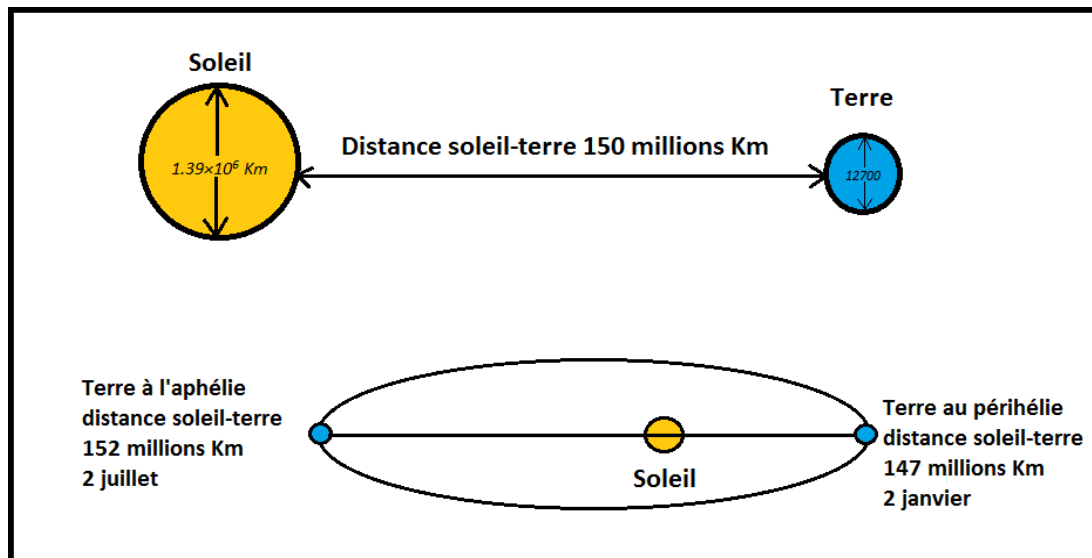


Figure I.11 : Le rapport géométrique soleil-terre

1.6. Le rôle de l'atmosphère et l'irradiation terrestre :

Le rayonnement solaire extraterrestre atteint la couche externe de l'atmosphère terrestre avec une intensité d'environ 1365 W/m^2 , connue sous le nom de constante solaire. Ce rayonnement est considérablement atténué lorsqu'il traverse les différentes couches atmosphériques, qui agissent comme un bouclier protecteur. L'atténuation se produit par divers mécanismes, notamment la réflexion, l'absorption, et la diffusion.

Ces interactions diminuent l'intensité du rayonnement solaire au fur et à mesure qu'il se rapproche de la surface terrestre. En conséquence, l'intensité du rayonnement solaire peut atteindre environ 1000 W/m^2 dans des conditions météorologiques optimales au niveau de la surface de la terre. Cette réduction est cruciale pour maintenir des conditions fiables pour la vie sur terre en régulant la quantité de rayonnement solaire qui atteint la surface.

Certains rayonnements sont complètement éliminés par le phénomène d'absorption sélective à des fréquences bien précises.

Par exemple l'absorption d'une partie des rayonnements UV par l'ozone (O_3) au niveau de la stratosphère, et l'absorption des rayons infrarouge (IR) par la vapeur d'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2), et le méthane (CH_4), contribue ainsi au piégeage de la chaleur dans l'atmosphère terrestre.

Le phénomène de diffusion se produit lorsque les rayonnements électromagnétiques traversent des particules atmosphériques telles que les aérosols et la poussière.

Contrairement à l'absorption sélective, où les rayonnements sont complètement absorbés, lors de la diffusion, ceux-ci perdent seulement une partie de leur énergie et changent de direction, créant ainsi ce que l'on appelle un rayonnement diffus.

Il existe différents types de diffusion, cependant, nous nous contentons de mentionner et de définir brièvement les plus fréquents.

➤ **La diffusion de Rayleigh :**

Cette diffusion se produit lorsqu'une radiation rencontre une particule dont la taille est inférieure à sa longueur d'onde (Rayon $r \ll \lambda$). Ce phénomène explique pourquoi le ciel est bleu, car les molécules de l'atmosphère terrestre diffusent plus efficacement les courtes longueurs d'onde de la lumière (bleu et violet) que les longues (rouge), et puis notre vision est plus sensible au bleu que le violet.

➤ **La diffusion de Mie :**

La dispersion de Mie se produit lorsque des particules telles que la poussière ou les particules de pollution (aérosols) ont un diamètre égal ou supérieur à la longueur d'onde de la lumière incidente. Contrairement à la dispersion de Rayleigh, laquelle est plus sensible à la longueur d'onde de la lumière, la dispersion de Mie dépend principalement de la quantité d'aérosols présents dans l'air et de la distance optique parcourue par la lumière à travers cet air.

Lorsqu'on parle de réflexion, on désigne la proportion du rayonnement solaire incident qui est complètement réfléchi vers l'espace par l'atmosphère, bien que la totalité de l'énergie réfléchi par l'atmosphère et le sol terrestre s'appelle albédo.

En effet la valeur de l'albédo global de la terre représente 28% de la constante solaire, ce qui signifie que près d'un tiers du rayonnement solaire incident est renvoyé dans l'espace par divers processus de réflexion. Cela inclut la réflexion par les nuages, la glace, la neige, les surfaces réfléchissantes comme les déserts ou les surfaces d'eau, ainsi que par l'atmosphère elle-même.

I.7. La Masse d'Air AM :

La masse d'air, ou air mass en anglais, représente la quantité d'atmosphère que les rayons solaires traversent avant d'atteindre le sol, comparée à l'épaisseur traversée verticalement depuis le lieu d'observation, en d'autres termes c'est le rapport entre l'épaisseur traversée par le rayonnement direct (droite pointée vers le soleil) et l'épaisseur verticale de l'atmosphère.

Ce concept dépend beaucoup plus de la hauteur apparente noté h qui représente l'angle compris entre le plan horizontal situé sous nos pieds et la droite pointée vers le soleil.

A l'aide des points O, A, et B et cet angle h représentés sur la figure I.12 on écrit la longueur du trajet du soleil à travers l'atmosphère comme suit :

$$\sin(h) = \frac{OA}{OB}$$

OA épaisseur verticale de l'atmosphère.

OB épaisseur traversée par le rayonnement incident compris entre la verticale et le plan horizontal.

Donc on déduit que la masse d'air $A_{\frac{OB}{OA}} = \frac{1}{\sin(h)}$

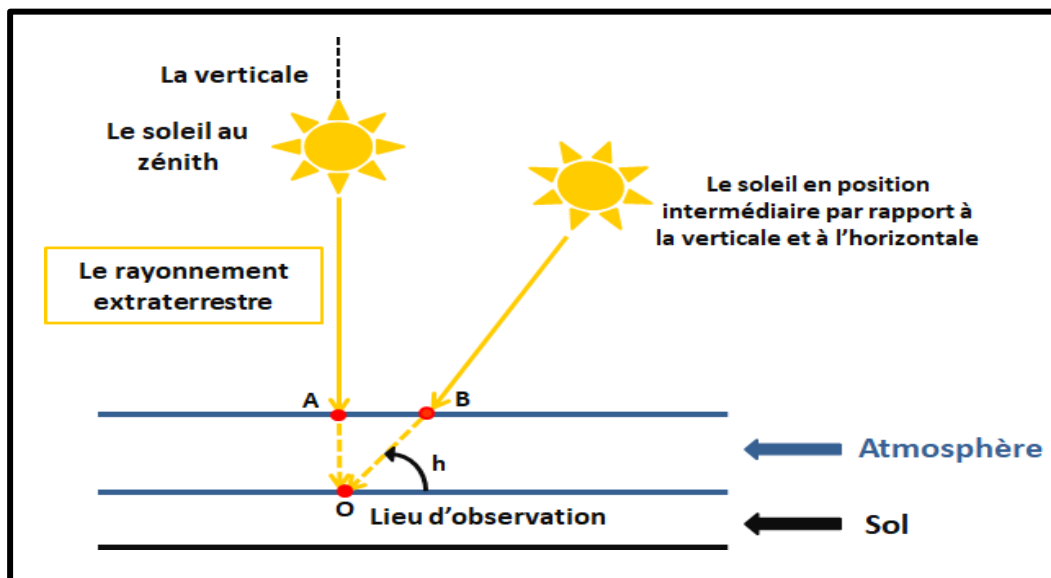


Figure I.12 : Définition de la Masse d'Air (AM)

Les différentes mesures de la Masse d'Air :

AM0 : désigne le rayonnement solaire extraterrestre (hors atmosphère).

AM1 : Le soleil au zénith (au niveau de la mer).

AM1.5 : Le soleil à 41.82° .

AM2 : Le soleil à 30° .

La figure I.13 présente les différentes mesures

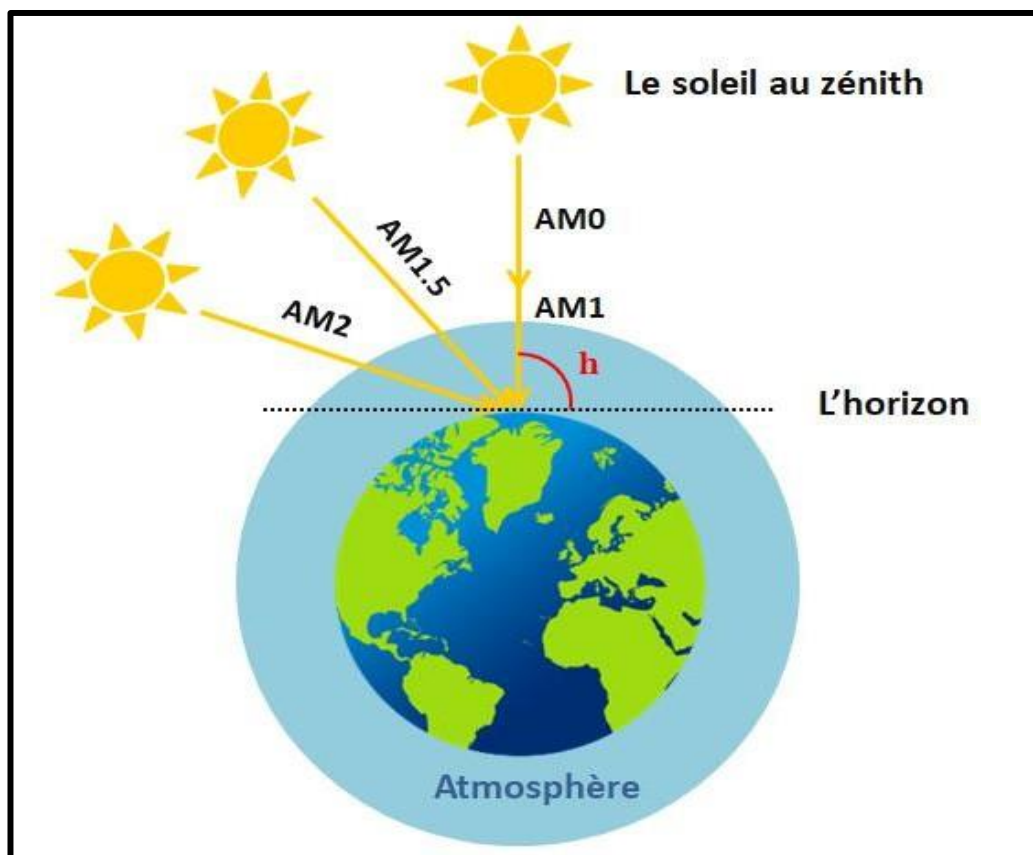


Figure I.13 : illustrant les différentes mesures d'AM les plus utilisées

Contrairement à l'irradiation solaire extra-terrestre, le rayonnement à la surface du sol se compose de deux parties :

Le rayonnement direct S : C'est le rayonnement solaire qui atteint directement la surface de la terre sans être diffusé ou réfléchi. Il a suivi une trajectoire rectiligne depuis le soleil jusqu'à la surface terrestre.

Le rayonnement diffus D : Ce rayonnement résulte de la dispersion du rayonnement direct par les molécules d'air, les particules d'aérosols et les nuages dans l'atmosphère. Il atteint la surface terrestre après avoir été diffusé dans toutes les directions.

Le rayonnement global G: c'est la somme du rayonnement directe et du rayonnement diffus.

$$G=S+D[\text{W/m}^2]$$

Le rayonnement global représente l'ensemble du rayonnement solaire reçu par une surface horizontale au sol comme indiqué dans la Figure I.14.

Remarque :

Le rayonnement réfléchi par la surface (albédo) n'est pas inclus dans cette définition car l'albédo concerne le rayonnement déjà arrivé au sol et réfléchi ensuite. Il s'agit d'une mesure distincte de la quantité de rayonnement renvoyée par la surface terrestre.

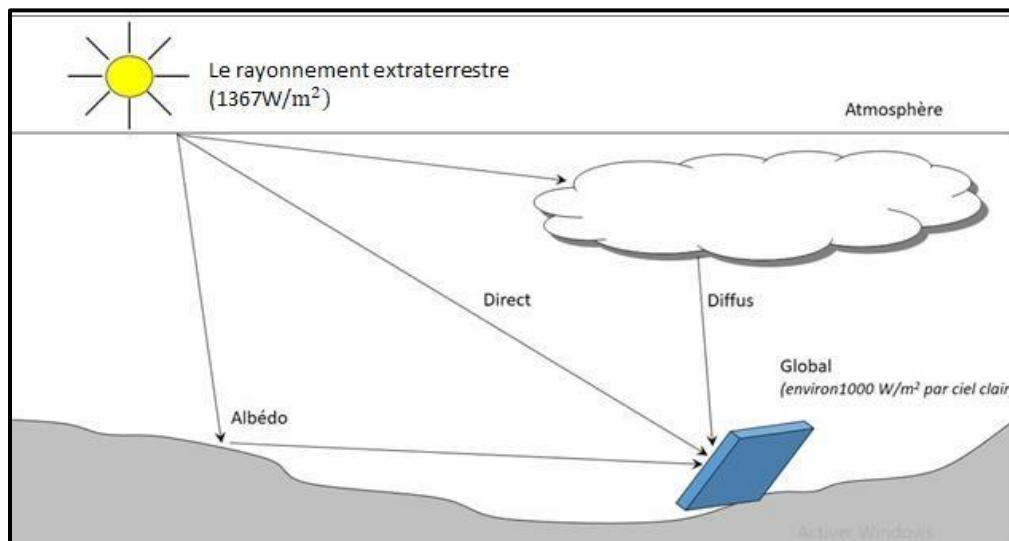


Figure I.14 : Composantes du rayonnement solaire au sol.

Chapitre II :
Solaire photovoltaïque

Solaire photovoltaïque

I. Définition

Le terme « photovoltaïque » peut désigner le phénomène physique (l'effet photovoltaïque découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839) ou la technologie associée.

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire au moyen d'une cellule photovoltaïque. Schématiquement, un photon de lumière incidente permet sous certaines circonstances de mettre en mouvement un électron, produisant ainsi un courant électrique.

Les cellules photovoltaïques sont fabriquées avec des matériaux semi-conducteurs principalement produits à partir de silicium (« silicon » en anglais). Lorsqu'ils sont soumis à l'action de la lumière, des électrons sont éjectés de ces matériaux et ils circulent dans un circuit fermé, produisant alors de l'électricité.

L'énergie solaire est, à l'échelle humaine, inépuisable et disponible en très grande quantité. Ce processus ne nécessite aucun cycle thermodynamique intermédiaire, c'est-à-dire que le rayonnement est directement converti en électricité sans utilisation intermédiaire de la chaleur (contrairement au solaire thermodynamique).

L'industrie du photovoltaïque se tourne aujourd'hui vers le développement de techniques qui utiliseront à terme beaucoup moins de matière ou des matériaux moins onéreux. Le solaire à concentration, le dépôt sur ruban, les panneaux à couches fines et les matériaux organiques constituent notamment des axes de recherche et d'innovation future.

Enfin, la recherche sur le stockage d'électricité est un enjeu central pour accompagner la croissance très rapide du solaire photovoltaïque. Ce thème transversal est particulièrement sensible pour cette filière puisque le caractère compétitif de cette technologie dépendra également de sa capacité à pouvoir adapter sa production pour répondre aux besoins ponctuels d'électricité.

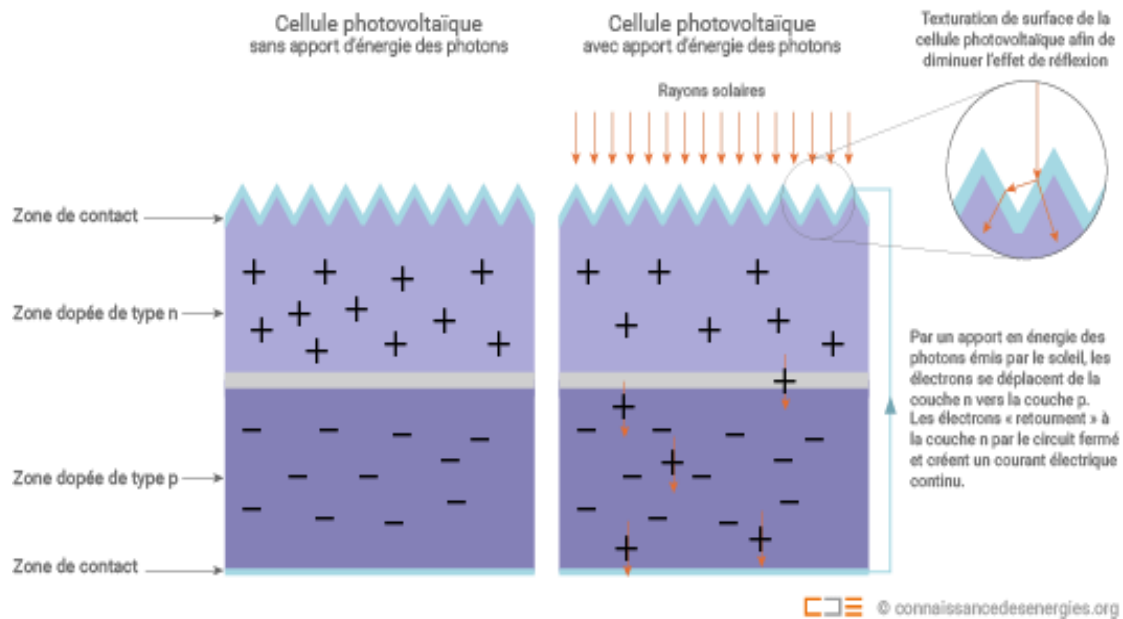
II. Fonctionnement de la technologie

II.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques exploitent l'effet photoélectrique pour produire du courant continu par absorption du rayonnement solaire. Cet effet permet aux cellules de convertir directement l'énergie lumineuse des photons en électricité par le biais d'un matériau semi-conducteur transportant les charges électriques.

Une cellule photovoltaïque est composée de deux types de matériaux semi-conducteurs, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit d'électrons. Ces deux parties sont respectivement dites « dopées » de type n et de type p. Le dopage des cristaux de silicium consiste à leur ajouter d'autres atomes pour améliorer la conductivité du matériau.

1. Un atome de silicium compte 4 électrons périphériques. L'une des couches de la cellule est dopée avec des atomes de phosphore qui, eux, comptent 5 électrons (soit 1 de plus que le silicium). On parle de dopage de type n comme négatif, car les électrons (de charge négative) sont excédentaires.
2. L'autre couche est dopée avec des atomes de bore qui ont 3 électrons (1 de moins que le silicium). On parle de dopage de type p comme positif en raison du déficit d'électrons ainsi créé.
3. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau n diffusent dans le matériau p.



Fif II.1 : cellule photovoltaïque

En traversant la cellule photovoltaïque, les photons arrachent des électrons aux atomes de silicium des deux couches n et p. Les électrons libérés se déplacent alors dans toutes les directions. Après avoir quitté la couche p, les électrons empruntent ensuite un circuit pour retourner à la couche n.

Ce déplacement d'électrons n'est autre que de l'électricité.

II.2. État des lieux des technologies traditionnelles

Le solaire photovoltaïque non concentré

Les technologies à base de silicium constituent plus de 95% du marché photovoltaïque mondial(1).

- **Les cellules monocristallines**, filière historique du photovoltaïque. Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération. Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en une seule pièce. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires ».

- **Les cellules polycristallines**, élaborées à partir d'un bloc de silicium composé de cristaux multiples. Elles ont un rendement plus faible que les cellules monocristallines mais leur coût de production est moindre.

Des avancées technologiques permettent aujourd'hui de produire des **cellules policristallines à couches minces** afin d'économiser le silicium. Ces cellules ont une épaisseur de l'ordre de quelques micromètres d'épaisseur.

Au cours des dix dernières années, le rendement moyen d'un panneau photovoltaïque à base de silicium est passé d'environ 14% au début des années 2010 à près de 20% selon l'AIE(2).

II.3. L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque, découvert en 1839 par le physicien Edmond Becquerel, consiste à convertir la lumière provenant d'une source lumineuse telle que le soleil en énergie électrique. Cette transformation s'opère à l'aide d'un dispositif électronique appelé cellule photovoltaïque, fabriqué à partir de semi-conducteurs, le matériau le plus adapté pour ce type d'applications.

Les semi-conducteurs possèdent des propriétés électroniques uniques qui contrastent nettement avec celles des autres matériaux.

Ils ont une conductivité électrique intermédiaire entre celle des isolants et des conducteurs, ce qui signifie qu'ils peuvent être modifiés pour conduire ou ne pas conduire l'électricité sous certaines conditions. De plus, ils offrent la possibilité de créer une jonction PN en y introduisant des impuretés (dopage), et ils permettent de générer des paires électrons- trous en absorbant la lumière de manière efficace.

Toutes ces conditions sont indispensables pour que l'effet photovoltaïque ait lieu, et elles ne peuvent être assurées que par les semi-conducteurs.

II.4. Les différentes étapes de la conversion photovoltaïque :

A. L'absorption de la lumière dans le matériau :

Dans un matériau photovoltaïque, une partie de la lumière absorbée est convertie en énergie électrique

Il est donc essentiel que le matériau soit capable d'absorber la lumière visible, car c'est cette lumière, provenant du soleil ou de sources artificielles, que nous voulons transformer.

Il est également important de réduire les pertes optiques causées par la réflexion ou la transmission pour maximiser l'efficacité.

Lorsqu'un matériau absorbe de la lumière, l'énergie diminue de manière exponentielle, car la quantité de lumière restante à absorber diminue à mesure qu'elle pénètre dans le matériau. Si E_{inc} est l'énergie incidente, l'énergie restante à une profondeur (d) s'écrit :

$$E = E_{inc} \cdot e^{-\alpha \cdot d}$$

Donc l'énergie absorbée dans l'épaisseur d est égale à :

$$E_{abs} = E_{inc} - E_{inc} \cdot e^{-\alpha \cdot d} = E_{inc}(1 - e^{-\alpha \cdot d})$$

Le coefficient d'absorption α dépend du matériau et de la longueur d'onde de l'énergie incidente. Il s'exprime en cm^{-1} , avec l'épaisseur d exprimée en cm.

Les cellules photovoltaïques en silicium cristallin et en silicium amorphe ont des propriétés distinctes en termes de transmission et d'absorption de la lumière. Les cellules en silicium cristallin, plus épaisses (0,2 μm), ne permettent pas la transmission de la lumière.

Les cellules en silicium amorphe, plus fines (moins de $1 \mu\text{m}$), permettent une certaine transmission, surtout dans le rouge du spectre où l'absorption est moindre.

Pour améliorer l'absorption, on utilise des électrodes arrières réfléchissantes et des couches rugueuses en surface diffusant la lumière, augmentant les passages multiples dans les couches actives.

La réflexion de la lumière dépend des indices de réfraction des matériaux. Pour minimiser les pertes par réflexion, il est convenable d'utiliser des couches antireflets permettant une absorption efficace.

B. Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques :

Le transfert d'énergie des photons aux charges électriques se produit dans les matériaux photovoltaïques qui n'absorbent que les photons ayant suffisamment d'énergie pour faire passer les électrons de la bande de valence (BV) vers la bande de conduction (BC), en traversant la bande interdite (gap optique, E_g).

Ce processus crée des paires électrons-trous, permettant ainsi de générer un courant électrique si on arrive à attirer les électrons vers l'extérieur (hors du matériau semi-conducteur). Ce phénomène, appelé photoconductivité, est caractéristique des semi-conducteurs.

Les semi-conducteurs ont des électrons libérables et une bande interdite modérée, franchissable par des électrons excités.

En revanche, dans les matériaux isolants, les électrons sont fortement liés et la bande interdite est trop large pour être franchie avec l'énergie transportée par les photons.

Dans les conducteurs électriques, la forte densité d'électrons libres et l'absence de gap optique (les bandes de valence et de conduction se chevauchant) empêchent ce phénomène.

Si un photon a une énergie inférieure à celle du gap optique du matériau, il n'est pas absorbé.

Si l'énergie du photon correspond à celle du gap optique, il est absorbé et permet à un électron de passer de la BV à la BC.

Si le photon possède une énergie supérieure à celle du gap optique, il est également absorbé et génère une paire électron-trou.

Toutefois, l'excédent d'énergie est dissipé sous forme de chaleur par un processus de

désexcitation spontanée, ramenant l'énergie à E_g .

$$E_g = \frac{h \times c}{\lambda}$$

Ce qui se traduit par : $E_g(\text{en eV}) = \frac{1.24}{\lambda(\text{en } \mu\text{m})}$

E_g : Énergie gap du matériau

h : Constante de Planck $6.62 \times 10^{-34} \text{ J.s} = 4.1375 \times 10^{-15}$

c : Célérité : $3 \times 10^8 \text{ m/s} = 3 \times 10^{14} \mu\text{m/s}$

λ : Longueur d'onde en μm

Pour convertir efficacement l'énergie lumineuse en électricité, il faudrait que tous les photons aient la même énergie et que le matériau ait un gap optique correspondant exactement à cette énergie, ce qui est difficile à réaliser.

Pour le silicium cristallin, le gap optique est de $E_g = 1,1 \text{ eV}$. Un photon possédant cette énergie a une longueur d'onde de $1,13 \mu\text{m}$ (dans le proche infrarouge).

Pour le silicium amorphe, $E = 1,77 \text{ eV}$. Un photon ayant cette énergie est en lumière rouge, avec une longueur d'onde de 700 nm ($= 0,7 \mu\text{m}$).

Tous les photons d'énergie égale ou supérieure à ces seuils, et donc de longueurs d'onde égales ou inférieures, sont opérationnels pour la conversion photovoltaïque. [6]

C. Séparation de charges (électrons et trous) :

La création de paires électron-trou au sein du matériau photovoltaïque n'est pas suffisante pour générer de l'électricité, puisqu'il y a de fortes chances pour que les électrons se recombinent avec les trous, autrement dit les électrons libérés retrouveraient leur état initial à la périphérie de leur atome, produisant par conséquent de l'énergie thermique (chaleur) plutôt que de l'électricité.

Pour remédier à ce problème de recombinaison et favoriser une conversion photovoltaïque efficace, il est primordial de recourir au dopage. En effet le dopage est un procédé qui consiste à introduire volontairement des impuretés dans les deux côtés du matériau semi-conducteur. Une partie est dopée par des éléments excédentaires en électrons par rapport au semi-conducteur de base (substrat), ce qui crée une zone de type (N) juxtaposée avec une autre partie dopée par des éléments déficitaires en électrons, formant ainsi une zone de type (P).

C'est à la frontière de ces deux régions que se crée une jonction PN accompagnée d'un champ électrique interne notée E_{int} qui va entraîner les charges négatives d'un côté et les charges positives de l'autre côté.

Dans les deux prochains titres nous allons expliquer en détail le dopage et la jonction PN, avec un exemple où le silicium sera considéré comme semi-conducteur de base.

D. Collecte de charges :

Les électrons libérés par l'absorption de la lumière sont repoussés par le champ électrique de la jonction PN vers la zone N, où ils sont collectés par une électrode en grille métallique placée à la surface, appelée contact avant. De même, les trous générés sont attirés vers la zone P, où ils sont collectés par une électrode métallique située à l'arrière, appelée contact arrière. Ces deux électrodes sont reliées par un circuit extérieur, permettant aux électrons de circuler de la zone N vers la zone P. Ce mouvement d'électrons constitue un courant électrique continu.

a. Le dopage du silicium :

i. Le dopage de type N :

Le dopage de type N consiste à introduire des éléments donneurs dans le matériau semi-conducteur. Dans le cas du silicium ayant 4 électrons périphériques, nous utiliserons des éléments qui possèdent 5 électrons dans leur couche externe, tels que le phosphore(p), et l'arsenic(As). Nous considérons dans cet exemple que nous avons introduit du phosphore comme impureté ; il y aura alors un électron par atome de phosphore qui ne pourra pas se lier avec les électrons des atomes de silicium voisins, créant ainsi un excédent de charges négatives dans le cristal. Le matériau sera donc potentiellement « donneur » d'électrons, disponible pour la conduction électrique, et le silicium ainsi dopé est appelé silicium de type N (Figure II.2).

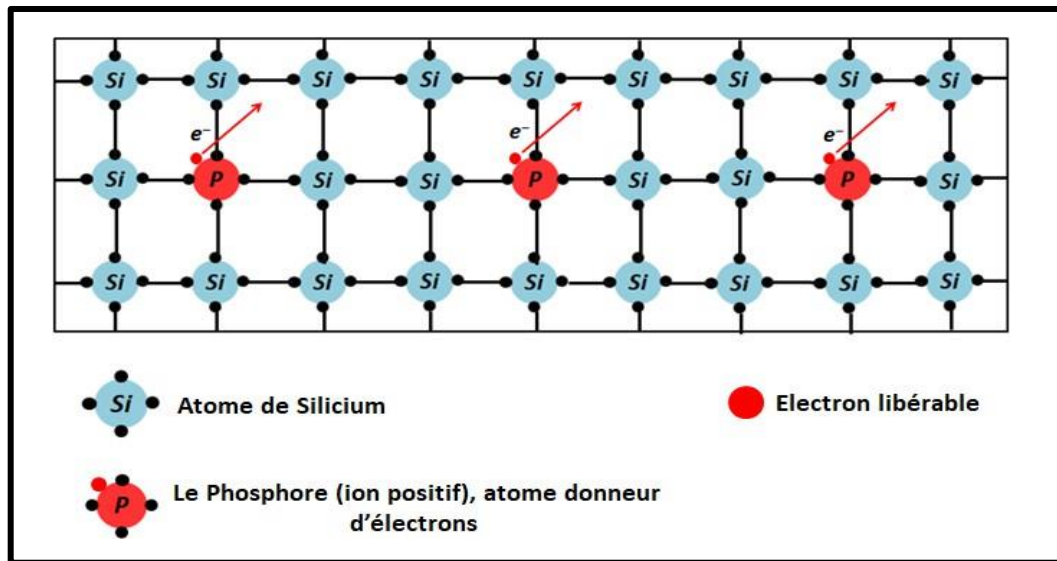


Figure II.2 : Dopage de Silicium de type N

ii. **Le dopage de type P :**

Par symétrie, on peut également doper le silicium avec du bore (B), un élément trivalent possédant trois électrons de valence. Lorsqu'un atome de bore est introduit dans le réseau cristallin du silicium, il tente de compléter sa couche de valence en captant un électron d'un atome de silicium voisin. Ce processus crée un trou, qui est considéré comme une charge positive. Ce phénomène se répète pour chaque atome de bore introduit dans le silicium, créant un excès de trous dans le matériau. Ces trous, agissant comme des porteurs de charge positive, rendent le matériau dopé, un accepteur d'électrons. Ainsi, le silicium dopé de cette manière est appelé silicium de type P (Figure II.3).

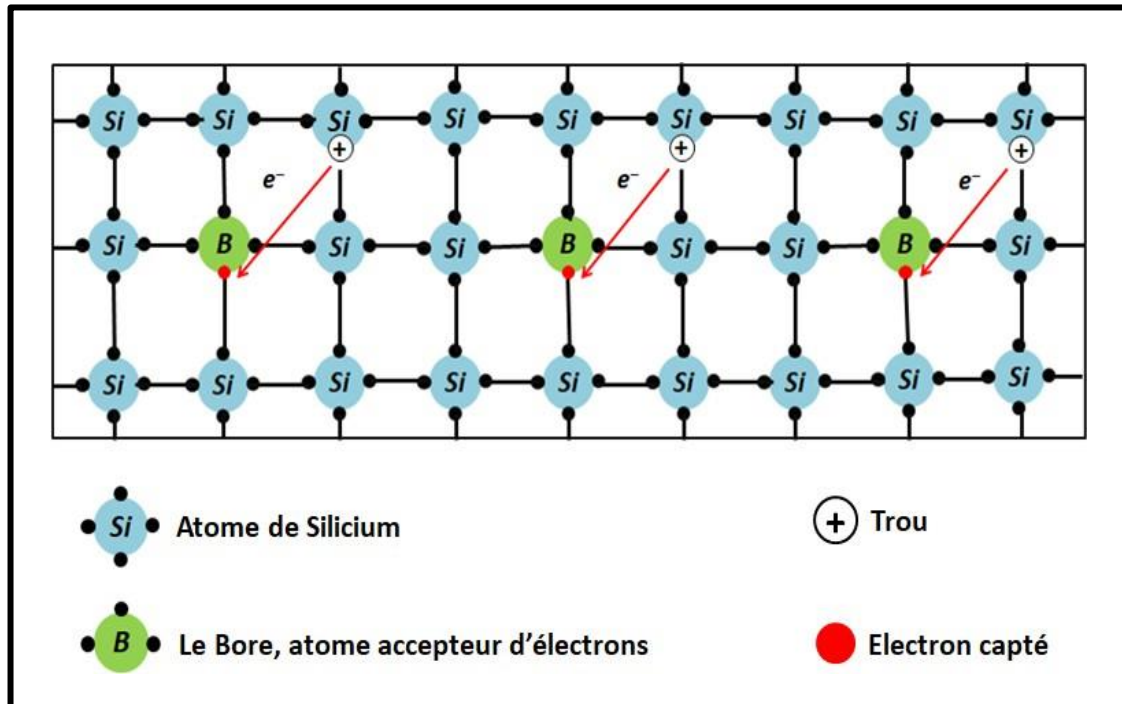


Figure II.3 : Dopage de Silicium de type P

Jonction PN :

Lorsque deux régions d'un semi-conducteur sont dopées différemment pour former une jonction PN, un processus complexe se déroule à l'interface de ces régions.

Dans la région dopée de type N, les électrons excédentaires ont tendance à migrer vers la région dopée de type P, laissant derrière eux des ions positifs.

Simultanément, les trous, résultant du manque d'électrons dans la région de type P, migrent vers la région de type N, laissant derrière eux des ions négatifs.

Cette migration crée une redistribution des charges, donnant naissance à une zone dépourvue de porteurs de charge mobiles, appelée zone de charge d'espace ou en encore zone de déplétion (jonction PN) comme le montre la Figure II.4.

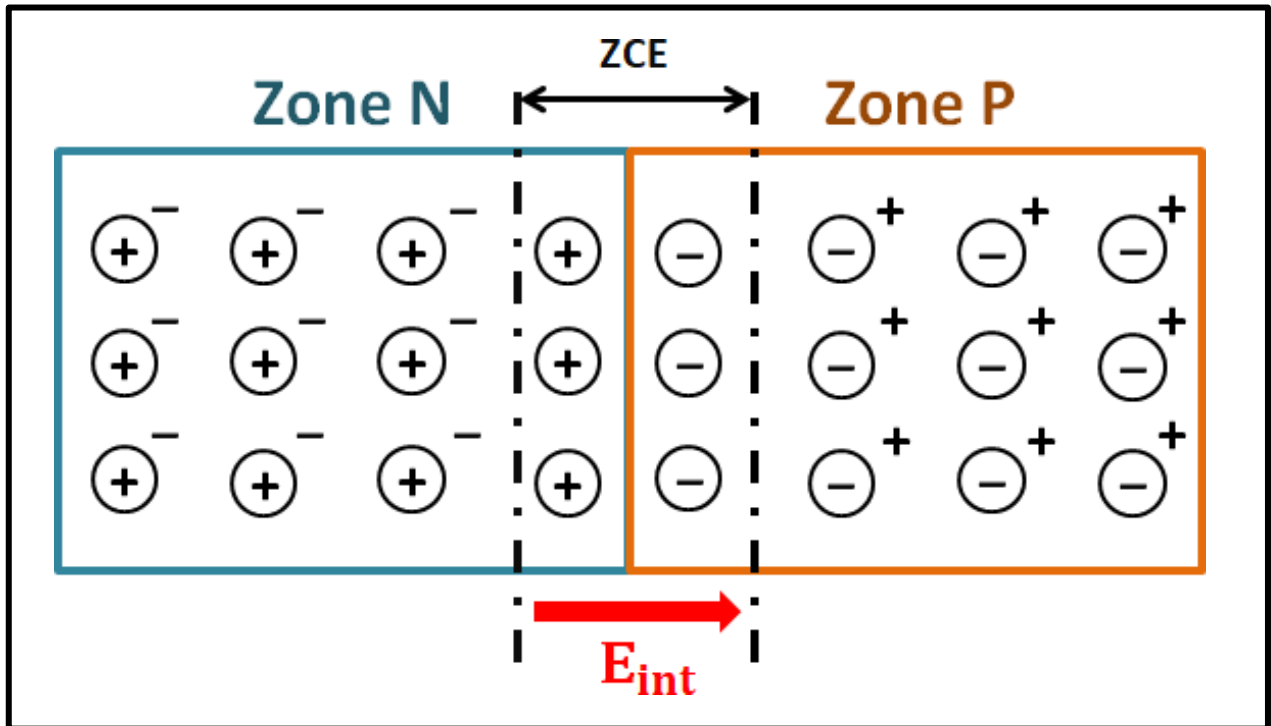


Figure II.4 : Structure de la jonction PN

Cette zone de déplétion est caractérisée par la présence d'un champ électrique, résultant de la séparation spatiale des charges positives et négatives. Ce champ électrique induit une différence de potentiel entre les deux côtés de la jonction PN, créant ainsi une barrière de potentiel. Cette barrière de potentiel agit comme un obstacle électrique s'opposant au mouvement des porteurs de charge à travers la jonction.

Au fur et à mesure que le champ électrique continue à se renforcer, il atteint un certain voltage où il devient suffisamment puissant pour bloquer totalement le passage des porteurs de charge de part et d'autre.

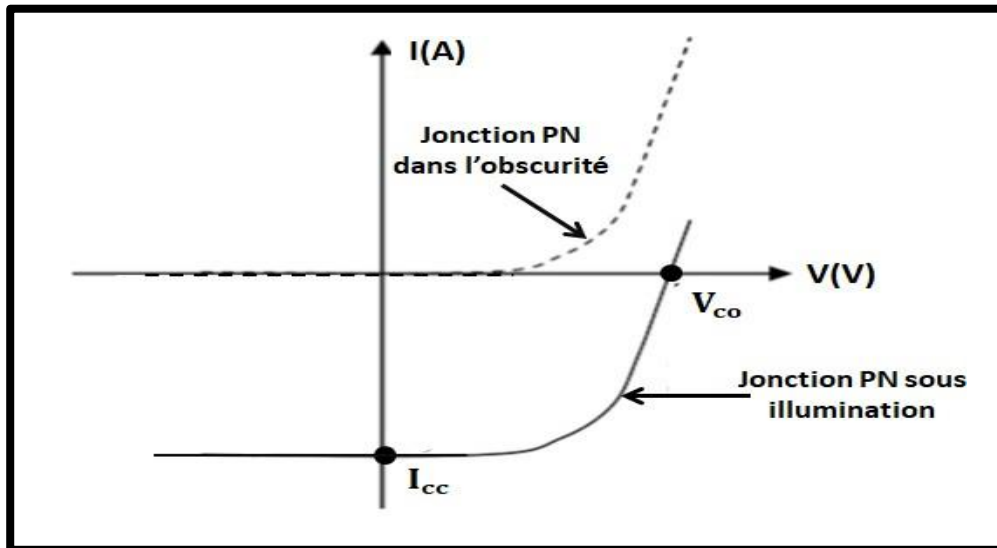
Lorsqu'une photopile, qui utilise une jonction PN similaire à une diode, est exposée à la lumière, elle génère un courant appelé photo courant.

Ce courant dépend directement de la quantité de lumière incidente, car les photons absorbés créent des paires électron-trou au sein du matériau semi-conducteur.

Ce phénomène, également observé dans les photodiodes, permet de désigner ces dispositifs par le même terme en certain contexte.

II.5. Caractéristiques de la cellule PV :

II.5.1. Caractéristique courant-tension I(V) :



**Figure II.5 : caractéristiques courant-tension d'une diode au silicium
Dans l'obscurité et sous illumination**

La caractéristique courant-tension d'une photopile sous illumination se déplace par rapport à celle d'une diode classique en raison de ce photocourant.

Le courant de court-circuit (I_{cc}) est le courant généré lorsque la photopile est illuminée à tension nulle, c'est-à-dire en court-circuit.

Inversement, la tension de circuit ouvert (V_{co}) est la tension atteinte lorsque le courant est nul, indiquant un circuit ouvert.

Ces paramètres, I_{cc} et V_{co} sont cruciaux pour caractériser la performance d'une cellule photovoltaïque et comprendre son efficacité à convertir la lumière en énergie électrique.

Pour déterminer la courbe caractéristique de cette cellule solaire, nous partons de la caractéristique connue d'une diode au silicium (jonction PN dans l'obscurité, **figure II.5** (courbe en pointillés)), qui s'écrit :

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{V}{nV_t}} - 1 \right)$$

Où d'une manière simplifiée

$$I_D = I_S \left(\frac{V}{V_t} \right) \text{ Pour } V \gg V_t$$

Avec :

I_D : Le courant de la diode en (A)

V : Tension aux bornes de la cellule photovoltaïque en (V)

V_t : Potentiel thermique = $k_B T / q = 26 \text{ mV}$ à 300K

$k_B = 1.38 \times 10^{-23}$ en (J/K) Constante de Boltzmann

$q = 1.602 \times 10^{-19}$ en (Coulomb) Charge de l'électron

T : Température absolue en (K)

n : Facteur d'idéalité (0: diode idéale, 1 : pour le Si ou le Ge)

- La cellule solaire idéale sous un éclairement :

Le courant de court-circuit (ICC) (ou photocourant) I_{ph} est proportionnel à l'éclairement direct G^* incident sur la cellule :

$$I_{ph} = \alpha S G^*$$

α : Facteur de réponse spectral ou coefficient d'efficacité de la cellule en (A/W), $\alpha = 0.35 \text{ A/W}$ pour le Si cristallin

S : la surface de la cellule en m^2 .

Sous l'éclairement, la cellule solaire PV présente la particularité de pouvoir fonctionner comme étant un générateur d'électricité, en délivrant un courant électrique continu.

En effet, ce comportement électrique de la cellule n'est autre que celui d'une diode sous un éclairement

On considère généralement le modèle simple suivant :

$$I_p = I_{ph} - I_D$$

Avec :

I_p : Le courant de la photopile en (A).

I_D : Le courant de la diode en (A).

I_{ph} : Le photocourant en (A).

$$I_p = I_{ph} - I_D = \alpha S G^* - I_S (e^{\frac{V}{n V_t}} - 1)$$

A l'aide de cette équation, nous pouvons quantifier les paramètres suivants :

- ✓ **Tension de circuit-ouvert VCO**, lorsque le courant est nul ($I_p=0$)

$$V_{CO} = n V_t \ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_S} \right)$$

Ou, pour $I_{CC} \gg I_S$:

$$V_{CO} = n V_t \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_S} \right)$$

- ✓ **Courant de court-circuit I_{CC}** , lorsque la tension est nulle ($V_p=0$)

$$I_{CC} = I_{ph}$$

- La cellule solaire réelle sous un éclairement :

Une photopile comporte en réalité une résistance série R_S et une résistance en parallèle R_{sh} , ou shunt. Nous pouvons compléter le schéma équivalent de la cellule solaire (Figure II.6) en ajoutant ces deux résistances afin de prendre en compte les pertes internes.

1. Résistance série R_S : Elle représente la résistance série qui tient compte des pertes ohmiques du matériau, des métallisations et du contact métal/semi-conducteur. R_S est en série avec la source de courant photovoltaïque.

2. Résistance en parallèle, ou shunt R_{sh} : Elle représente une résistance parallèle (ou résistance de fuite) provenant de courants parasites entre le dessus et le dessous de la cellule, notamment par le bord, et à l'intérieur du matériau par des irrégularités ou impuretés. R_{sh} est en parallèle avec la source de courant photovoltaïque.

L'équation de la caractérisation courant-tension devient alors :

$$I_p = I_{ph} - I_D = \alpha S G^* - \frac{V_p \pm R_S I_p}{n V_t} - 1 \Big) \frac{V_p + R_S I_p}{R_{sh}}$$

Pour trouver I_{cc} , en prenant : $V_p=0$

$$I_{cc} = I_{ph} - I_S \times \left(e^{\frac{R_S I_p}{n V_t}} - 1 \right) - \frac{R_S I_{cc}}{R_{sh}}$$

$$I_{cc} = \frac{I_{ph} - I_S \times \left(e^{\frac{R_S I_p}{n V_t}} - 1 \right) - \frac{R_S I_{cc}}{R_{sh}}}{1 \pm \frac{R_S}{R_{sh}}}$$

La résolution de cette équation n'est pas possible analytiquement ; néanmoins, du point de vue pratique, nous acceptons pour la majorité des cellules solaires l'approximation

suivante : $(R_s \ll R_{sh}) \Rightarrow \frac{1 + R_s I_p}{R_{sh}} \approx 1$.

Par conséquent, le courant de court-circuit de la cellule devient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \times (e^{\frac{R_s I_p}{n V_t}} - 1)$$

Dans la plupart des cas, il est possible d'appliquer la célèbre approximation suivante :

$$I_{cc} \gg I_s \Rightarrow I_{cc} \approx I_{ph}$$

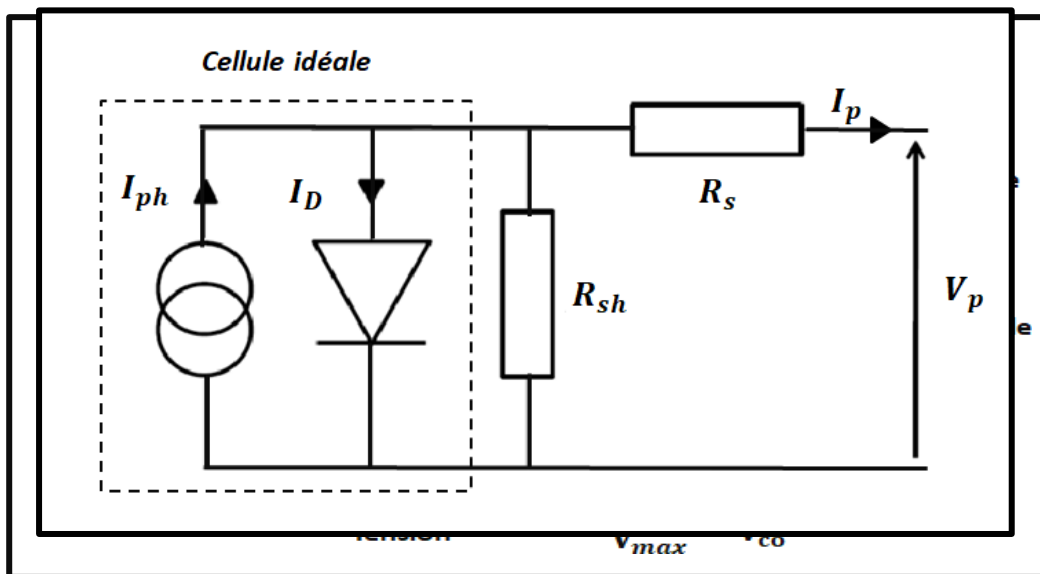


Figure 11.6 : schéma équivalent d'une cellule solaire

✓ Puissance maximale de la cellule P_{max} :

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque, également appelée puissance crête (PC), représente la puissance électrique maximale que la cellule peut générer dans des conditions de test standardisées (un rayonnement solaire $G^* = 1\,000\text{ W/m}^2$, un spectre solaire AM 1,5 et une température ambiante $T = 25\text{ °C}$). Sur le graphique représentant la caractéristique courant-tension $I(V)$ (**Figure I.20**), le point correspondant à la puissance maximale est déterminé par le produit de la tension maximale (V_{max}) et du courant maximal (I_{max}), ce qui donne la plus grande valeur de puissance (P_{max}). Mathématiquement, cela peut être exprimé comme :

$$P_{max} = I_{max} V_{max}$$

Avec :

P_{max} : La puissance maximale en Watt (W)

I_{max} : Courant à la puissance maximale en (A).

V_{max} : Tension à la puissance maximale en (V).

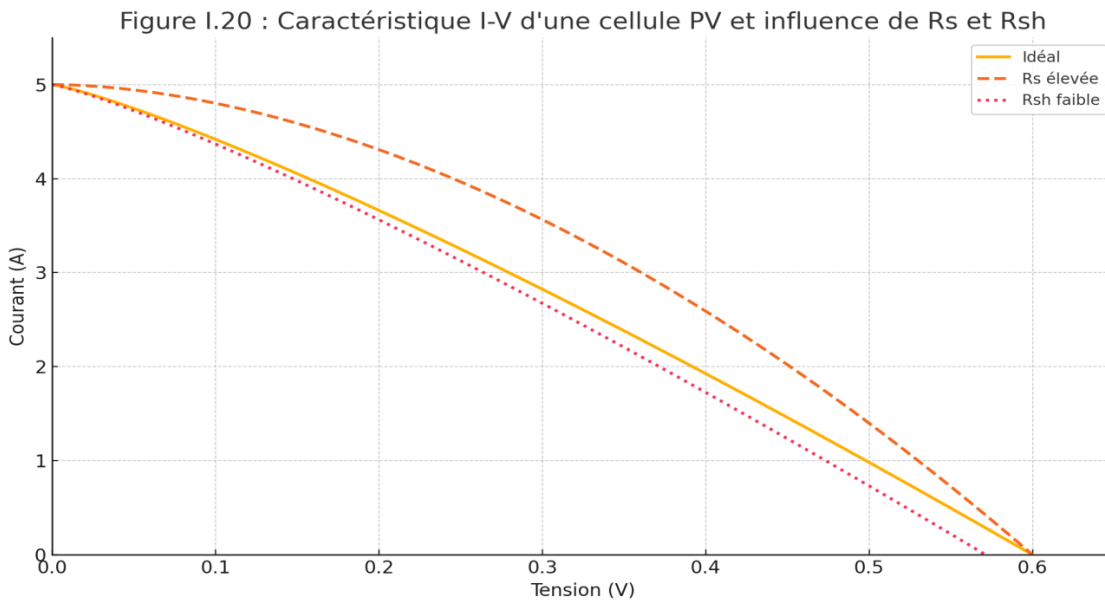


Figure II.7 : les principales caractéristiques de la cellule PV et l'influence des résistances Rsh et Rs sur la caractéristique courant-tension

✓ **Facteur de Forme FF :**

Le facteur de forme d'une cellule solaire, souvent appelé "facteur de remplissage" (ou "Fill factor" en anglais, FF), est une mesure de l'efficacité de la cellule solaire.

Il s'agit du rapport entre la puissance maximale réelle extraite de la cellule et le produit de la tension en circuit ouvert (VCO) et du courant de court-circuit (ICC).

Ce paramètre est crucial car il indique à quel point la cellule solaire peut convertir la lumière en électricité de manière efficace. Il est donné par la formule suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} I_{cc}} = \frac{V_{max} I_{max}}{V_{co} I_{cc}}$$

Le facteur de forme est compris entre 0 et 1 (ou exprimé en pourcentage entre 0 et 100 %). Plus le facteur de remplissage est élevé, plus la cellule solaire est efficace.

Les valeurs typiques pour les cellules solaires en silicium cristallin varient généralement entre 0.7 et 0.85.

✓ **Le rendement de la conversion η :**

Le rendement de conversion η est une mesure de la performance d'une cellule photovoltaïque (PV) à convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique.

Il est défini comme le rapport entre l'énergie électrique maximale P_{max} produite par la cellule et l'énergie solaire incidente reçue $P_{re\c{c}u} (G^* \times S)$. Il est exprimé en pourcentage et est calculé en utilisant la formule suivante :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{re\c{c}u}} \times 100 = \frac{P_{max}}{G^* S} \times 100 = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{G^* S} \times 100$$

Avec :

P_{max} : La puissance électrique maximale de la cellule en (W).

$P_{re\c{c}u}$: La puissance lumineuse incidente sur la surface de la cellule solaire en (W).

S : La surface de la cellule en (m^2).

G^* = 1 000 W/ m^2 l'éclairement direct incident sur la surface de la cellule,

FF : Le facteur de Forme en (%).

V_{co} : La tension de circuit-ouvert en (V).

I_{cc} : Le courant de court-circuit en (A).

Ce rendement est souvent mesuré dans les conditions de test standard STC.

II.5.2. L'influence de l'éclairement et de la température sur la caractéristique I(V) :

II.5.2.1. L'influence de l'éclairement G^* :

L'éclairement solaire a une influence significative sur le courant de court-circuit (I_{cc}), ce qui se répercute directement sur les performances des cellules photovoltaïques.

En effet, le rendement délivré par ces cellules est proportionnel au courant de court-circuit.

Ainsi, toute variation de l'éclairement solaire impacte directement la production d'électricité de ces cellules comme le montre **la figure II.8**

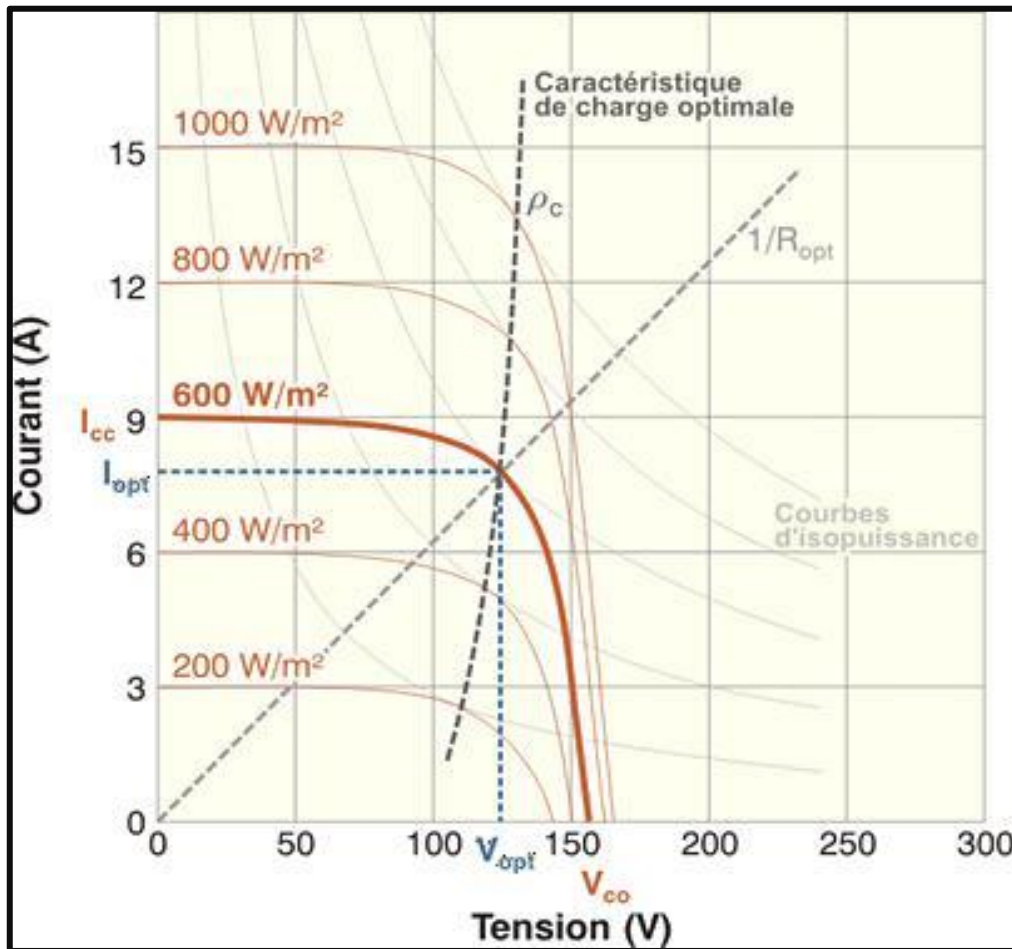


Figure II.8 : influence de l'éclairement sur les grandeurs V_{co} et I_{cc} de la cellule.

Le courant de court-circuit (I_{cc}) :

Le courant de court-circuit est directement proportionnel à l'intensité lumineuse incidente. Plus l'éclairement est intense, plus le nombre de photons frappant la surface de la cellule solaire est élevé, ce qui génère plus de paires électron-trous. Cela augmente le courant de court-circuit.

$$I_{cc} \propto G^*$$

La tension de circuit-ouvert V_{CO} :

L'accroissement de l'éclairement provoque une légère augmentation de la tension de circuit ouvert V_{co}

II.5.2.2. L'influence de la température T :

La température T est un facteur crucial qui influence le comportement d'une cellule solaire. Elle affecte principalement la tension de circuit ouvert (VCO), et engendre également une augmentation légère du courant de court-circuit comme le montre **la figure II.9**.

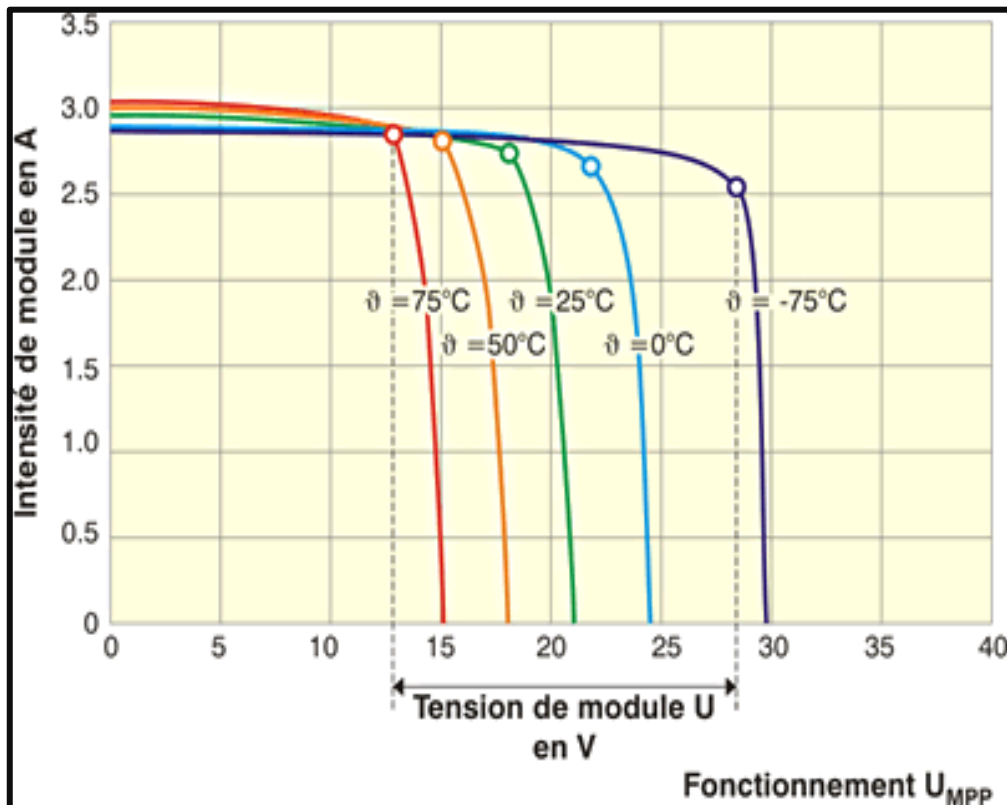


Figure II.9 : Influence de la température sur les grandeurs I_{cc} et V_{co} de la cellule PV

La tension de circuit ouvert VCO :

VCO décroît de façon notable à mesure que la température s'élève. Ce phénomène s'explique par la diminution de la bande interdite du matériau semi-conducteur avec l'augmentation de la température. En conséquence, la quantité d'énergie nécessaire pour exciter les électrons et les porter dans la bande de conduction diminue, ce qui entraîne une baisse de la tension de circuit-ouvert.

Le courant de court-circuit ICC :

L'augmentation de la température provoque une augmentation légère du courant du court-circuit ICC, en raison de l'augmentation du nombre de porteurs de charge libres (électrons et trous) engendrée par l'excitation thermique des atomes dans le matériau semi-conducteur.

II.6. Les différents types de cellules photovoltaïques :

La recherche dans le domaine photovoltaïque continue de progresser avec des efforts soutenus pour développer des cellules moins coûteuses et plus efficaces. Plusieurs types de cellules solaires ont été mises au point, notamment celles de la deuxième génération, comme les cellules à couches minces, incluant les cellules CIGS (cuivre-indium-gallium-sélénium) et CdTe (tellure de cadmium), ainsi que celles de la troisième génération, telles que les cellules à pérovskite et les cellules organiques. Cependant, les cellules solaires en silicium cristallin, appartenant à la première génération, dominent actuellement le marché en raison de l'abondance de la matière première nécessaire à leur fabrication et de leur rendement énergétique supérieur, malgré leur coût plus élevé. Pour cette raison, nous allons nous intéresser aux cellules à base de silicium cristallin.

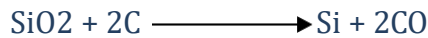
Cellules à base de silicium cristallin :

Les cellules photovoltaïques à base de silicium cristallin constituent la première génération de cellules solaires et se présentent sous deux modèles distincts en fonction de leur structure cristalline. Les cellules multicristallines, également appelées polycristallines, sont constituées de nombreux petits cristaux de tailles, de formes et d'orientations variées. Ces cristaux forment une mosaïque compacte de fragments bleutés, appelés grains, mesurant de quelques millimètres à quelques centimètres. En revanche, les cellules monocristallines sont composées d'un seul cristal qui se répète périodiquement avec la même orientation dans les trois directions de l'espace, ce qui leur confère une structure dépourvue de défauts et une couleur gris bleuté, parfois noire.

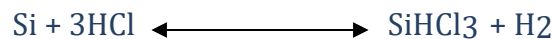
Elaboration du silicium métallurgique :

Le silicium est le deuxième élément le plus abondant sur la Terre après l'oxygène. On ne le trouve pas à l'état pur dans la nature, mais il est souvent associé à d'autres éléments chimiques, notamment l'oxygène, pour former la silice (SiO_2), qui est le composant principal du sable.

Pour fabriquer du silicium pur, on utilise du sable sous forme de quartz cristallisé. Ce quartz subit une réduction dans un four à arc électrique en présence de carbone, selon la réaction chimique suivante :



Chaque année, plus d'un million de tonnes de silicium, dit « métallurgique », sont produites selon ce procédé. Sa pureté atteint environ 98%, les principales impuretés étant l'aluminium et le fer. Ce silicium est principalement utilisé comme composant dans la fabrication de l'aluminium et de l'acier. Une petite proportion de cette production, soit quelques dizaines de tonnes, est ensuite purifiée pour répondre aux exigences de l'industrie électronique. Pour obtenir un matériau de pureté suffisante pour la fabrication de composants électroniques dit silicium de qualité électronique, on utilise le procédé Siemens, où le silicium réagit avec l'acide chlorhydrique pour former du trichlorosilane :



Cette réaction étant réversible, elle permet également de récupérer le silicium après une purification, qui est effectuée par distillation fractionnée du trichlorosilane.

Ce silicium polycristallin obtenu, pur à 99.999% n'est pas le même que celui que l'on emploie dans les modules dits polycristallins, car les grains sont trop fin.

II.6.1. Cellules monocristallines :

Les méthodes de fabrication des monocristaux sont variées, mais les principales techniques impliquent la croissance des cristaux à partir d'un bain de matériau fondu, maintenu à une température d'environ 1400°C.

Parmi toutes ces méthodes, on va citer les plus courantes :

II.6.1.1. La Méthode de Czochralski (CZ) :

Le processus commence par la fusion du silicium polycristallin dans un creuset. Ensuite, un germe, qui est un petit morceau de silicium monocristallin pur, est délicatement placé en contact avec la surface du silicium fondu. En tirant lentement le germe vers le haut à une vitesse extrêmement lente, le matériau fondu a le temps de se recristalliser progressivement en

un monocristal, adoptant ainsi la structure cristalline du germe initial.

Ce processus de tirage contrôlé permet au cristal de croître de manière régulière et uniforme, réduisant ainsi les défauts et les impuretés. Une fois que tout le contenu du creuset s'est solidifié, un barreau de silicium monocristallin se forme sous forme d'un cylindre (lingot).

Ce lingot obtenu est découpé ensuite en tranches minces de silicium (wafers) d'environ 200 à 400 μm par la technique de sciage au fil diamanté.

II.6.1.2. Techniques de fusion de zone (FZ) :

A. Technique de la zone flottante :

La méthode de la zone flottante est une technique de croissance de cristaux qui permet de produire des matériaux monocristallins de haute pureté.

Dans ce processus, un matériau polycristallin est fondu dans une zone localisée, créant une zone de fusion qui flotte à la surface d'un matériau solide.

Un germe monocristallin est ensuite introduit et guide la croissance du cristal, permettant aux atomes du matériau fondu de se cristalliser de manière ordonnée. En déplaçant lentement la zone de fusion le long du matériau solide, un cristal monocristallin de grande qualité est formé, avec une pureté élevée et un minimum de défauts.

B. Technique de Bridgman :

La méthode de Bridgman, également connue sous le nom de technique Bridgman-Stockbarger, est une méthode de croissance de cristaux utilisée pour produire des matériaux monocristallins.

Suivant cette méthode, le matériau est d'abord fondu dans un creuset à gradient thermique.

Ensuite, le creuset est déplacé lentement à travers un gradient de température, créant une zone de solidification progressive

Un cristal monocristallin se forme à partir d'un germe cristallin situé à la base du creuset, et le matériau solide est tiré à travers le gradient thermique pour former un cristal monocristallin

continu.

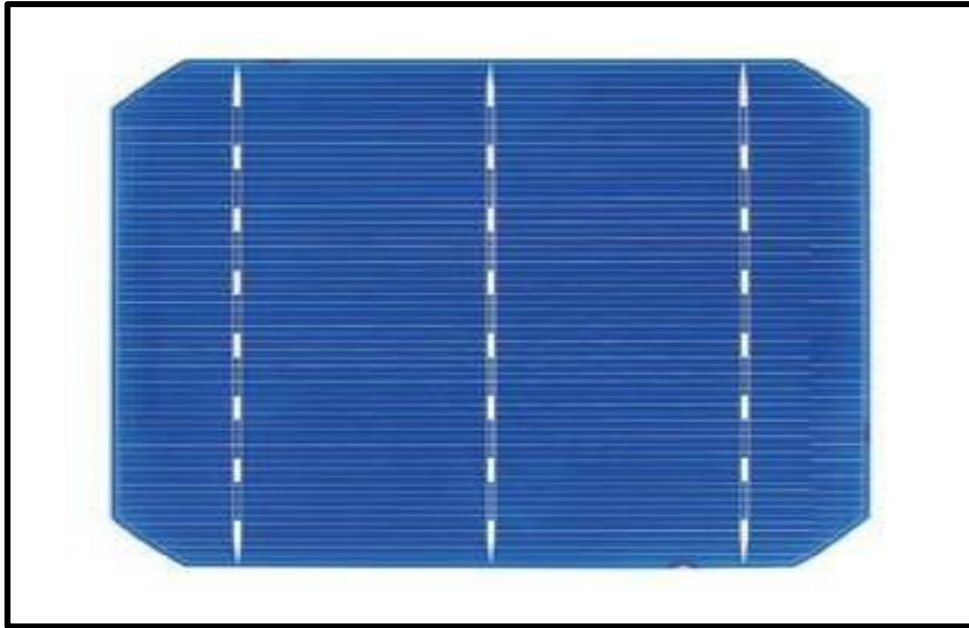


Figure II.10 : Cellule solaire en Silicium monocristallin

II.6.2. Cellules polycristallines :

Dès le milieu des années 1970, il a été déterminé quels éléments nuisaient au rendement des cellules solaires et comment fabriquer un cristal de silicium de qualité solaire à moindre coût.

Ainsi est né le silicium polycristallin, ou multicristallin, constitué de petits cristaux monocristallins d'orientations variées, mesurant du millimètre au centimètre.

Pour le produire, on refond les déchets de monocristaux dans une cuve carrée à température et atmosphère contrôlées. Divers procédés thermiques et chimiques repoussent les impuretés vers la périphérie du creuset, formant une croûte éliminée après durcissement. Le bloc obtenu est ensuite taillé en barreaux carrés (10 x 10 cm ou 15 x 15 cm), puis scié en wafers

Les wafers carrés optimisent l'utilisation de la surface et améliorent le remplissage des modules photovoltaïques.

Cette technologie, bien maîtrisée et offrant un bon rapport qualité/prix, est aujourd'hui la plus répandue.

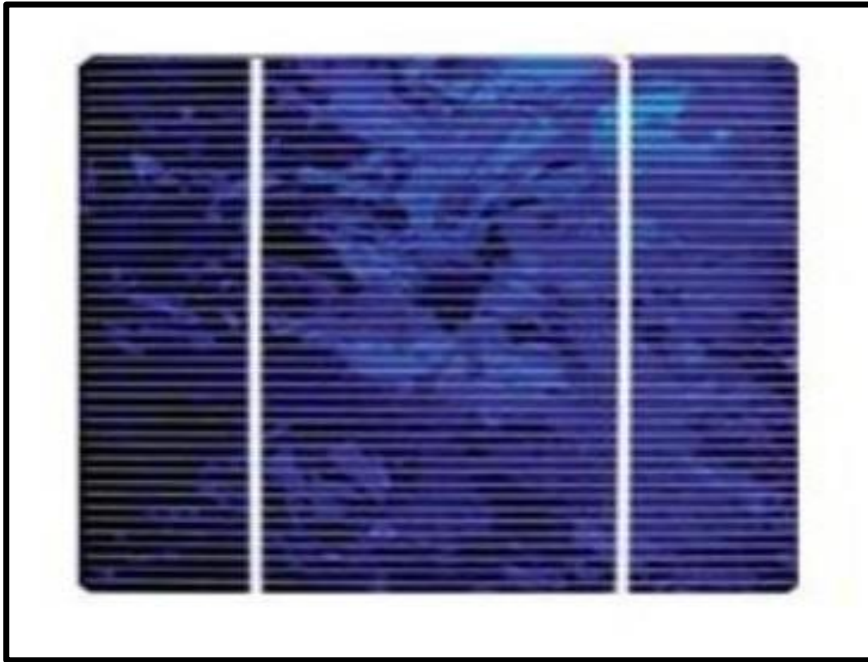


Figure II.11 : Cellule solaire en Silicium polycristallin

Technologies prometteuses

Le solaire photovoltaïque concentré

Les miroirs concentrent les rayons du soleil sur une petite cellule solaire photovoltaïque à haut rendement. Grâce à cette technologie de concentration, les matériaux semi-conducteurs peuvent être remplacés par des systèmes optiques moins coûteux. À puissance égale, ceci permet d'utiliser 1 000 fois moins de matériel photovoltaïque que dans les panneaux photovoltaïques à insolation directe.

Le rendement théorique maximum de la conversion photon-electron est de l'ordre de 85% (le rendement de Carnot est 95 %). Le rendement expérimental maximal obtenu avec cette technologie avoisine 46%.

Les constituants organiques (polymères)

L'utilisation de matériaux polymères vise à remplacer les matériaux minéraux par des semi-conducteurs organiques, autrement dit des plastiques, pour la fabrication de cellules photovoltaïques. Ceux-ci sont bon marché, ont des bonnes propriétés d'absorption et sont faciles à déposer. Leur coût de revient très faible se double de caractéristiques particulièrement attrayantes : plus légères et moins fragiles, leur nature flexible

permet d'obtenir des matériaux souples en polymères organiques ou en silicone et même des encres photovoltaïques.

D'une durée de vie courte, leur rendement en conditions réelles doit encore être amélioré : en laboratoire, ce rendement avoisine 19% selon le CEA(3).

Les cellules hybrides : thermique et photovoltaïque

Le rendement des cellules solaires photovoltaïques diminue lorsque les panneaux montent en température. Certains centres de recherche ont eu l'idée de récupérer la chaleur captée et libérée par le photovoltaïque pour simultanément optimiser le rendement électrique et obtenir une source de chauffage. Ils développent ainsi des capteurs solaires hybrides mariant le photovoltaïque et le thermique.

L'énergie solaire joue un rôle crucial dans la gestion de l'énergie au sein des exploitations agricoles, en offrant des solutions durables et économiques. Voici une vue d'ensemble des différentes applications de l'énergie solaire dans ce contexte :

1. Chauffage des bâtiments d'élevage :

Le chauffage des bâtiments d'élevage, en particulier durant les mois froids, est essentiel pour le bien-être des animaux et la productivité. L'énergie solaire peut être utilisée de plusieurs façons pour répondre à ce besoin :

- **Chauffage par rayonnement solaire** : Des panneaux solaires thermiques peuvent capter la chaleur du soleil et la transférer dans le bâtiment à l'aide de systèmes de circulation de fluide. Cette chaleur est utilisée pour maintenir une température stable et confortable pour les animaux, sans avoir besoin de combustibles fossiles. Ce système réduit les coûts énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre.
- **Géothermie** : Bien que ce ne soit pas directement une forme d'énergie solaire, la géothermie est souvent combinée avec des systèmes solaires pour une gestion thermique plus efficace. En utilisant la chaleur du sol, on peut chauffer ou refroidir les bâtiments d'élevage de manière plus stable, réduisant ainsi la dépendance aux énergies non renouvelables.

2. Éclairage solaire pour les cycles naturels de la volaille :

L'éclairage est un élément clé dans les cycles de vie des animaux, notamment la volaille. La lumière influence le comportement, la croissance et la production d'œufs chez les poules.

- **Éclairage solaire** : L'énergie solaire permet d'alimenter des systèmes d'éclairage efficaces qui respectent les besoins naturels des animaux. Les panneaux photovoltaïques peuvent alimenter des lampes à LED, qui fournissent une lumière de qualité tout en consommant peu d'énergie. Ce système

est non seulement économique, mais aussi plus respectueux de l'environnement, car il réduit la consommation d'électricité du réseau.

- **Simulation des cycles de lumière naturelle** : Grâce à des systèmes d'éclairage solaire intelligents, on peut ajuster la durée et l'intensité de la lumière en fonction des saisons, ce qui permet de maintenir des cycles naturels adaptés aux animaux, comme la régulation de la reproduction et du métabolisme.

3. Ventilation et régulation de la température :

Maintenir des conditions de température et d'humidité optimales dans les bâtiments d'élevage est crucial pour la santé des animaux. L'utilisation de l'énergie solaire pour alimenter des systèmes de ventilation et de climatisation est une solution efficace et écologique.

- **Ventilateurs solaires** : Les ventilateurs alimentés par des panneaux photovoltaïques peuvent être utilisés pour améliorer la circulation de l'air dans les bâtiments d'élevage, réduisant ainsi la chaleur excessive et l'humidité. Cela aide à éviter les maladies respiratoires et à maintenir des conditions de vie favorables pour les animaux.
- **Climatiseurs solaires** : En combinaison avec des ventilateurs, des systèmes de climatisation alimentés par l'énergie solaire peuvent être utilisés pour refroidir les bâtiments pendant les mois chauds. Ces systèmes sont particulièrement utiles dans les régions où les températures estivales sont élevées et où l'électricité peut être coûteuse. Les climatiseurs solaires fonctionnent souvent avec des panneaux photovoltaïques ou des systèmes thermiques pour absorber la chaleur et réguler la température intérieure de manière plus durable.

II.1 DIFFERENTS TYPES DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES

II.1 .1 Le systèmes off-grid (hors réseau) :

Les systèmes photovoltaïques off-grid dit autonomes, sont des installations solaires conçues pour fonctionner indépendamment du réseau électrique public dont les caractéristiques principales sont :

- ✓ L'indépendance énergétique :

Ces systèmes sont utilisés dans des zones isolées où le réseau électrique n'est pas disponible, ou par des utilisateurs souhaitant être totalement autonomes.

- ✓ Stockage de l'énergie :

Les systèmes off-grid incluent des batteries pour stocker l'électricité produite par des panneaux solaires. Celles-ci permettent de fournir de l'énergie durant la nuit ou par mauvais temps lorsque la

production solaire est faible ou inexistante.

✓ Gestion de l'énergie :

Un régulateur de charge est souvent utilisé pour protéger les batteries contre les surcharges et les décharges profondes, prolongeant ainsi leur durée de vie.

✓ Utilisation locale :

Toute l'électricité produite et stockée est consommée sur place. Il n'y a pas d'injection d'excédent dans le réseau public car le système est totalement isolé.

La figure I.1 montre un schéma d'un système autonome (off-grid)

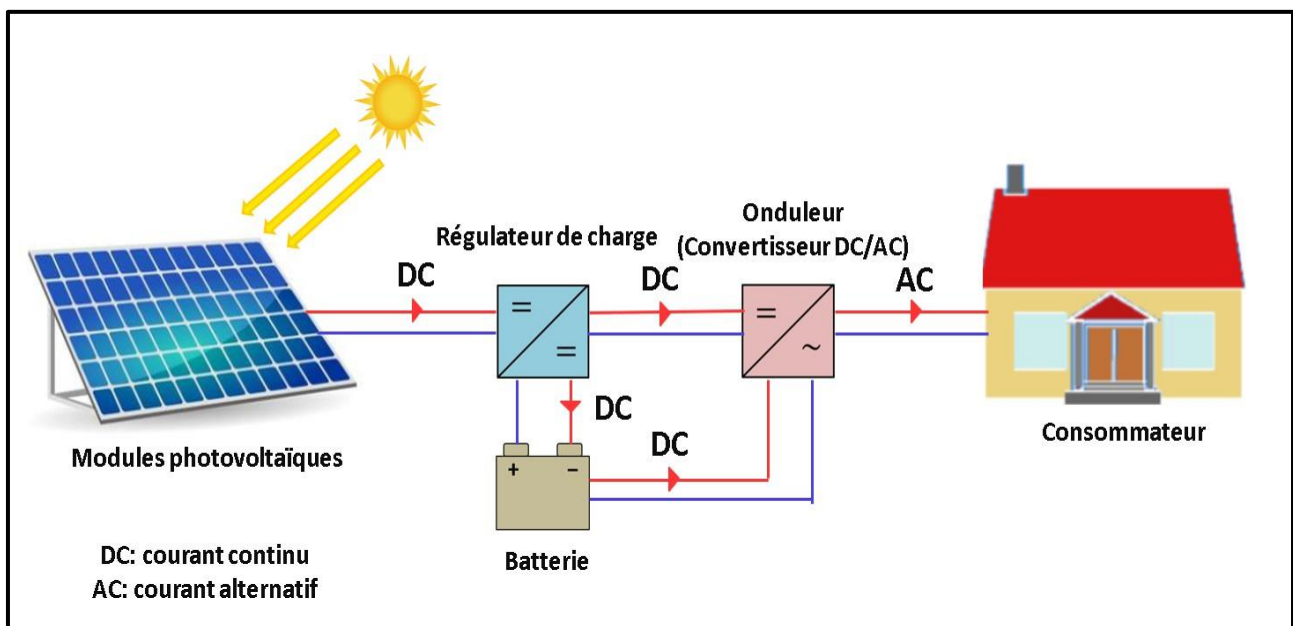


Figure II.12 : Schéma d'un système photovoltaïque autonome (off-grid)

II.1 .2 Le système on-grid :

Les systèmes photovoltaïques on-grid également appelés hybrides sont des installations solaires qui sont raccordées au réseau électrique public. Ce système est caractérisé par :

✓ Une connexion au réseau :

L'électricité produite est utilisée pour alimenter les appareils électriques domestiques, l'excédent étant injecté dans le réseau public.

✓ Interaction avec le réseau :

Lorsque la production solaire est insuffisante pour couvrir la demande (nuit, temps nuageux...etc) l'électricité nécessaire est automatiquement puisée du réseau public. Inversement, lorsque la production solaire dépasse la consommation domestique, le surplus est vendu à l'entreprise étatique qui gère la distribution d'électricité à partir du réseau public.

✓ Absence de stockage :

Généralement, les systèmes on-grid ne comprennent pas des batteries de stockage. L'énergie est utilisée en temps réel ou injecté dans le réseau.

✓ Incitations financières :

Les utilisateurs peuvent bénéficier de programmes de rachat d'électricité, de crédit d'impôt et d'autres incitations économiques pour compenser les couts d'installation et maximiser le retour sur investissement.

Comme nous l'avons suggéré auparavant, en Algérie il n'y pas de réglementation qui permet à l'utilisateur de vendre le surplus d'électricité produit par son installation photovoltaïque ; de ce fait notre travail traite exclusivement le système photovoltaïque off-grid.

La figure I.2 illustre une représentation d'un système photovoltaïque connecté au réseau (on-grid)

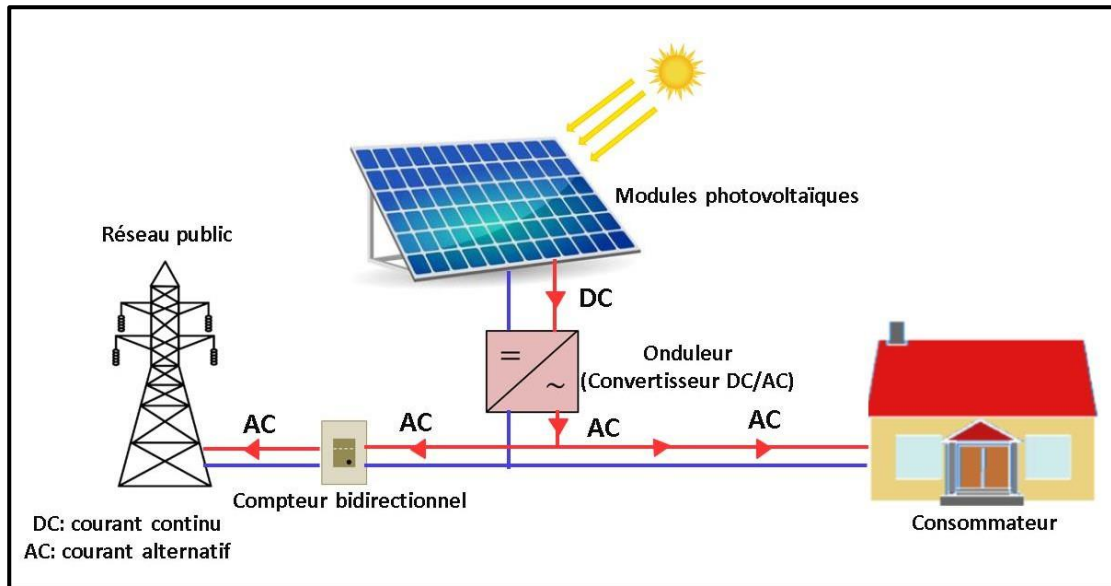


Figure II.13 : Schéma d'un système photovoltaïque connecté au réseau (on-grid)

II.2 LES ELEMENTS D'UN KIT PHOTOVOLTAÏQUE :

II.2.1 Le module photovoltaïque :

Un module photovoltaïque, communément appelé panneau solaire (Figure II.3), est un dispositif conçu pour convertir l'énergie lumineuse, principalement issue du soleil, en électricité. Il constitue l'élément de base des systèmes photovoltaïques.



Figure II.13 : Module photovoltaïque

Un module photovoltaïque est composé de plusieurs photopiles, également appelées cellules photovoltaïques, qui sont interconnectées et encapsulées dans une structure rigide pour les protéger et les maintenir en place. Les photopiles sont fabriquées à partir de matériaux semi-conducteurs, et notamment le silicium car celui-ci représente le deuxième élément le plus abondant sur le globe terrestre après l'oxygène.

Lorsque la lumière du soleil frappe ces photopiles, les photons composant cette première excitent les électrons dans le matériau semi-conducteur, créant ainsi des paires électron-trou.

Ce processus, appelé effet photovoltaïque, génère un courant électrique lorsqu'un circuit est fermé. Les photopiles sont des objets très sensibles qu'il faut protéger mécaniquement et conserver à l'abri des rigueurs du climat.

Un module photovoltaïque est toujours accompagné d'une fiche technique détaillant ses caractéristiques énergétiques abordées au premier chapitre telles que la tension à circuit ouvert (V_{co}), le courant de court-circuit (I_{sc}), le facteur de forme (FF), et le rendement énergétique (η), ainsi que son poids et ses dimensions (longueur, largeur et épaisseur).

Les modules photovoltaïques sont conçus pour répondre à une variété de besoins énergétiques, ce qui explique pourquoi ils se déclinent en différents types. Ces différences sont principalement basées sur

leur capacité de production d'énergie, leur utilisation prévue et les caractéristiques spécifiques qu'ils doivent posséder pour répondre aux exigences des applications auxquelles ils sont destinés.

En fonction de ces critères, on distingue ; Les modules de micropuissance, faible, moyenne et forte puissances.

Micropuissance :

- Caractéristiques : très petite taille, faible rendement, utilisé pour des applications nécessitant très peu d'énergie.
- Usage : petits appareils électroniques, capteurs, montres.
- Puissance : quelques milliwatts (mW) à quelques watts (W).

Faible puissance :

- Usage : Calculatrices solaires, lampes de jardin, petits gadgets.
- Puissance : De quelques watts (10 W) à une centaine de watts.
- Caractéristiques : Compact, souvent utilisé pour des dispositifs portables ou d'extérieur.

Moyenne puissance :

- Usage : petits systèmes résidentiels, caravanes, bateaux.
- Puissance : de 100 watts à quelques centaines de watts.
- Caractéristiques : taille et rendement modérés, suffisant pour des systèmes autonomes de petite à moyenne taille.

Forte puissance :

- Usage : systèmes résidentiels et commerciaux, fermes solaires.
- Puissance : à partir de plusieurs centaines de watts (300 W)).
- Caractéristiques : grande taille, rendement élevé, souvent utilisés pour la production d'électricité à grande échelle.

- **L'assemblage des modules photovoltaïques :**

L'assemblage des panneaux photovoltaïques peut se faire principalement de deux manières : en série ou en parallèle.

L'assemblage en série consiste à connecter les modules photovoltaïques en les juxtaposant l'un après l'autre de telle sorte que le contact (-) en face avant du premier soit relié au contact (+) en face arrière du module suivant, et le contact (-) de ce dernier au contact (+) du suivant et ainsi de suite (Figure II.4). Cette configuration permet d'augmenter la tension globale du système, car les tensions de ces modules photovoltaïques s'additionnent, tandis que le courant reste le même à travers toute la ligne (branche).

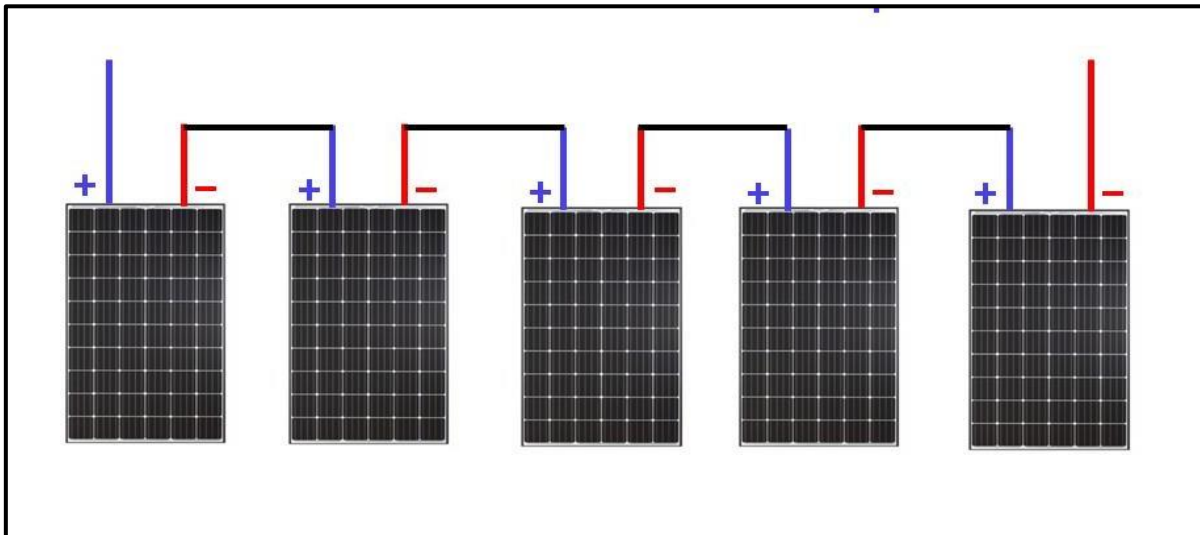


Figure II.14 : Montage en série de modules photovoltaïques

En revanche, le montage en parallèle implique généralement de brancher les modules photovoltaïques en les mettant l'un en dessous de l'autre, de manière que toutes les bornes négatives soient raccordées entre elles à l'aide d'un câble commun et c'est pareil pour les bornes positives (Figure II.5)

Cette disposition augmente le courant de sortie (courant total), car les courants produits par l'ensemble des modules photovoltaïques s'additionnent, par opposition à la tension qui reste constante.

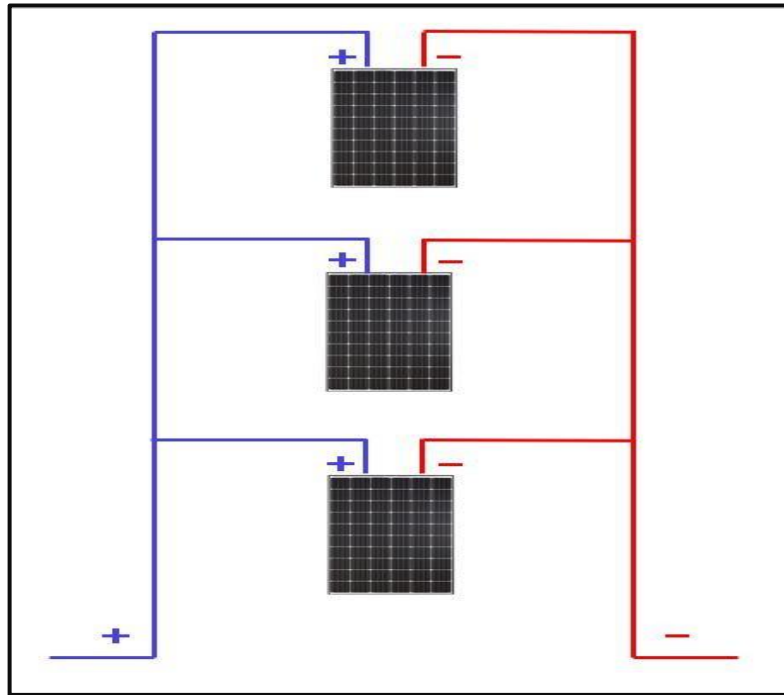


Figure II.15 : Montage en parallèle de modules photovoltaïques

II.2.2 Le régulateur de charge :

II.2.2.1 Le rôle d'un régulateur de charge :

Un régulateur de charge au sein d'un système photovoltaïque est un dispositif électronique qui régule le flux d'électricité entre les panneaux solaires et les batteries, garantissant un niveau optimal de charge et de décharge pour préserver l'intégrité des batteries. Son rôle fondamental est de maintenir les batteries dans des conditions de fonctionnement sûres et efficaces en ajustant les grandeurs tension et courant délivrées par les modules photovoltaïques en fonction de celles des batteries et des convertisseurs.

En contrôlant ces paramètres, le régulateur de charge assure une gestion précise de l'énergie solaire, réduisant les risques de défaillance et prolongeant la durée de vie du système dans son ensemble

II.2.2.2 Les types des régulateurs :

❖ Régulateur de type PWM (Pulse Width Modulation) :

Le régulateur de charge de type PWM (Figure II.6) a pour fonction uniquement de réguler la tension provenant des panneaux solaires en fonction de celle recommandée par les batteries. Il récupère la

tension nécessaire des panneaux pour recharger les batteries en fournissant une tension optimale pendant la période de charge des batteries. Les régulateurs PWM sont généralement utilisés pour des applications de petite envergure où la tension du générateur photovoltaïque est très proche de celle du système de stockage pour éviter les pertes majeures. Ils ont l'avantage de bien fonctionner même à des températures élevées, ce qui les rend recommandés dans les régions chaudes.



Figure II.16 : Régulateur de charge de type PWM

❖ Régulateur de type MPPT (Maximum Power Point Tracking) :

Le régulateur de charge de type MPPT (Figure II.7) est un dispositif sophistiqué qui optimise le rendement des systèmes photovoltaïques en suivant en temps réel le point de puissance maximale des panneaux solaires.

Contrairement aux régulateurs de type PWM, qui régulent seulement la tension en fonction de celle exigée par les batteries, le régulateur MPPT ajuste continuellement la tension et le courant de sortie pour que la puissance reçue par le système de stockage (batteries) soit approximativement la même que celle fournie par le champ photovoltaïque avec un minimum de pertes, afin de permettre aux batteries de se recharger le plus rapidement possible.

Ce processus s'appuie sur des algorithmes de suivi avancés qui analysent les caractéristiques

de performance des panneaux solaires et ajustent la charge en conséquence.

De plus, les régulateurs MPPT assurent une efficacité irréfutable même dans le cas où la tension des panneaux photovoltaïques est beaucoup plus élevée que celle du système de stockage, tout en permettant de réduire au maximum les pertes par effet Joule et d'exploiter pleinement l'énergie produite par le système photovoltaïque.

Cependant, leur complexité et leur coût plus élevé doivent être pris en compte lors de la conception et de l'installation d'un système solaire.



Figure II.17 : Régulateur de charge de type MPPT

II.2.3 LE SYSTEME DE STOCKAGE (BATTERIE) :

II.2.3.1 Définition :

La batterie est un composant crucial dans les systèmes photovoltaïques autonomes, chargé de stocker l'énergie électrique produite par les panneaux photovoltaïques. L'importance de son rôle réside dans le cas où la production photovoltaïque n'est pas suffisante pour répondre à la demande énergétique, ou bien lorsqu'il fait nuit, assurant ainsi une alimentation continue en électricité.

II.2.3.2 Les différents types de batteries :

Dans un système photovoltaïque, plusieurs types de batteries peuvent être utilisés pour le stockage de l'énergie solaire. Voici quelques-uns des types les plus courants :

- Batteries au plomb-acide :

Ces batteries sont largement utilisées en raison de leur coût relativement bas. Elles sont disponibles en deux variantes : les batteries à électrolyte liquide et les batteries à électrolyte gel. Elles offrent une bonne durabilité et une fiabilité acceptable pour de nombreuses applications.

Cependant, elles présentent des inconvénients tels qu'une densité énergétique plus faible, un entretien régulier nécessaire (surtout pour les versions à électrolyte liquide), et une sensibilité à la décharge profonde qui peut réduire leur durée de vie. De plus, elles sont assez lourdes, ce qui peut être un inconvénient pour les installations où le poids est un facteur critique.

La figure II.18 montre une batterie au plomb-acide, d'une tension de 12V et d'une capacité de 200Ah



Figure II.18 : Batterie au plomb-acide

- Batteries lithium-ion :

Ces batteries sont de plus en plus populaires en raison de leur densité énergétique élevée, de leur longue durée de vie et de leur faible poids.

Elles sont particulièrement adaptées aux installations solaires résidentielles et commerciales, offrant une excellente performance et une gestion intelligente de la batterie.

Toutefois, elles sont plus coûteuses à l'achat, présentent des risques de surchauffe et de combustion, et leur recyclage est plus complexe et moins développé par rapport aux autres types de Batteries

Leur poids léger est généralement un avantage important, facilitant l'installation et réduisant les contraintes sur les structures de support.

La Figure II.9 illustre une batterie lithium-ion de type LiFePO₄, 12 V et 200 Ah



Figure II.19 : Batterie Lithium-ion

- Batteries au nickel-cadmium (Ni-Cd) :

Bien que moins courantes que les batteries au plomb-acide et au lithium-ion, les batteries Ni-Cd (Figure II.20) sont appréciées pour leur robustesse, leur capacité à fonctionner dans des conditions extrêmes de température et leur longue durée de vie.

Cependant, elles souffrent de l'effet mémoire, qui peut réduire leur capacité avec le temps, et le cadmium est un matériau toxique, ce qui pose des problèmes environnementaux et de santé lors de la production, de l'utilisation et de l'élimination de ces batteries. En outre, elles sont

également relativement lourdes, ce qui peut être un désavantage pour certaines applications nécessitant des solutions plus légères.



Figure II.20: Batterie au nickel-cadmium

II.2.4 LE CONVERTISSEUR :

II.2.4.1. Définition :

Un convertisseur est un dispositif électronique utilisé pour convertir une forme d'énergie ou un type de signal en une autre forme. Ils sont couramment utilisés en électronique, en informatique, télécommunication et dans d'autres domaines techniques et industriels. (ANNE LABOURET)

Dans une application photovoltaïque on trouve le convertisseur statique, qui est un sous-type spécifique de convertisseur, qui utilise des composants électroniques semi-conducteurs, tel que les diodes, les transistors, thyristors.

On peut l'exprimer à partir du schéma suivant (Figure II.21) :

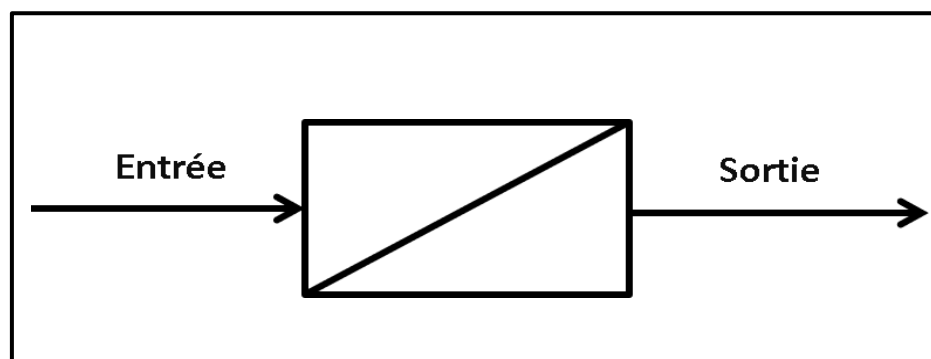


Figure II.21 : Schéma du convertisseur statique

Les convertisseurs statiques jouent un rôle crucial pour transformer l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques en une forme utilisable pour les appareils électriques domestiques ou pour l'injection dans le réseau électrique.

II.2.4.2 Les types de convertisseurs statiques :

Les convertisseurs statiques peuvent être classés de la manière suivante comme le montre la Figure II.22 :

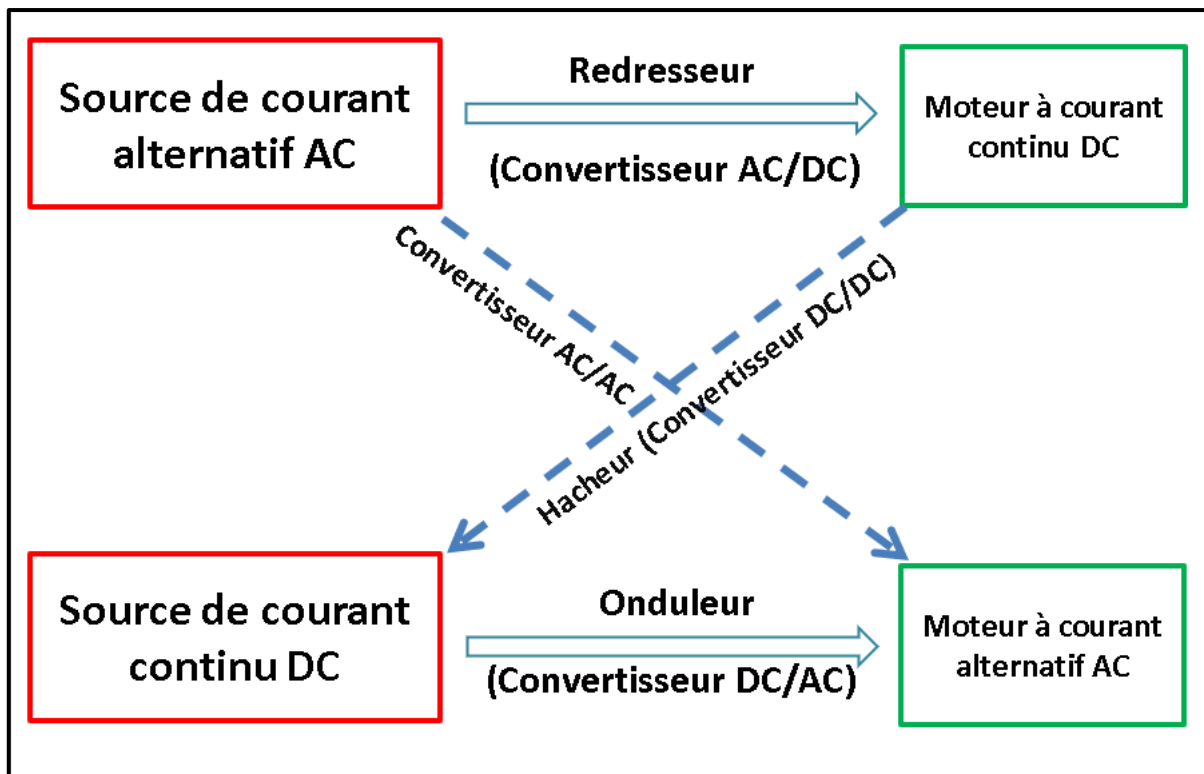


Figure II.22 : Types de convertisseur statique

❖ Redresseur :

C'est un convertisseur alternatif-continu (AC/DC) qui permet de convertir une tension alternative (AC) en une tension continue (DC) (Figure II.23). Il utilise des composants comme les diodes ou les thyristors pour permettre le passage du courant uniquement dans une direction. Les redresseurs peuvent être :

Non contrôlés : utilisent des diodes pour convertir AC en DC sans possibilité de réguler la tension de sortie

Contrôlés : utilisent des thyristors ou des transistors pour contrôler et réguler la tension de sortie DC

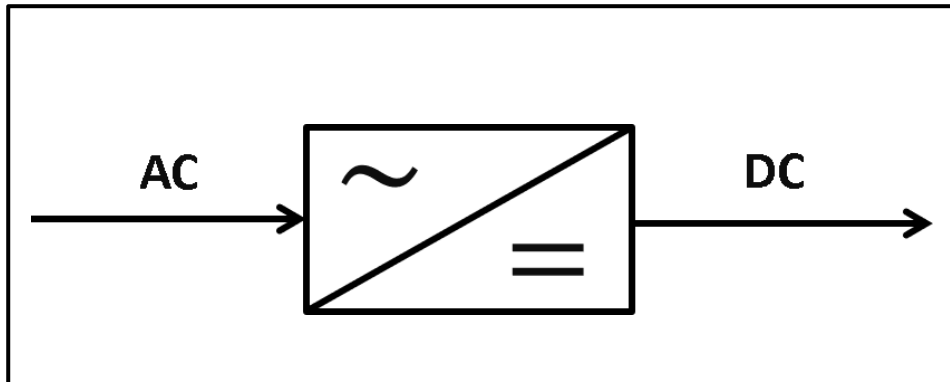


Figure II.23 : Convertisseur AC/DC (redresseur)

❖ Onduleur :

C'est un convertisseur continu-alternatif. Il permet de convertir une tension continue (DC) en une tension alternative (AC) comme le montre la Figure II.24. Les onduleurs sont couramment utilisés pour alimenter des appareils électriques à partir de sources de courant continu comme les panneaux photovoltaïques ou les batteries.

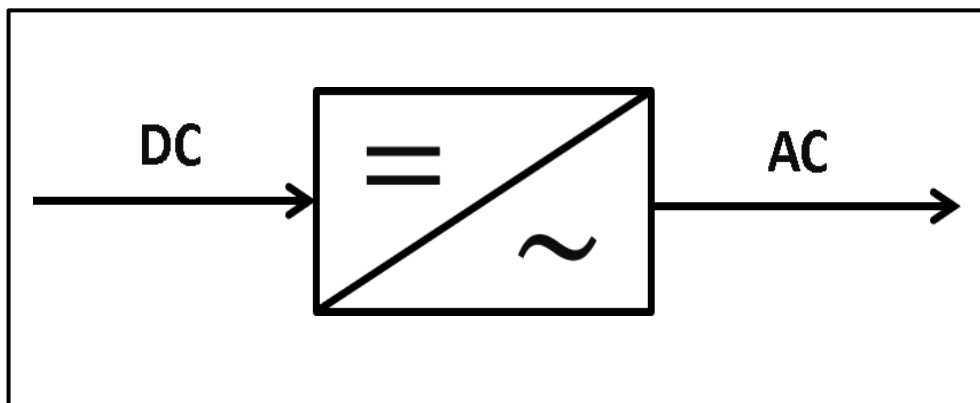


Figure II.24 : Convertisseur DC/AC (onduleur)

❖ Hacheur :

C'est un convertisseur continu-continu délivrant une tension continue (DC) réglable à partir d'une tension continue (DC) de valeur fixe pour varier la vitesse d'un moteur (Figure II.25)

Si la tension de sortie est inférieure à la tension d'entrée, le hacheur est appelé abaisseur ou dévolteur (Buck Converter). Dans le cas contraire, il est élévateur ou survolteur (Boost Converter)

Il existe aussi des hacheurs capables de travailler des deux manières.

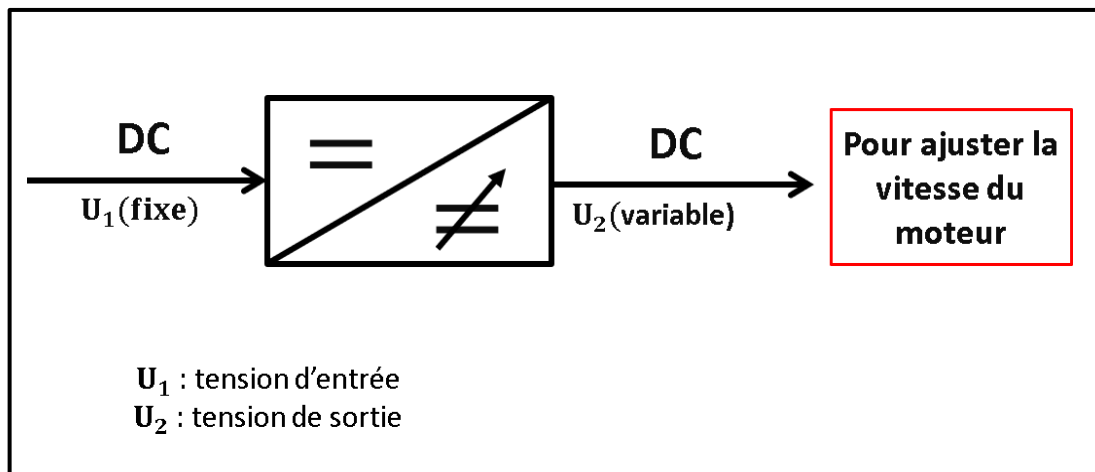


Figure II.25 : Convertisseur DC/DC (hacheur)

❖ Convertisseur AC/AC :

Le convertisseur AC/AC est un type de convertisseur statique qui permet de délivrer une tension alternative (AC) et une fréquence réglables à partir d'une tension alternative et d'une fréquence fixes (Figure II.26) , en modifiant la fréquence et /ou la valeur efficace de la tension de sortie .

Il existe deux types principaux de convertisseurs de AC/AC :

Gradateur : est un type de convertisseur AC/AC qu'il permet de modifier la tension alternative en délivrant une tension alternative (AC) variable à partir d'une tension alternative (AC) fixe , sans modifier la fréquence $f=C^{ste}$ ($f d'entrée = f de sortie$)

Les gradateurs fonctionnent en contrôlant la portion de la forme d'une onde sinusoïdale qui est appliquée à la charge, en modifiant ainsi la puissance délivrée. Ils sont couramment utilisés dans des applications d'éclairage tels que les variateurs de lumière pour les ampoules à incandescence, halogènes ou LED

Cyclo convertisseur : est convertisseur AC/AC, capable de modifier à la fois la valeur efficace de la tension et la fréquence d'une onde alternative. Contrairement aux gradateurs, les cyclo convertisseurs permettent de fournir une tension alternative et une fréquence variable (réglables) à partir d'une tension alternative et d'une fréquence fixe.

Ils sont utilisés dans des applications industrielles telles que les moteurs de grande puissance, chauffage par induction

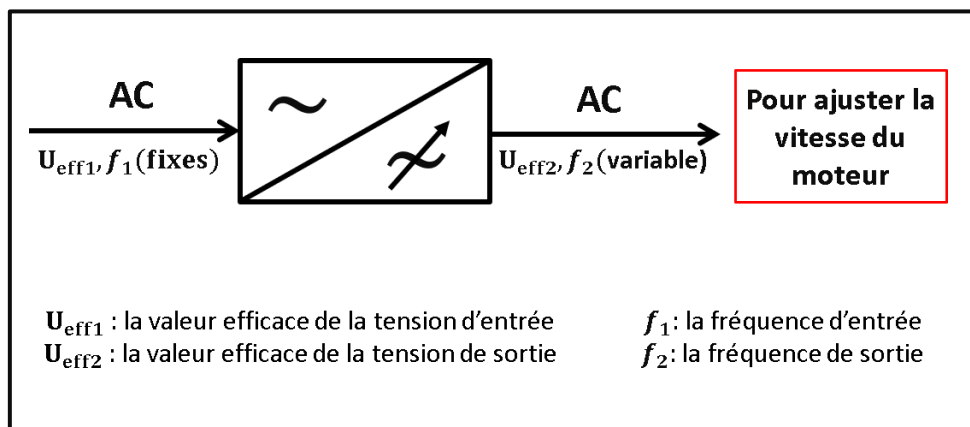


Figure II.26 : Convertisseur AC/AC

II.2.5. Câblage électrique :

II.2.5.1. Câble solaire. :

Les câbles DC raccordent les modules entre eux pour former des strings, et branchent plusieurs strings en parallèle. Seuls des câbles dits < solaires > (double isolation, protection UV et ozone, etc.) peuvent être utilisés. Plus en détails, les câbles solaires utilisés à l'extérieur sur des toitures doivent être résistants aux UV et protégés contre l'action de l'ozone. Ils doivent aussi être certifiés pour fonctionner à températures de - 20°C à 80°C. La prescription de température doit aussi être valable pour tout le matériel utilisé pour l'installation.

Les câbles principaux de CC doivent être dimensionnés et connectés en respectant certains critères essentiels pour des raisons de sécurité et d'efficacité énergétique :

- ✓ Supporter une tension de 1,15 x la tension de circuit ouvert (isolation)
- ✓ Adapter la capacité du câble au transport du courant DC et AC (section des câbles) et pertes ohmiques dues aux chutes de tension
- ✓ Utiliser des connecteurs appropriés.

La sécurité contre les surintensités en cas d'incident ou de court-circuit :

Lorsque plusieurs strings sont raccordés en parallèle, il est nécessaire de protéger les conducteurs contre les surintensités à l'aide de fusibles sur les pôles (+) et (-)

Ces fusibles de protection sont facultatifs dans le cas où les conducteurs auront été dimensionnés pour pouvoir supporter la surintensité maximale possible (courant de court-circuit) et s'il n'y a pas plus de quatre strings connectés en parallèle. Dans ce cas, il faut vérifier que les modules peuvent supporter cette intensité dans le sens contraire (courant forcé à travers le module) sans les endommager de façon irréversible.

Par conséquent, les conducteurs principaux de CC devront toujours être dimensionnés pour la surintensité maximale possible fournie par plusieurs strings en parallèle de modules PV (c'est à dire l'ensemble des strings mis en parallèle). La section du câble sera donc la valeur supérieure standard la plus près de la valeur calculée. [7]

II.2.5.2. Connecteurs MC4 :

Les connecteurs MC4 (Figure II.27) pour le photovoltaïque servent au câblage en série et parallèle des panneaux solaires de manière rapide et sûre. [7]

Ils ont choisi en fonction de la section des câbles mise en œuvre sur le central PV.



Figure II.27 : Connecteur MC4 mâle et femelle

Le tableau 2 ci-dessous montre la Fiche technique des différents connecteurs MC4. [7]

Type	Connecteurs MC4 mâle et femelle		
Référence	M25400 / M25401	M25402 / M25403	M25406 / M25407
Section de câble	1,5 et 2,5 mm ²	4 et 6 mm ²	10 mm ²
Diamètre sur isolant	3 et 6 mm	3 et 6 mm	5,5 et 9 mm
Courant assigné max	17 A à 22,5 A	30 A	43 A
Tension du système max	1000 V		
Système de verrouillage	Snap-in		
Type de protection (connecté)	IP 67		
Catégorie de protection	II		
Température ambiante	- 40° C à + 90° C		
Poids	0,010 Kg		

II. 3. Système de protection électrique

Afin de permettre une exploitation sans danger d'une installation photovoltaïque il est obligatoire de la doter d'un système de protection selon des normes internationales en termes de sécurité électrique

Le système de protection su cité comporte

II.3.1 Protection courant continue DC :

Une protection courant continu est exigée dans chaque installation d'un système photovoltaïque avec des coffres de type IP65. [7]

II.3.1.1. Protection des branches :

La protection d'un champ photovoltaïque est réalisée à l'aide de fusible installé sur chaque branche (Figure II.28). Il sera placé à la sortie de chaque branche parallèle et sera choisi en tenant compte de :

- La tension de fonctionnement d'un fusible doit être de 1,15 fois la tension à vide dans les conditions

STC des modules raccordés en série : $1,15 \times V_{co} \times N_s$

- Le calibre des fusibles doit être compris entre 1,5 et 2 fois le courant I_{cc} (STC) de chaque chaîne. ($1,5 \times I_{cc} \leq \text{calibre fusible} \leq 2 \times I_{cc}$).



Figure II.28 : Fusible de protection

II.3.1.2. Protection par coffre DC:

Il est donc placé entre les modules photovoltaïques et l'onduleur.

Il comporte un dispositif de coupure et de sectionnement général DC sur la liaison principale et le parafoudre. [7]

➤ Interrupteur de coupure/ sectionneur DC :

Il sera placé juste à la sortie du générateur et servira entre autre d'isoler électriquement le champ PV afin de permettre des opérations de maintenance en sécurité. Il doit être dimensionné selon la règle suivante :

- Tension assignée du fusible $\geq 1,15 \times V_{co} \times N_s$
- Intensité nominale $\geq 1,5 \times I_{cc} \times NBP$

La figure II.29 montre un interrupteur de coupures/sectionneur DC



Figure II.29 : Intercepteur de coupures /sectionneur DC

- Le parafoudre DC (para-surtenseur) :

Le parafoudre (Figure II.30) permet de protéger contre les risques de surtensions éventuelles dans l'installation. Pour prévenir les surtensions dues à la foudre. [7]



Figure II.30: Parafoudre DC

II.3.2. Protection courant alternatif AC:

Une protection courant alternative est exigée en aval de l'onduleur. Il est donc placé entre l'onduleur et le réseau de distribution

Le coffre AC comporte un dispositif de coupure et de sectionnement général AC sur la liaison principale, le parafoudre (chaque onduleur nécessite l'installation d'un disjoncteur différentiel).

➤ Le disjoncteur/ interrupteur différentiel :

Dans l'installation électrique, il y a deux éléments électriques qui sont des plus importants et qui participent parfaitement à la protection contre les chocs électriques. Il s'agit du disjoncteur et de l'interrupteur (Figure II.31).

Le disjoncteur différentiel détecte les fuites de courant (fonction différentielle) et coupe l'alimentation pour éviter les chocs électriques ; il protège contre les surcharges et les courts-circuits en coupant le courant si nécessaire.

L'interrupteur différentiel s'installe entre le disjoncteur général et les disjoncteurs divisionnaires ; il a pour rôle de détecter les fuites de courant et d'interrompre l'alimentation en cas d'un

défaut de terre sans protéger contre les surcharges ou les courts-circuits

Le disjoncteur différentiel disjuncte et détecte les courts-circuits et les surcharges électriques, ce qui est nécessaire pour la protection courante alternatif dans un système photovoltaïque. [7]

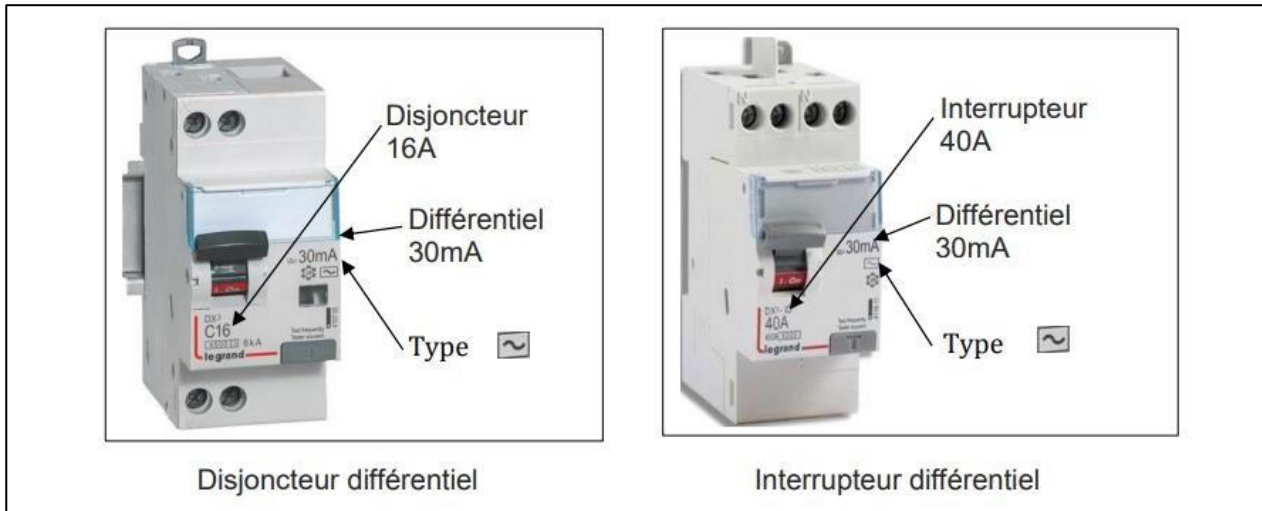


Figure II.31 : Disjoncteur différentiel et interrupteur différentiel

➤ Le parafoudre AC :

Afin de protéger vos appareils des risques de surtensions liées aux orages et à la foudre le parafoudre AC monophasé (Figure II.32) doit être installé dans le coffre AC et la protection contre les risques de surtensions induites dans le circuit de la partie à tension alternative de l'installation est important ainsi que la partie à tension continue. [7]



Figure II.32 : parafoudre AC

II.3.3. La mise à la terre :

La mise à la terre est une protection contre tout accident électrique éventuel sur une personne en contact avec un appareil présentant un défaut électrique (fuite de courant) et aussi une protection pour le matériel mis en place dans le système. On relie donc tout l'équipement électrique et les parties métalliques à la terre à l'aide d'un conducteur de faible résistance (5 ohms), de sorte que le courant électrique en défaut soit évacué dans la terre.

Le conducteur de terre qui assure la liaison entre la prise de terre et la barrette de mesure est de 16 mm² en cuivre isolé ou 25 mm² en cuivre nu. Le conducteur de terre qui assure la liaison entre la barrette de mesure et aux équipements est un câble en cuivre de couleur jaune-verte de 6 mm².

La figure ci-dessous montre le principe de protection par coffre suivant l'union technique de l'électricité UTE C15-712. [7]

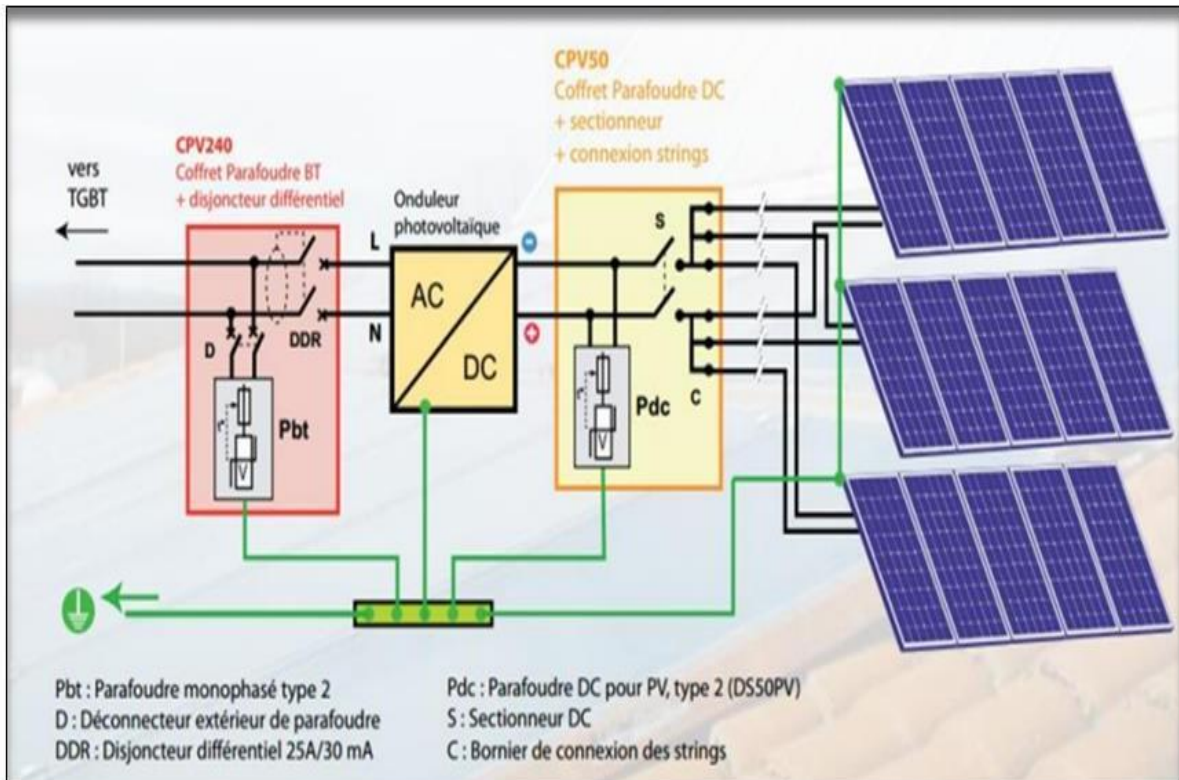


Figure II.33 illustrant le Principe de protection par coffres

II.4. Compteur électrique (smart meter) :

Un "smart meter" ou compteur intelligent est un dispositif programmable utilisé dans les installations connectées au réseau électrique (on grid).

Ce compteur avancé permet une gestion efficace de l'énergie en mesurant et en enregistrant la consommation d'électricité de manière précise et en temps réel.

Dans le contexte des installations photovoltaïques (PV), le smart meter offre une fonctionnalité bidirectionnelle, permettant l'échange d'électricité entre le réseau et l'installation PV.

Cela signifie qu'il peut non seulement mesurer l'énergie consommée depuis le réseau, mais aussi celle produite par l'installation PV et injectée dans le réseau.

De plus, le smart meter peut être programmé pour fonctionner de manière unidirectionnelle, empêchant ainsi le transfert de l'électricité de l'installation PV vers le réseau tout en permettant l'inverse, c'est-à-dire l'alimentation de l'installation par le réseau.

Cette programmabilité offre une flexibilité accrue pour optimiser la gestion énergétique en fonction des besoins spécifiques et des politiques de réseau, contribuant à une utilisation plus efficace et durable de l'électricité.



Figure II.34 : Smart meter (Bidirectionnel)

Chapitre III :
Intégration de l'énergie solaire dans les
systemes d'élevage de volaille

Chapitre III : Intégration de l'énergie solaire dans les systèmes d'élevage de volaille

III.1 Introduction

La méthode de dimension Dans les fermes avicoles, l'utilisation des équipements solaires se développe de plus en plus pour des raisons économiques, écologiques et d'autonomie énergétique.

Voici les principaux équipements solaires utilisés dans les fermes avicoles :

III.1.1. Panneaux solaires photovoltaïques

Description :

Dispositifs qui transforment la lumière solaire en courant continu (DC). Le courant est ensuite converti en courant alternatif (AC) via un onduleur pour alimenter les équipements standards.

Spécifications typiques

Caractéristique	Valeur typique
Puissance nominale	330 – 550 Wc par panneau
Rendement	17 – 22 %
Tension en circuit ouvert	~45 V
Durée de vie	25 – 30 ans
Température de fonctionnement	-40°C à +85°C

Composants nécessaires :

- **Onduleur** : SMA, Fronius, Victron
- **Batteries solaires** (LiFePO4 ou GEL) : 12V, 24V ou 48V
- **Structure de montage** (toiture ou au sol)
- **Régulateur de charge** : MPPT (plus efficace) ou PWM

Exemple d'utilisation :

*Ferme avicole de 1000 poulets de chair

- Besoin journalier estimé : 15 – 25 kWh
- Système conseillé : 20 panneaux de 400 Wc = 8 kWc
- Production annuelle estimée : 10 000 à 12 000 kWh (selon ensoleillement)

Chapitre III : Intégration de l'énergie solaire dans les systèmes d'élevage de volaille

III.2. Chauffe-eau solaires

Description :

Les capteurs thermiques (souvent plats ou à tubes sous vide) chauffent l'eau stockée dans un ballon. Fonctionnent même par temps nuageux.

Spécifications typiques :

Capacité ballon	Débit journalier possible
200 L	~300 L d'eau chaude
500 L	~800 L
1000 L	>1500 L

Types de capteurs :

- **Plans vitrés** : économique, bon rendement
- **Tubes sous vide** : meilleur en hiver ou climat froid

Usages en ferme :

- Laver les salles, mangeoires, œufs
- Préparer de l'eau tiède pour les poules
- Eau chaude pour personnel

III.3. Ventilation solaire

Description :

Utilise des panneaux solaires pour alimenter des extracteurs ou ventilateurs autonomes, souvent placés en toiture ou murs latéraux.

Exemples :

Modèle	Débit d'air	Panneau intégré
Solatube SolarStar	~1000 m ³ /h	Oui (30W)

Chapitre III : Intégration de l'énergie solaire dans les systèmes d'élevage de volaille

Modèle	Débit d'air	Panneau intégré
Ecofan Solar Vent	~1500 m ³ /h	Oui
Ventilateur DC + panneau 100W	~3000 m ³ /h	Non (à relier à panneau)

Intérêt avicole :

- Extraction d'ammoniac (NH₃)
- Prévention de l'humidité (moisissures)
- Réduction du stress thermique

III.4. Éclairage LED solaire

Description :

Systèmes d'éclairage LED avec alimentation solaire directe ou via batterie intégrée. Parfait pour optimiser la photopériode des volailles.

Puissance LED	Autonomie	Couleur utile
10 W	8 – 10 h	Blanc chaud ou rouge
30 W	12 – 14 h	Blanc neutre
50 W	15 – 20 h	Blanc ou variable

Effets sur les volailles :

- Rouge : calme, stimule la ponte
- Bleu : réduit l'activité (repos)
- Blanc chaud : imite la lumière naturelle

III.5. Couveuses solaires

Description :

Appareils d'incubation alimentés par panneaux solaires, souvent hybrides (solaire + secteur ou batterie).

Chapitre III : Intégration de l'énergie solaire dans les systèmes d'élevage de volaille

Capacités :

Modèle	Capacité œufs	Conso. journalière
Petit modèle	30 – 60 œufs	~0.3 kWh
Moyenne ferme	100 – 300 œufs	~0.5 à 1.5 kWh
Modèle industriel	>1000 œufs	>2.5 kWh

Caractéristiques :

- Température constante (37.5 °C)
- Hygromètre et thermostat intégrés
- Alarme en cas de coupure de courant

III.6. Refroidissement solaire

Description :

Systèmes rares mais utiles dans les climats chauds, utilisant l'énergie solaire pour rafraîchir.

Type :

- Refroidisseurs par évaporation + ventilateur solaire
- Climatiseur solaire hybride (PV + gaz réfrigérant)
- Réfrigérateur solaire DC pour œufs ou vaccins

Chapitre III : Intégration de l'énergie solaire dans les systèmes d'élevage de volaille

Appareil	Capacité	Source
Réfrigérateur solaire Dometic	80 – 200 L	12V DC
Brumisateur solaire	Refroidissement >10°C	100 W panneau
Climatiseur split solaire	9000 BTU – 18000 BTU	1500 – 3000 Wc requis

Les serres solaires et les volières photovoltaïques représentent des solutions innovantes pour optimiser la température et les conditions de vie des volailles tout en produisant de l'énergie renouvelable. Voici une présentation détaillée de ces structures, accompagnée de références spécifiques

III.6. serres solaires et volières photovoltaïques : Optimisation des conditions avicoles

III.6.1. Avantages pour l'élevage avicole

- **Régulation thermique naturelle** : Les panneaux solaires installés sur les toits des serres ou des volières fournissent de l'ombre, réduisant ainsi la température à l'intérieur des structures. Cela diminue le stress thermique chez les volailles, améliorant leur bien-être et leur productivité.
- **Protection contre les intempéries** : Ces structures offrent un abri contre la pluie, le vent et les rayons directs du soleil, créant un environnement plus stable pour les animaux.
- **Production d'énergie renouvelable** : L'électricité générée peut être utilisée pour alimenter les équipements de la ferme (éclairage, ventilation, systèmes d'abreuvement), réduisant ainsi les coûts énergétiques.
- **Valorisation des parcours extérieurs** : L'intégration de panneaux solaires sur les parcours permet une utilisation multifonctionnelle de l'espace, combinant élevage et production d'énergie

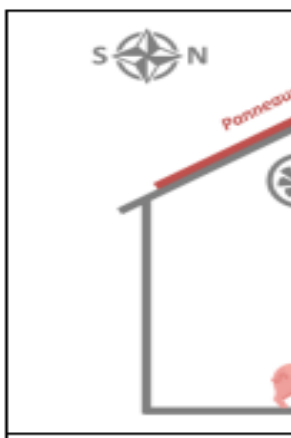
III.6.2. Description du système et modèles d'affaires rencontrés

Chapitre III : Intégration de l'énergie solaire dans les systèmes d'élevage de volaille

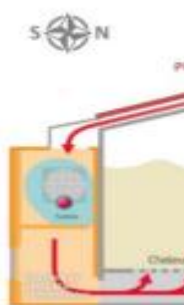
Le système consiste en l'installation de panneaux photovoltaïques sur la toiture de bâtiment(s) d'une exploitation agricole, avec autoconsommation de tout ou partie de la production électrique. Ce système comprend deux principaux types d'utilisation de l'énergie produite.

Le premier type d'utilisation de l'énergie est utilisé pour le pilotage de la température et des conditions d'hygrométrie du bâtiment d'élevage: chauffage, ventilation ou climatisation. Les panneaux photovoltaïques sont généralement orientés vers le sud.

La seconde utilisation majeure de l'électricité produite par des panneaux photovoltaïques sur toiture est le séchage de fourrages en grange. Ce système utilise des panneaux hybrides, qui produisent à la fois de l'électricité et de la chaleur, et dont le mécanisme de fonctionnement est représenté dans la figure ci-dessous. Ce système est rencontré dans de nombreuses exploitations en France (plus de 1000).



FigureIII 1: Schéma de bâtiments d'élevage dont la température est réguléepar l'énergie produite par des panneaux photovoltaïques



FigureIII 2: : Schéma de fonctionnement d'un séchage en granges avec panneaux solaires thermiques (Credits: Cogen Air-Base innovation)

Chapitre III : Intégration de l'énergie solaire dans les systèmes d'élevage de volaille

D'autres cas d'autoconsommation de l'électricité, produite par des panneaux photovoltaïques en toiture à des fins agricoles, peuvent être rencontrés, chauffage des locaux, ventilation, éclairage, bloc traite. Ils n'ont pas été étudiés ici

Un unique modèle d'affaires existe pour ce système: l'exploitant agricole investit dans l'installation de panneaux photovoltaïques sur un de ses bâtiments (existant ou neuf). Il consomme une partie de l'énergie solaire produite et vend le surplus (injection sur le réseau). L'autoconsommation couvre généralement entre 30% et 80% des besoins énergétiques de l'exploitation (variable selon le type d'exploitation)

III.6.3. Atouts

La pose de panneaux en toiture de bâtiment n'implique pas de difficultés sur le partage de la lumière: elle est utilisée uniquement pour produire de l'énergie. Les principaux avantages apportés par les panneaux en toiture sont d'ordre économique ces projets permettent de réduire certains coûts d'exploitation, voire de générer des revenus complémentaires puisque l'exploitant peut investir lui-même et à 100% dans son installation, ils apportent ainsi une certaine autonomie énergétique à l'exploitation (indépendance vis-à-vis du prix de l'énergie)Par ailleurs, lorsque les panneaux sont installés sur du bâti existant, ces projets n'ont aucun impact sur l'occupation des sols

III.6.4. Faiblesses et menaces

Les investissements sont relativement importants pour les agriculteurs, et la rentabilité du projet est directement conditionnée par le taux d'autoconsommation. En outre, ces projets peuvent générer une artificialisation des sols lorsqu'un nouveau bâtiment est construit spécifiquement pour le projet

III.6.5. Pratiques d'intérêt

Chapitre III : Intégration de l'énergie solaire dans les systèmes d'élevage de volaille

Une étude analysant les consommations électriques et les besoins de l'exploitant doit permettre de déterminer l'opportunité d'un tel système, en identifiant le dimensionnement du projet et son taux d'autoconsommation avant d'engager l'exploitant dans un investissement financier de ce type de projet. Sous réserve de surfaces de toitures compatibles suffisantes et d'un besoin en autoconsommation compatible pour assurer sa rentabilité, ce système est adaptable pour une large gamme d'exploitations agricoles.

III.7 Élevage sous ombrière ou serre photovoltaïque

III.7.1. Description du système et modèles d'affaires rencontrés

Le système consiste en une production animale sous ombrière photovoltaïque fixe ou tout autre PV surélevés d'au moins 2m. Parmi les entretiens réalisés, deux types d'élevage ont été analysés : des poules pondeuses sous ombrières et une installation encore au stade de projet, d'élevage porcin sous serre multichapelle. Dans l'ensemble des cas rencontrés, les structures photovoltaïques sont aménagées bâtiment d'élevage. Les panneaux PV, quant à eux, sont orientés au sud

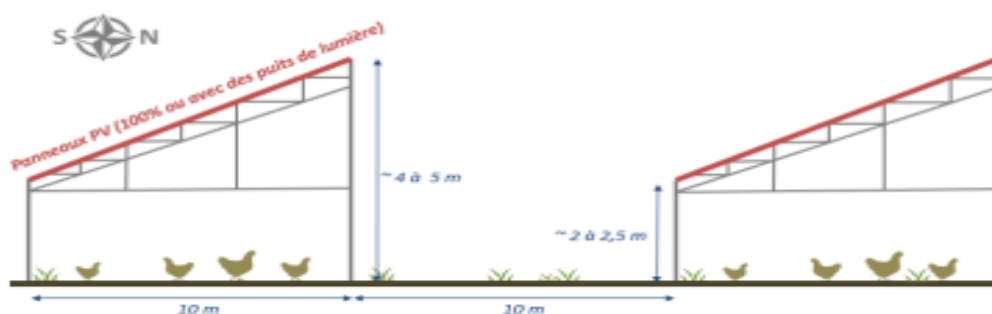


Figure III 3. Schéma des dimensions des ombrières monopentes avec des élevages avicoles

Chapitre III : Intégration de l'énergie solaire dans les systèmes d'élevage de volaille

Dans ces installations, la face recouverte de panneaux photovoltaïques peut contenir des puits de lumière. Dans les cas rencontrés, les ombrières n'ont pas de parois latérales en verre. En revanche, des filets brise vents peuvent être installés autour de l'ombrière servant de poulailler principal. Ces filets peuvent être retirés ou installés en fonction des besoins de l'agriculteur pour orienter les animaux vers une partie ou l'autre de son terrain

Dans le cas des élevages avicoles, une des ombrières est aménagée en poulailler, tandis que les autres servent de protection sur les parcours. Le poulailler est localisé au milieu du terrain, comme représenté dans le schéma ci-dessous

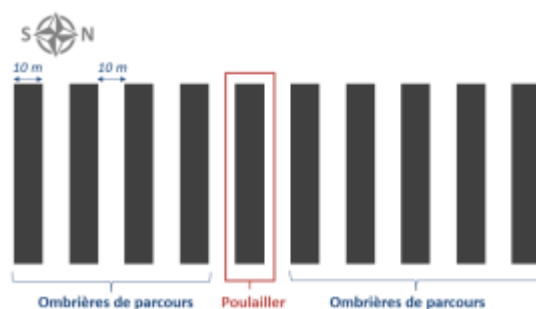


Figure III 4: Vue du dessus d'un parcours avicole

Un projet d'élevage porcin sous serre multichapelle a également été interrogé. Les dimensions de la structure sont représentées ci-dessous:

Chapitre III : Intégration de l'énergie solaire dans les systèmes d'élevage de volaille

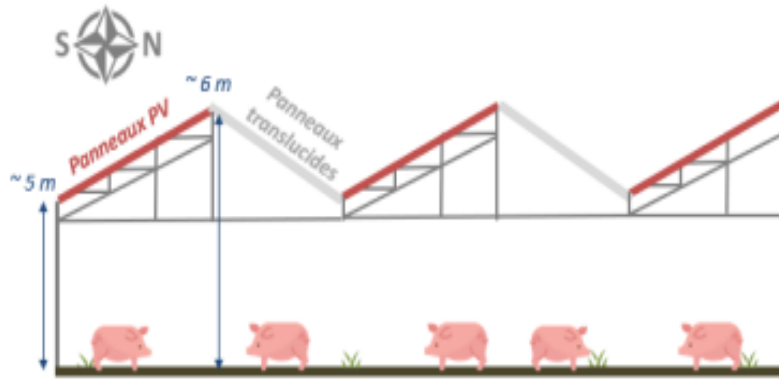


Figure III5: Schéma des dimensions des serres multichapelles avec élevage porcin

III.7.2. Atouts

Le principal intérêt de ces systèmes est qu'ils permettent l'apport d'un matériel technique sans en faire supporter l'investissement aux agriculteurs, avec des coûts limités. Les élevages n'étant pas directement dépendant de la photosynthèse (avec une mobilité possible des animaux), il n'y a pas de tension majeure sur le partage de la lumière avec la production photovoltaïque. En outre, les structures photovoltaïques peuvent être adaptées à différents types de production.

III.7.3. Faiblesses et menaces

Les bénéfices sont liés à l'apport d'une structure qui pourrait être déployée, techniquement, sans panneaux photovoltaïques. La qualité de l'ombrage pour les animaux reste à caractériser/comparer par rapport à un ombrage naturel. L'installation de telles structures (en trop grand nombre ou densité), notamment sur les zones de parcours, peuvent remettre en cause certains débouchés (sous SIQO) pour les productions agricoles. Ainsi, certaines exploitations rencontrées ne respectent pas les recommandations du SYNALAF (cf livrable «Etat de l'art bibliographique») concernant les parcours de volaille de chair Label Rouge, IGP et biologiques et pourraient ne plus être éligibles à l'avenir.

Chapitre III : Intégration de l'énergie solaire dans les systèmes d'élevage de volaille

Aussi, l'installation des structures peut avoir un impact potentiellement fort sur le parcellaire de l'exploitation: il apparaît ainsi nécessaire de bien penser en amont les évolutions potentielles de l'exploitation (alimentation animale, parcours).

.III.7.4. Pratiques d'intérêt

Certains retours d'expérience ont montré une prise en compte des besoins des agriculteurs dans la conception et la modulation des structures photovoltaïques, notamment sur le calepinage des structures (hauteurs et positionnement des panneaux). D'autre part, les ombrières photovoltaïques peuvent aussi être adaptées pour le travail avec des engins agricoles. Dans certains cas, les projets photovoltaïques permettent de valoriser des zones qui étaient auparavant considérées comme des friches.

III.8.Le chauffage des porcheries

III.8.1 Introduction

Le chauffage des porcheries représente un enjeu majeur pour le confort des animaux et la rentabilité des exploitations. Avec l'augmentation des coûts de l'énergie, de plus en plus d'éleveurs optent pour des solutions solaires thermiques. Fengtech propose une technologie innovante qui permet de chauffer les installations agricoles tout en réduisant la consommation d'énergie fossile. Grâce à ses chauffe-eaux solaires performants, Fengtech assure une production efficace d'eau chaude solaire et contribue à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Chapitre III : Intégration de l'énergie solaire dans les systèmes d'élevage de volaille



Figure III 6: Chauffe-eau solaire

III.8.2. Pourquoi opter pour un chauffage solaire en porcherie ?

L'installation d'un chauffage solaire en porcherie offre de nombreux avantages tant sur le plan économique qu'environnemental. Grâce à la technologie innovante de Fengtech, les exploitants agricoles peuvent bénéficier d'un système performant permettant de chauffer l'eau et les bâtiments tout en réduisant leur dépendance aux énergies fossiles. Cette solution apporte une réponse durable aux défis énergétiques actuels et assure un meilleur confort pour les animaux.

-Réduction de la consommation d'énergie fossile

L'utilisation d'un chauffe-eau solaire permet de diminuer la dépendance au fioul, au gaz et à l'électricité, assurant ainsi une autonomie énergétique aux exploitations agricoles.

-Impact environnemental positif

Les solutions Fengtech, en exploitant l'énergie solaire thermique, réduisent l'empreinte carbone des bâtiments agricoles tout en fournissant une eau chaude fiable pour les besoins des élevages.

Chapitre III : Intégration de l'énergie solaire dans les systèmes d'élevage de volaille

-Fonctionnement d'un chauffe-eau solaire Fengtech pour porcheries

Le chauffe-eau solaire Fengtech repose sur une technologie avancée qui capte l'énergie du soleil pour chauffer l'eau utilisée dans les élevages porcins. Ce système, composé de capteurs solaires et d'un réservoir de stockage thermique, permet une distribution efficace de la chaleur au sein des porcheries. Il s'intègre facilement aux infrastructures existantes et garantit un approvisionnement stable en eau chaude tout au long de l'année. Grâce au stockage situé en haut du capteur, la chaleur peut être apportée la nuit au sein de l'élevage.

-Capteurs solaires thermiques et stockage de chaleur

Les capteurs solaires Fengtech, intégrant des tubes hauts performance, captent efficacement l'énergie solaire et la transforment en chaleur.

-Intégration au système de chauffage existant

Le fluide caloporteur chauffe un ballon d'eau qui est ensuite redistribué dans les zones de post-sevrage des porcs ou dans les salles de maternités, garantissant un chauffage homogène et efficace.

III.9.-Exploitations avicoles utilisant l'énergie solaire :

III.9.1. Granja Finet – Catalogne, Espagne

Type de projet : Nouvelle ferme avicole avec technologie solaire intégrée

Capacité d'élevage : 40 000 poules et 4 000 coqs

Investissement : 4 millions d'euros

Objectif : Contrôle climatique pour améliorer le bien-être animal

Particularité : Système de ventilation et de climatisation alimenté par solaire

Francisco Blasco, concepteur du système, et son équipe d'Iser Smart Energy, qui ont travaillé en partenariat avec Bet Solar, ont été confrontés à des défis considérables pour calculer les besoins énergétiques de l'installation, notamment parce qu'il existe très peu d'exemples de ce type d'installation à cette échelle.

Chapitre III : Intégration de l'énergie solaire dans les systèmes d'élevage de volaille



Figure III 7 Élevage de poulets à l'énergie solaire

Un agriculteur espagnol – Casa Nilo SL – a investi 4 millions d'euros dans la création du plus grand poulailler privé de la province catalane de Lleida. Situé à Arbeca, 40 000 oiseaux nicheurs et 4 000 coqs sont libres de parcourir le sol d'un hangar d'élevage à température contrôlée, alimenté par l'énergie solaire.

Les poulets sont élevés dans une atmosphère à température contrôlée entre 23°C et 24°C en hiver, jusqu'à un maximum de 26°C en été.

La nouvelle ferme, connue sous le nom de Granja Finet, s'ajoute à deux autres fermes appartenant à Josep Carrera, situées à Els Alamún et Vila-sana. Ce dernier investissement porte son stock à plus de 130 000 oiseaux, mais il s'agit de sa première aventure dans l'agriculture hors réseau fonctionnant à l'énergie solaire.

La nouvelle ferme, connue sous le nom de Granja Finet, s'ajoute à deux autres fermes appartenant à Josep Carrera, situées à Els Alamún et Vila-sana. Ce dernier investissement porte son stock à plus de 130 000 oiseaux, mais il s'agit de sa première aventure dans l'agriculture hors réseau fonctionnant à l'énergie solaire.

Chapitre III : Intégration de l'énergie solaire dans les systèmes d'élevage de volaille



Figure III 8 Élevage de poulets à l'énergie solaire

Francisco Blasco, concepteur du système, et son équipe d'Iser Smart Energy, qui ont travaillé en partenariat avec Bet Solar, ont été confrontés à des défis considérables pour calculer les besoins énergétiques de l'installation, notamment parce qu'il existe très peu d'exemples de ce type d'installation à cette échelle.

Señor Blasco déclare : « Nous n'étions pas très clairs sur les besoins de stockage pour pouvoir avoir de l'énergie la nuit, et aussi sur les différences de consommation tout au long de l'année. Ainsi, les données d'autres fermes plus anciennes ont été prises, puis surdimensionnées de manière prudente. Étant l'une des plus grandes exploitations de ce type en Espagne – et dans cette partie de l'Europe – il était prudent d'installer un système auxiliaire composé de plusieurs générateurs diesel pour éviter les problèmes. Les résultats, en termes de puissance des onduleurs et du parc photovoltaïque, ont été très réussis.

Malgré une grande batterie de 370 kWh, ce chiffre s'est avéré insuffisant les jours les plus chauds de l'été en raison de la forte consommation d'énergie du système de refroidissement la nuit. Pour cette raison, la capacité de stockage d'énergie a été augmentée de 93 kWh supplémentaires, portant la batterie à 462 kWh.

L'installation comprend :

- 400 panneaux solaires offrant 180kWc
- 9 onduleurs/chargeurs Quattro 15kVa
- 4 onduleurs solaires Fronius 27kW
- 7 Régulateurs de charge SmartSolar 250/100A

Chapitre III : Intégration de l'énergie solaire dans les systèmes d'élevage de volaille

- 24 batteries au lithium BYD LVL 15,4 kWh d'une capacité totale de 370 kWh ont ensuite été étendues à 462 kWh



1. *Figure III 9 installations l'énergie solaire*

Il y a deux générateurs de secours : l'un de 350 kVA, l'autre de 180 kVA

Iser Smart Energy a vingt ans d'expérience dans la conception, la construction et la maintenance d'installations d'énergie solaire. Señor Blasco fait l'éloge de l'expérience de son équipe dynamique dans les installations hors réseau et liées au réseau.

III.9.2 Kuipers Breeders – Ghana

Type d'installation : Centrale solaire au sol de 378 kWc

Production estimée : 501 739 kWh/an

Objectif : Autonomie énergétique et réduction de l'empreinte carbone

Résultats :

1. Réduction de 5 052 tonnes de CO₂ sur la durée de vie du système

Chapitre III : Intégration de l'énergie solaire dans les systèmes d'élevage de volaille

2. Moins de coupures de courant, stabilité de la chaîne de production
3. Diminution des coûts liés au diesel

Une installation solaire conçue pour réduire les émissions de carbone et fournir une énergie stable et propre à un élevage de volailles a récemment été installée par Dutch & Company.

Dutch & Co. a été désigné par Kuipers Breeders Ghana plus tôt cette année pour concevoir, concevoir, fournir et construire la solution solaire photovoltaïque au sol de 378 KWc dans sa ferme de Sege, dans le district de Dangme East, dans la région du Grand Accra au Ghana.

Kuipers Breeders Ghana, une entreprise leader dans le secteur de la volaille au Ghana, a mis en service l'installation solaire photovoltaïque dans le but de répondre à ses besoins énergétiques tout en protégeant l'environnement.

La nouvelle installation solaire au sol devrait générer 501 739 kWh d'électricité verte, stable et propre au cours de sa première année d'exploitation, et plus de 11 500 000 kWh au cours de sa durée de vie. La production d'énergie du système solaire équivaut à l'électrification de 670 ménages. De plus, l'empreinte carbone de Kuipers Breeders Ghana sera réduite à 5 052 tonnes d'émissions de CO₂.

Commentant ce nouveau développement, M. Moses Aidoo, directeur général de Kuipers Breeders Ghana, a déclaré : « Nous sommes ravis d'avoir investi dans ce projet historique. L'énergie solaire est la solution qui nous convient, non seulement parce qu'elle nous permet de réaliser des économies d'énergie, mais aussi parce qu'elle stabilise notre approvisionnement en énergie, ce qui est essentiel à nos opérations. De plus, le passage à l'énergie solaire signifie que nous souscrivons à

des protocoles internationaux, ce que nous voulons faire en tant qu'entreprise respectueuse de l'environnement.

Analyse des résultats obtenus en termes de réduction des coûts énergétiques et de productivité.

. Stabilité énergétique = planification facilitée

Dans les zones où l'électricité est instable (Afrique, Asie), l'énergie solaire permet :

1. D'éviter les pertes liées aux coupures de courant
2. De stabiliser les coûts de production (pas de fluctuation des prix du carburant)

Chapitre III : Intégration de l'énergie solaire dans les systèmes d'élevage de volaille

3. De se prémunir contre les hausses des tarifs énergétiques

III.10 Amélioration de la productivité

III.10.1. Conditions optimales pour les volailles

Les exploitations solaires utilisent l'électricité produite pour :

1. Maintenir la température constante grâce à des systèmes de ventilation, chauffage ou refroidissement automatisés
2. Alimenter les systèmes de lumière artificielle régulant les cycles biologiques
3. Assurer l'accès continu à l'eau fraîche grâce aux pompes solaires

Résultat : réduction du stress thermique, meilleure croissance, moins de mortalité

III.10.2. Régularité de la production

- * Pas d'interruption de production (éclairage, alimentation, incubation) due à des pannes électriques
- * Meilleure planification des cycles de reproduction
- * Moins de pertes d'œufs ou de poussins, donc meilleur rendement global

III.10.3. Réduction des coûts énergétiques

Kuipers Breeders (Ghana) :

1. Installation de 378 kWc (501 739 kWh/an)
2. Réduction estimée des coûts énergétiques : **30 à 40 %**
3. Diminution de la dépendance aux groupes électrogènes (fioul)

Premium Poultry Farm (Nigeria) :

- 1.
2. .303
3. Permet le fonctionnement continu des incubateurs, lampes chauffantes et systèmes de ventilation

Chapitre III : Intégration de l'énergie solaire dans les systèmes d'élevage de volaille

Ces exemples illustrent comment l'intégration de l'énergie solaire dans les exploitations avicoles peut conduire à des économies substantielles, améliorer le bien-être animal et réduire l'impact environnemental.

Chapitre IV
Résultats et discussions

IV.1. Introduction

La méthode de dimensionnement consiste à déterminer d'abord la puissance crête d'un panneau photovoltaïque qui fournit l'énergie électrique nécessaire pendant la journée. Elle consiste à déterminer la période de besoin en électricité, et la consommation requise. Cette étape comporte peu de calculs, mais demande relativement beaucoup de réflexion car une erreur à ce stade peut rendre l'installation photovoltaïque obsolète.

IV .2. Définition du logiciel PVsyst version 7.4 :

PVsyst est un logiciel de simulation et de modélisation de systèmes photovoltaïques (PV) de premier plan. Il est largement utilisé par les architectes, ingénieurs, chercheurs et éducateurs pour concevoir, optimiser et analyser des installations PV avec précision. Voici une présentation détaillée de ses fonctionnalités principales :

IV .2.1. Conception du Système :

➤ Systèmes Connectés au Réseau :

Modélisation précise des systèmes solaires intégrés au réseau, incluant la gestion de l'autoconsommation, le stockage sur réseau, et les limitations du réseau.

➤ Systèmes Autonomes :

Calcul des besoins en énergie pour les systèmes isolés, incluant le dimensionnement des panneaux solaires et des batteries.

➤ Systèmes de Pompage :

Dimensionnement des systèmes de pompage solaire hors réseau, prenant en compte les besoins en eau et les conditions de pompage.

IV .2.2. Bases de Données :

➤ Données météorologiques :

Génération de fichiers de données horaires synthétiques, importation de données météorologiques à partir de sources multiples, et gestion des sites géographiques.

➤ Composants PV :

Gestion complète des bases de données de modules PV, d'onduleurs, et d'autres composants, permettant une flexibilité maximale dans la conception des systèmes.

IV .2.3. Choix de Type de Support, Inclinaison et Orientation :

➤ Type de Support (Plan) :

PVsyst offre la possibilité de choisir parmi différents types de supports pour les panneaux solaires, y compris les supports fixes et les trackers (suiveurs) solaires.

➤ Inclinaison et Orientation (Azimut) :

Les utilisateurs peuvent définir l'inclinaison des panneaux pour optimiser la capture d'énergie en fonction de la latitude et des conditions locales. L'orientation, ou azimut, peut également être ajustée pour maximiser l'exposition solaire tout au long de la journée.

IV .2.4. Outils Avancés et Utilitaires :

➤ Simulation Horaires Détaillées :

Analyse fine des systèmes PV, prenant en compte les pertes thermiques, les pertes de câblage, la qualité des modules, et les pertes d'angle d'incidence.

➤ Évaluation Économique :

Calcul du Coût Nivelé de l'Énergie (LCOE), de la Valeur Actuelle Nette (NPV), et d'autres indicateurs financiers pour évaluer la rentabilité des projets.

IV .2.5. Modélisation 3D et Maquette :

➤ Conception 3D :

PVsyst permet la création de maquettes en 3D, facilitant ainsi la visualisation et l'optimisation des installations.

➤ Gestion des Ombrages :

Outils avancés pour modéliser les ombrages, incluant l'importation de fichiers 3D et la possibilité de définir la direction des axes des trackers.

IV .3. Les différentes étapes suivies pour effectuer la simulation d'un système PV autonome (off grid) :

IV .3.1. Choisir une conception d'un système isolé :

Le choix du type de conception pour un système photovoltaïque (PV) est crucial car il détermine directement les performances, la fiabilité et l'efficacité énergétique de l'installation.

Chaque type - qu'il s'agisse d'un système isolé, connecté au réseau ou destiné au pompage d'eau - présente des spécificités techniques et des exigences particulières.

Puisque ce mémoire traite une installation autonome, donc nous allons choisir une conception isolée avec batteries comme le montre la figure (IV.1).

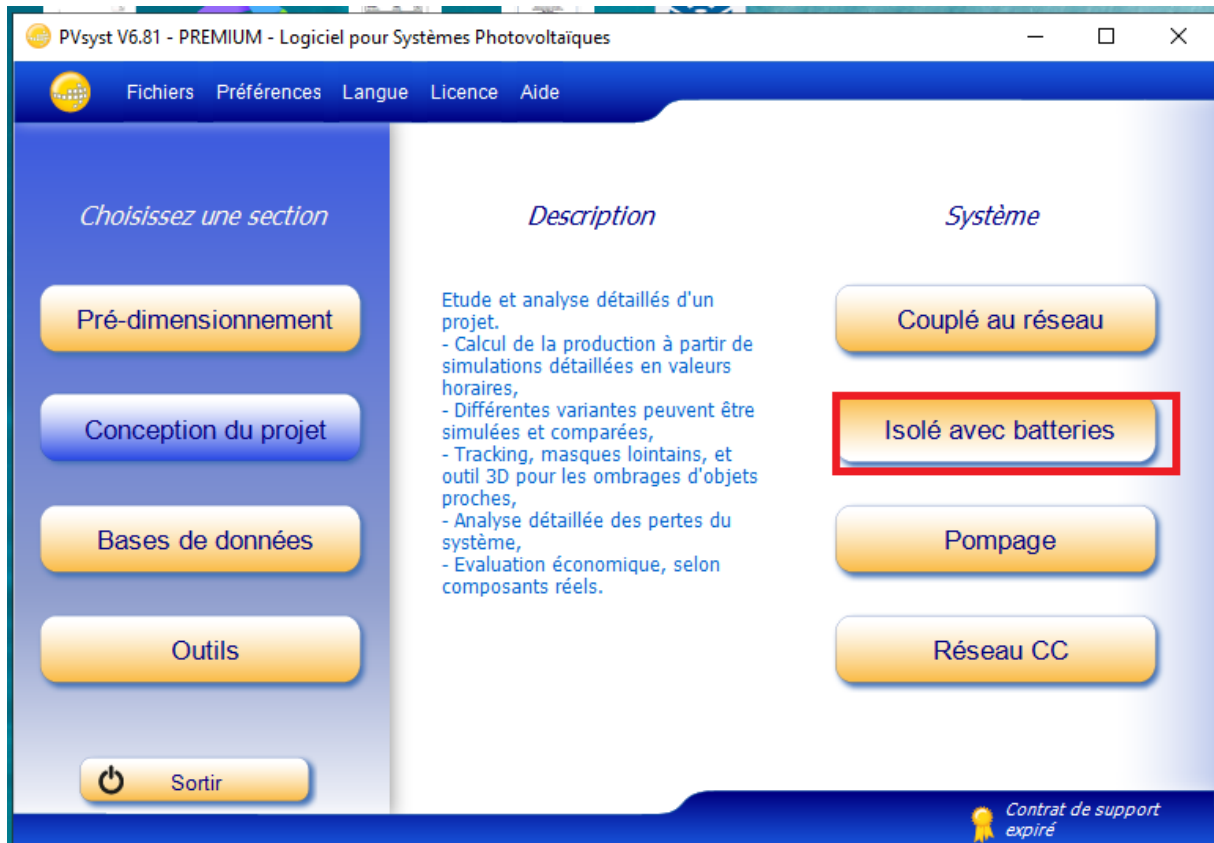


Figure IV.1 illustrant les différentes conceptions PV existantes dans le logiciel PVsyst

IV .3.2.Nomination du projet et localisation géographique du site :

Dans le cadre du processus de conception d'un système photovoltaïque (PV) à l'aide du logiciel de simulation, la nomination du projet et la sélection précise de son site géographique revêtent une importance cruciale. La nomination du projet permet de définir clairement les objectifs et les paramètres spécifiques qui orienteront toute l'analyse et la modélisation à suivre (voir la figure IV.2).

En parallèle, la localisation géographique du site influence directement les données climatiques et météorologiques utilisées par le logiciel pour simuler les performances du système PV. Des paramètres tels que l'ensoleillement et la température ambiante sont essentiels pour calculer avec précision la production d'énergie attendue et évaluer la rentabilité du projet.

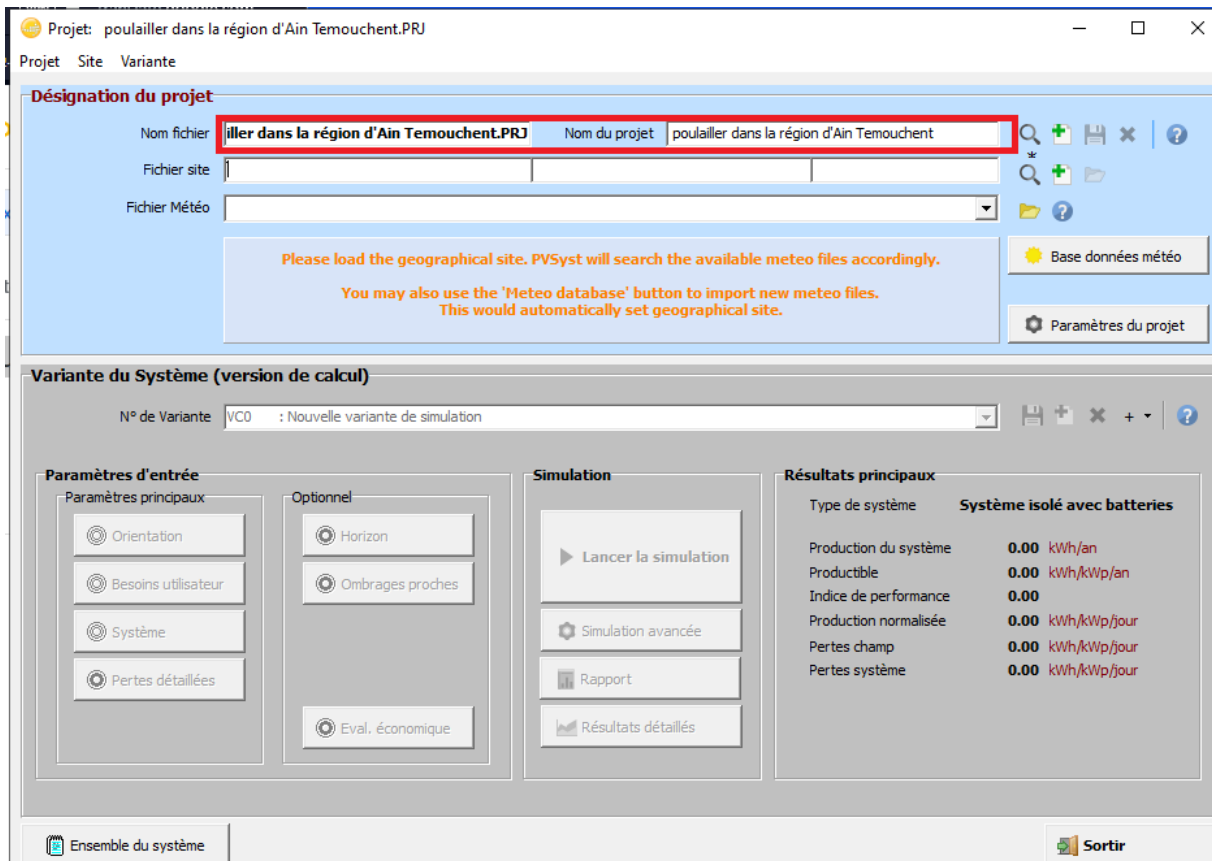


Figure IV.2 illustrant le nom attribué au projet (installation PV off grid pour poulailler dans la région d'Ain Temouchent)

Une fois que nous avons validé le point sélectionné le logiciel va importer toutes les données géographiques et climatiques de la wilaya d'Ain Temouchent à partir de l'une des bases de données contenues (voir les figures IV.3 et IV.4).

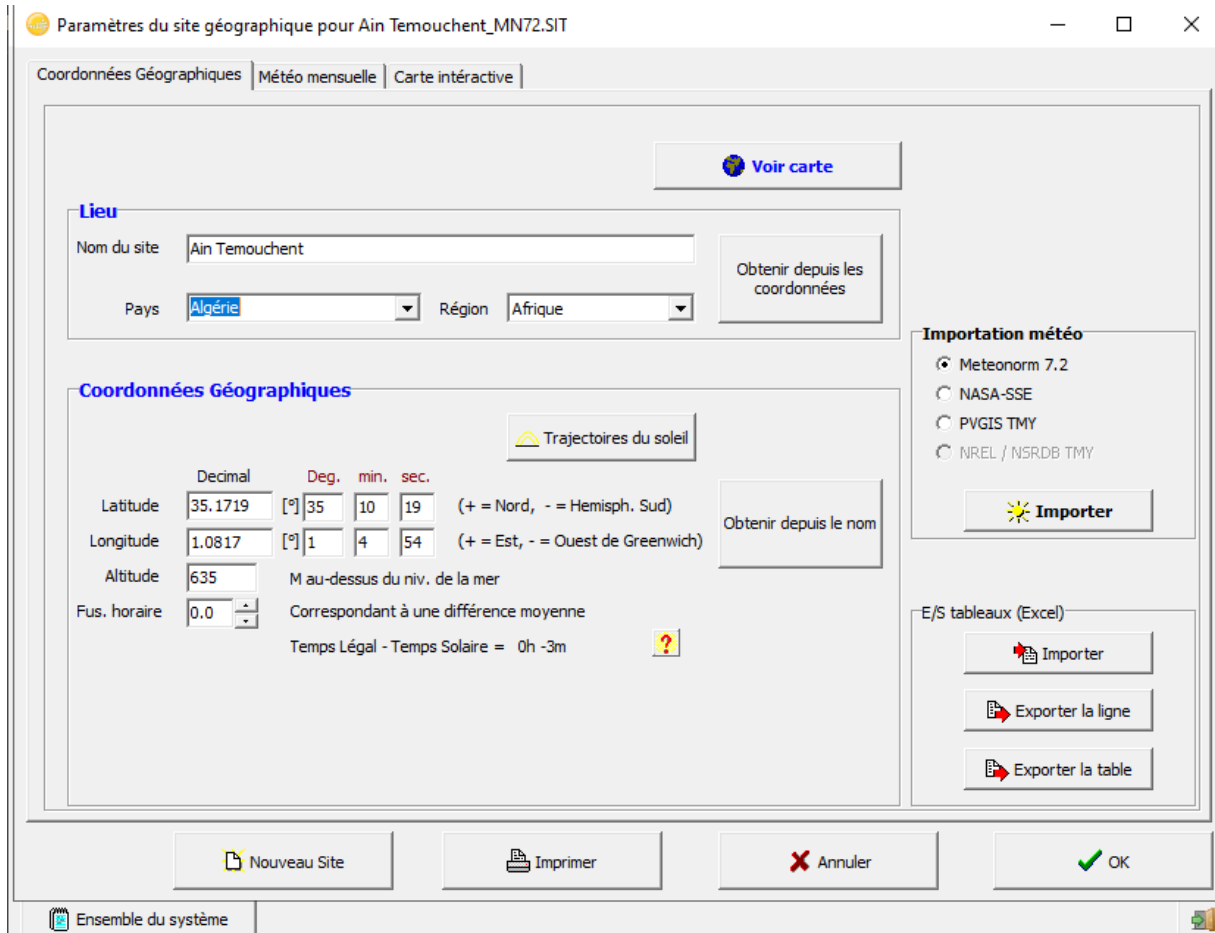


Figure IV.3 : Coordonnées géographiques de la wilaya d'Ain Temouchent

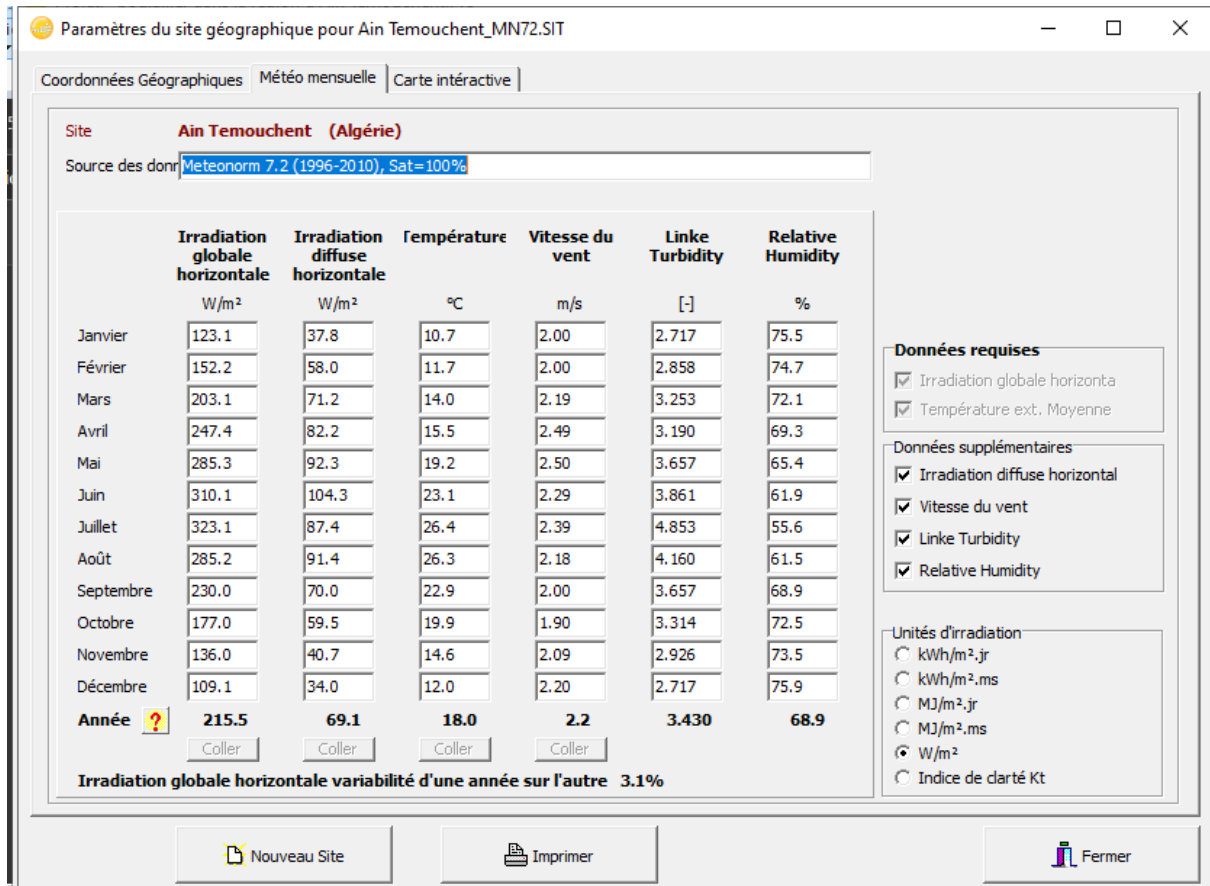


Figure IV.4 illustrant les différentes coordonnées météorologiques de la wilaya d'Ain Temouchent importées à partir de la base de données Métronome 7.2.

IV .3.3. Évaluation des besoins énergétique de la installation PV off grid pour poulailler dans la région d'Ain Temouchent (bilan de puissance) :

L'évaluation des besoins énergétiques est une étape cruciale dans la conception d'un système photovoltaïque (PV) permettant de déterminer la quantité exacte d'énergie requise pour répondre aux besoins spécifiques poulailler dans la région d'Ain Temouchent.

En comprenant précisément la consommation énergétique, il est possible de dimensionner correctement le système PV, en choisissant la capacité des panneaux PV et des batteries de stockage appropriée Une évaluation précise des besoins énergétiques assure non seulement l'efficacité et la fiabilité du système, mais également sa rentabilité à long terme, en évitant les surdimensionnements coûteux ou les sous-dimensionnements qui pourraient engendrer une insuffisance en matière d'électricité.

Le poulailler dans la région d'Ain Temouchent est équipé des récepteurs électriques indiqués sur la figure IV.5 avec leur nombre, leur puissance et leur utilisation journalière.

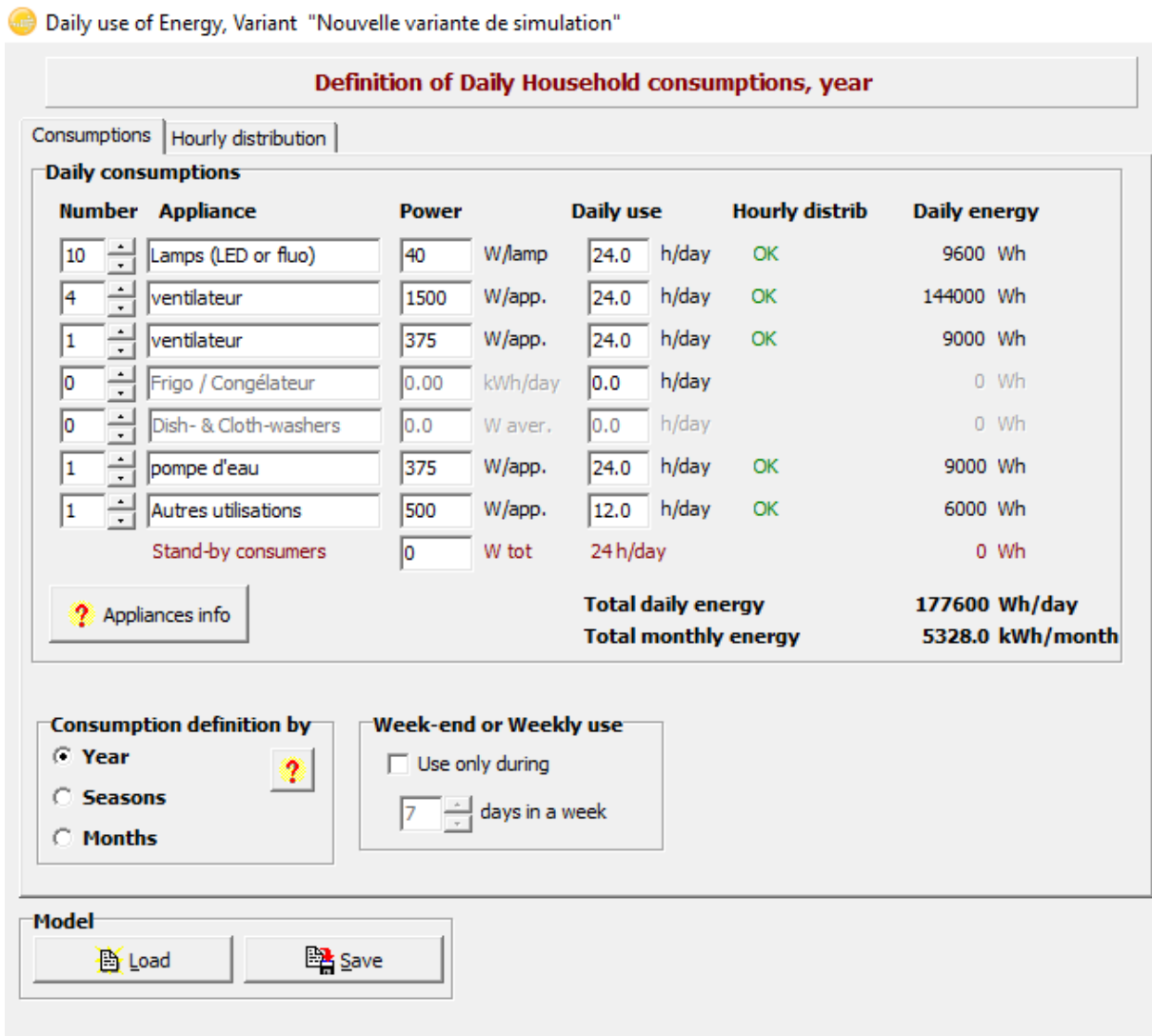


Figure IV.5 : illustrant les besoins énergétiques de poulailler dans la région d'Ain Temouchent

IV .3.4.Choix du type de support, orientation et inclinaison des modules Photovoltaïques :

L'inclinaison et l'orientation optimales des modules photovoltaïques (PV) sont des facteurs déterminants pour maximiser la production d'énergie solaire. Pour déterminer l'inclinaison idéale, il est recommandé d'ajuster l'angle des modules en fonction de la latitude du site. Quant à l'orientation, elle diffère selon l'hémisphère, Dans l'hémisphère nord les modules doivent être orientés plein sud pour capter le maximum de rayonnement solaire, en revanche, dans l'hémisphère sud, les modules doivent être orientés plein nord pour une

exposition optimale au soleil. Dans le cas de notre installation PV nous avons choisi un support fixe, une orientation plein sud puisque d'Ain Temouchent est située à l'hémisphère nord et une inclinaison de 35° qui correspond à sa latitude. Ces données ont été validées par le logiciel car elles n'ont généré aucune perte liée à ces paramètres (voir la figure IV.6).

Orientation, Variante "Nouvelle variante de simulation"

Type de champ

Paramètres du champ

Inclinaison plan [°]

Azimut [°]

Inclin. 35°

Azimut 0°

Ouest Est

Sud

Optimisation par rapport à

Irradiation annuelle ?

Été (Avr-Sept)

Hiver (Oct-Mars)

Meteo incidente annuelle

Facteur de Transposition	1.17
Perte par rapport à l'optimum	0.0%
Global sur plan capteurs	2202 kWh/m²

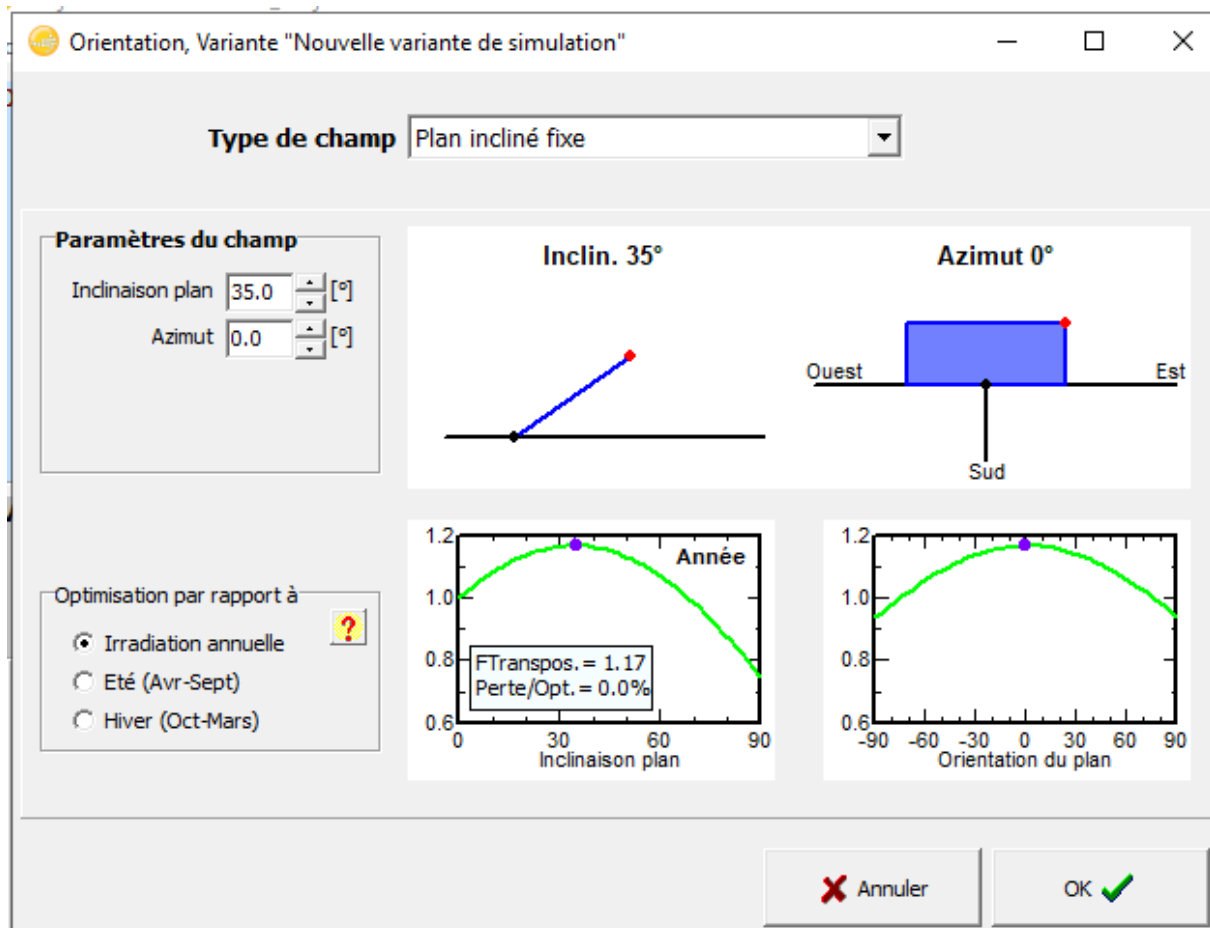


Figure IV.6 : Orientation, inclinaison optimales des modules PV et le type de support

IV .3.5.Dimensionnement du générateur photovoltaïque :

Cette étape consiste à déterminer le nombre de modules photovoltaïques qu'il faut utiliser pour atteindre la puissance dimensionnée (puissance calculée avec facteur de sécurité). Avant d'entamer ce calcul, il est important de définir le type du module photovoltaïque utilisé, ses caractéristiques, performances énergétiques et dimensions (voir les figures IV.7et IV.8).

Définition d'un module PV

Données de base | Dimensions et Technologie | Paramètres modèle | Données additionnelles | Commercial | Graphiques

Modèle: BIFACIAL Fabricant: Jinko

Nom fichier: mono 720 w.PAN Source données: []

Paramètres définis par l'utilisateur

Puissance no: 720.0 Wp Tol. +/-: -3.0 3.0 % Technologie: Si-mono

Specifications fabricant ou autres mesures

Cond. de référence	GRef	1000	W/m ²	TRef	25	°C
Courant de court-circuit	Isc	18.670	A	Circuit ouvert Vco	49.04	V
Point de Puissance max.	Imp	17.610	A	Vmpp	40.89	V
Coefficient de température	muIsc	8.4	mA/°C	Nbre cellules 66 x 2		
	ou muIsc	0.045	%/°C			

Résumé du modèle

Paramètres principaux

R parall. 6379 ohm

R série model 0.01 ohm
R série max. 0.17 ohm
R série apparent 0.16 ohm

Paramètres modèle

Gamma 1.637
IoRef 392.53 nA
µVco -110 mV/°C

Résultats du modèle interne

Conditions de fonctionnement: GOper 1000 W/m² TOper 25 °C

Point de Puissance max. Pmpp 720.4 W/m² de température -0.28 %/°C
 Courant Imp 17.50 A Tension Vmpp 41.2 V
 Courant de court-circuit Isc 18.67 A Circuit ouvert Vco 49.0 V
 Efficacité / Surf. cellules N/A % / Surf. module 23.14 %

Voir optimisation Export vers table Imprimer Annuler OK

Figure IV.7 : illustrant le type et les caractéristiques du module PV utilisé

Cette figure indique les caractéristiques et les performances énergétiques du modules photovoltaïques aux conditions STC (AM 1.5, G = 1000W /m², T = 25°C).

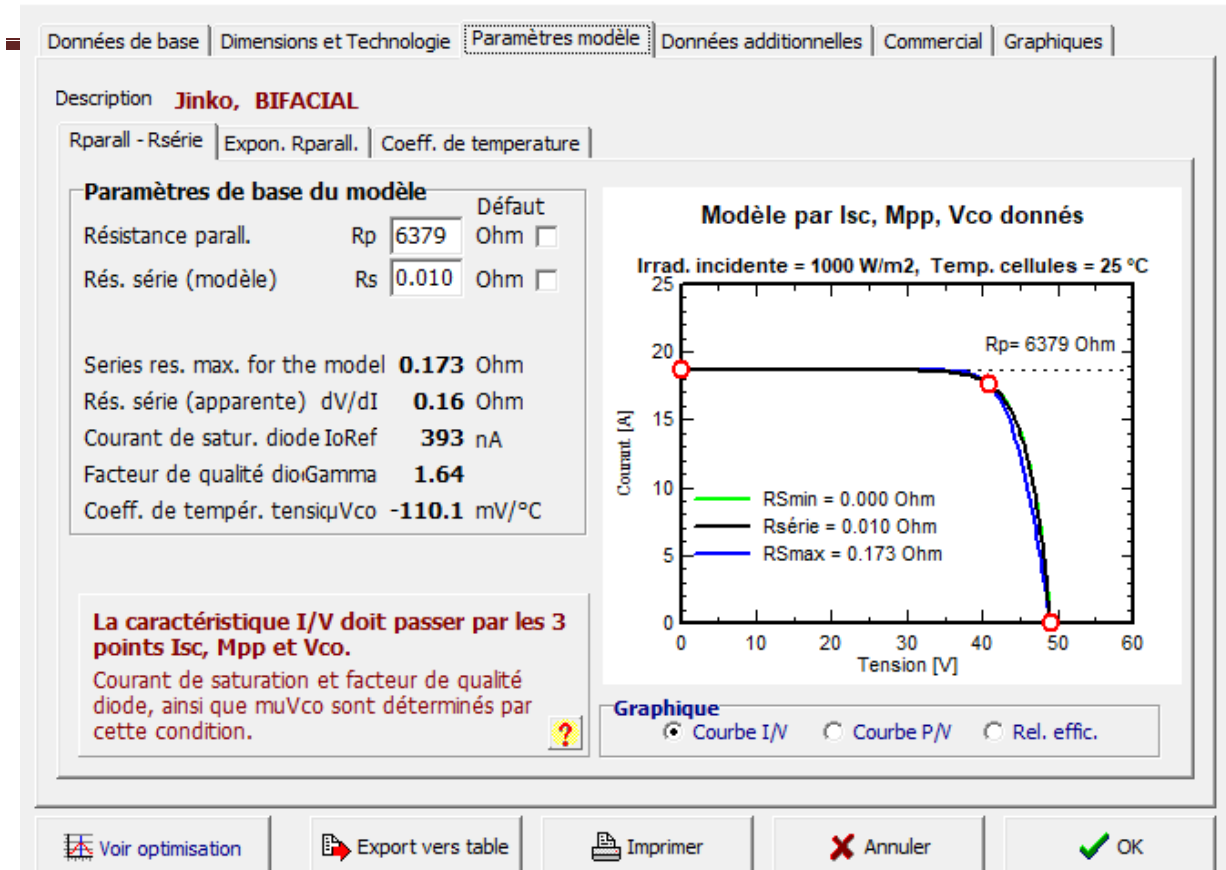


Figure IV.8 : illustrant la courbe caractéristique I(V) du module PV choisi

➤ **Calcul du nombre de modules nécessaire (N_m) :**

On considère un panneau photovoltaïque de 34V/720W

Il développe 720 W \longrightarrow rayonnement solaire de 1000W/m²

x \longrightarrow Ain Temouchent rayonnement solaire de 522.59W/m²

$$x = \frac{720 \times 522.59}{1000} \quad x = 376.27 \text{ W}$$

Hiver : 8 heures d'ensoleillement par jour

$$8 \times 376.27 = 3010.1184 \text{ Wh/jour}$$

Pour optimiser notre générateur on se base sur l'hiver : 3010.1184Wh/j

$$\text{Nombre de panneau} = \frac{\text{puissance journalier de consommation}}{\text{puissance journalier produite}}$$

$$\text{Nombre de panneau} = \frac{177600}{3010.1184} \quad \text{Nombre de panneau} = 59$$

Définition d'un système isolé avec batteries, Variante "Nouvelle variante de simulation", Variant "Nouvell..."

Besoins utilisateur spécifiés | Suggestions de pré-dimensionnement | Résumé du système

Besoins jour. moyens Déf. la PLOL acceptable 5.0 %
 178 kWh/jour Déf. l'autonomie requise 2.0 jour(s)
 Tension batterie (et utilis.) 48 V
 Capacité conseillée 8706 Ah
 Puissance PV conseillée 42286 Wc (nom.)

Stockage | Champ PV | Appoint | Schéma simplifié

Nom et orientation du sous-champ
 Nom Champ PV
 Orient. Plan incliné fixe Inclinaison 35° Azimut 0°

Aide au dimensionnement
 Pas de prédim. Entrez Pnom désirée 42.8 kWp
 ... ou surface disponible 187 m2

Sélection du module PV
 Tous les modules Tri modules par Puissance Technologie
 Jinko 720 Wp 34V Si-mono BIFACIAL
 Dimens. des tensions : Vmpp (60°C) 37.0 V Voc (-10°C) 52.8 V

Choisissez le mode de régulation, et le régulateur
 Régulateur universel Tous les fabricants Convertisseur de puissance MPPT
Mode d'opération
 Couplage direct
 Convertisseur MPPT
 Convertisseur DCDC
 Courants max. de charge - décharge
 MPPT 1000 W 48 V 974 A 154 A Universal controller with MPPT conve G

Conception champ PV
Nombre de modules et chaînes
 Mod. en série 1 doit être: Pas de contrainte
 Nb. chaînes 59 doit être: entre 48 et 72
Nbre modules 59 Surface 184 m²

Conditions de fonctionnement:
 Vmpp (60°C) 37 V
 Vmpp (20°C) 42 V
 Voc (-10°C) 53 V
 Irradiance plan 1000 W/m2
 Imp (STC) 1034 A
 Isc (STC) 1114 A
 Isc (at STC) 1102 A
 Puiss. max. en fonctionnement à 1000 W/m² et 50°C 39.4 kW
Puiss. nom. champ (STC) 42.5 kWp

Figure IV.9 : illustrant le nombre des panneaux

Définition d'un module PV

Données de base | **Dimensions et Technologie** | Paramètres modèle | Données additionnelles | Commercial | Graphiques

Description **Jinko, BIFACIAL**

Module		Cellules	
Longueur	2386 mm	En série	66
Largeur	1305 mm	En parallèle	2
Épaisseur	33.0 mm	Surface cellule	N/A cm ²
Poids	37.50 kg	Nbre cellules tota	132
Surf. module	3.114 m ²	Surface cellules	N/A m ²

La définition des dimensions du module est obligatoire, utilisée pour la définition de l'efficacité "usuelle".
La surface des cellules est facultative, elle permet de définir l'efficacité au niveau de la cellule..

Tension champ max.
Tension maximale absolue du champ en toutes conditions (soit Voc aux températures les plus basses).
Tension maximum IEC: N/A V
Tension maximum UL (US): N/A V

Diode by-pass de protection
Nb. of sub-modules: 1 /module (i.e. functional by-pass diodes)
Partition sous-modules:
 En longueur Twin half cells
 En largeur Shingled cells

Module tuile
 CPV: module à concentration
 Module bifacial

Technologie et spécificités du module

Voir optimisation | Export vers table | Imprimer | Annuler | OK

Figure III.10 : illustrant le poids les dimensions du module PV choisi

IV .3.6.Dimensionnement du système de stockage :

Durant la phase de dimensionnement du système de stockage nous allons calculer le nombre de batteries indispensable pour assurer le stockage de toute l'énergie produite par le générateur photovoltaïque. Pour cela il est primordial de connaître toutes les informations nécessaires sur le type de batterie utilisé (capacité(Ah), la tension (V), profondeur de décharge (DoD en pourcentage)), voir la figure IV.11.

Figure IV.11 : illustrant les caractéristiques de la batterie Pb-acide à gel utilisée

Calcul de l'énergie que peut stocker une seule batterie Pb-acide notée E_S de $C = 200\text{Ah}$ / $U = 12\text{V}$:

$$E_S = C \times U = 200 \times 12 = 2400 \text{ Wh} = 2.4 \text{ kWh}$$

Calcul de l'énergie disponible à être fournie par la batterie (E_F) avec une profondeur de décharge (DoD) de 0.8409 : L'énergie stockée par la batterie ne peut être fournie qu'à 84.09%, soit 2018.16 Wh, car une décharge complète risque d'endommager la batterie.

$$E_F = \text{DoD} \times E_S = 0.8409 \times 2400 = 2018.16 \text{ Wh}$$

Détermination du nombre de batteries (Nb) nécessaire pour une autonomie de 2 jours :

$$\text{Nombre de batterie} = \frac{\text{énergie journalière totale} \times 2}{E_F} = \frac{177600 * 2}{2018.16} = 176$$

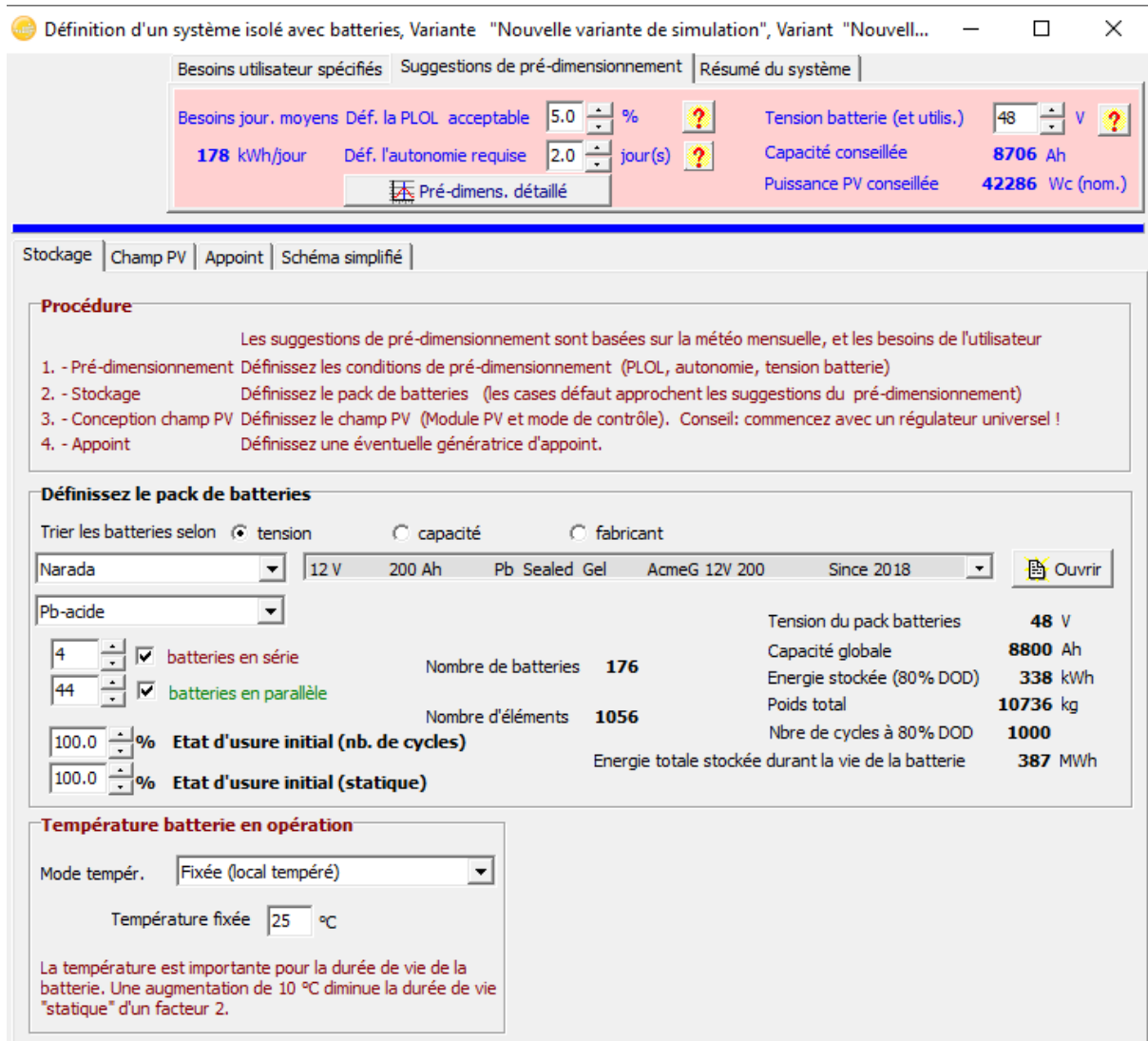


Figure IV.12 : illustrant le nombre des batteries

IV .3.7.Choix du régulateur de charge :

Dans ce cas, la tension du champ PV est beaucoup plus élevée que celle requise par le système de stockage, par conséquent il est approprié d'utiliser un régulateur de charge MPPT pour maximiser l'utilisation de la puissance produite par le générateur PV. Il est également essentiel de choisir un régulateur capable d'accepter une tension d'entrée supérieure à celle du

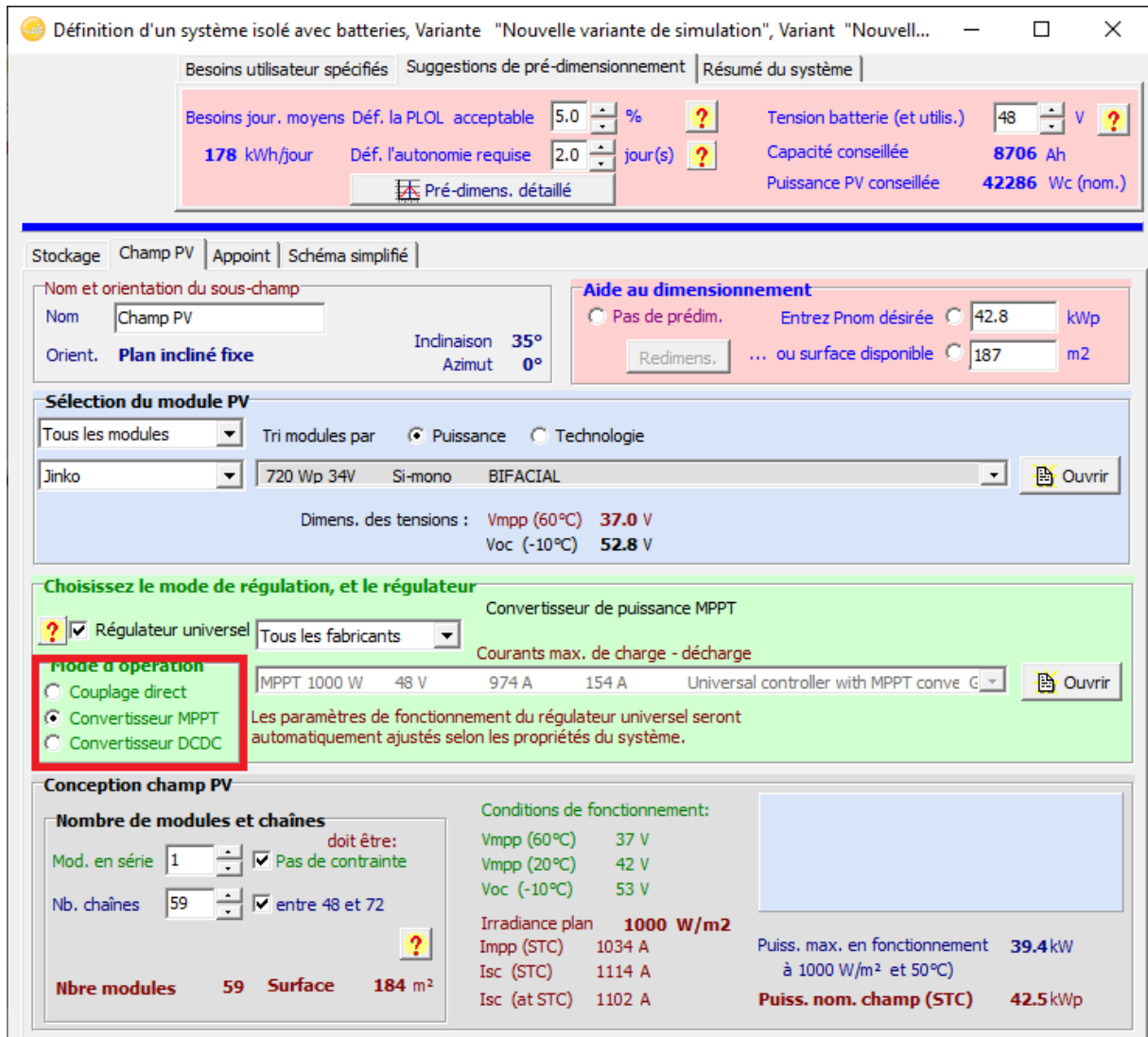


Figure IV.13 : illustrant le type de régulateur de charge choisi

IV .3.8. Dimensionnement de l'onduleur :

Les caractéristiques de l'onduleur utilisé doivent être compatibles avec une installation ayant une tension de 48 V.

La somme des puissances nominale donne $P_n = 7650 \text{ W}$, l'onduleur ne peut développer que 80% de sa puissance donc on peut déduire la puissance de l'onduleur :

$$P_n = 0.8 \times P_{\text{onduleur}}$$

$$P_{\text{onduleur}} = \frac{P_n}{0.8} = \frac{7650}{0.8} = 9562.5 \text{ W}$$

Donc on utilise un onduleur de 48V/ 10kW

Remarque

En réalité le courant des différents régulateurs et la puissance de l'onduleur ne dépassent pas centaine d'ampère. Alors, il faut utiliser un ensemble de régulateur et onduleurs qui vont assurer le bon fonctionnement de notre système photovoltaïque.

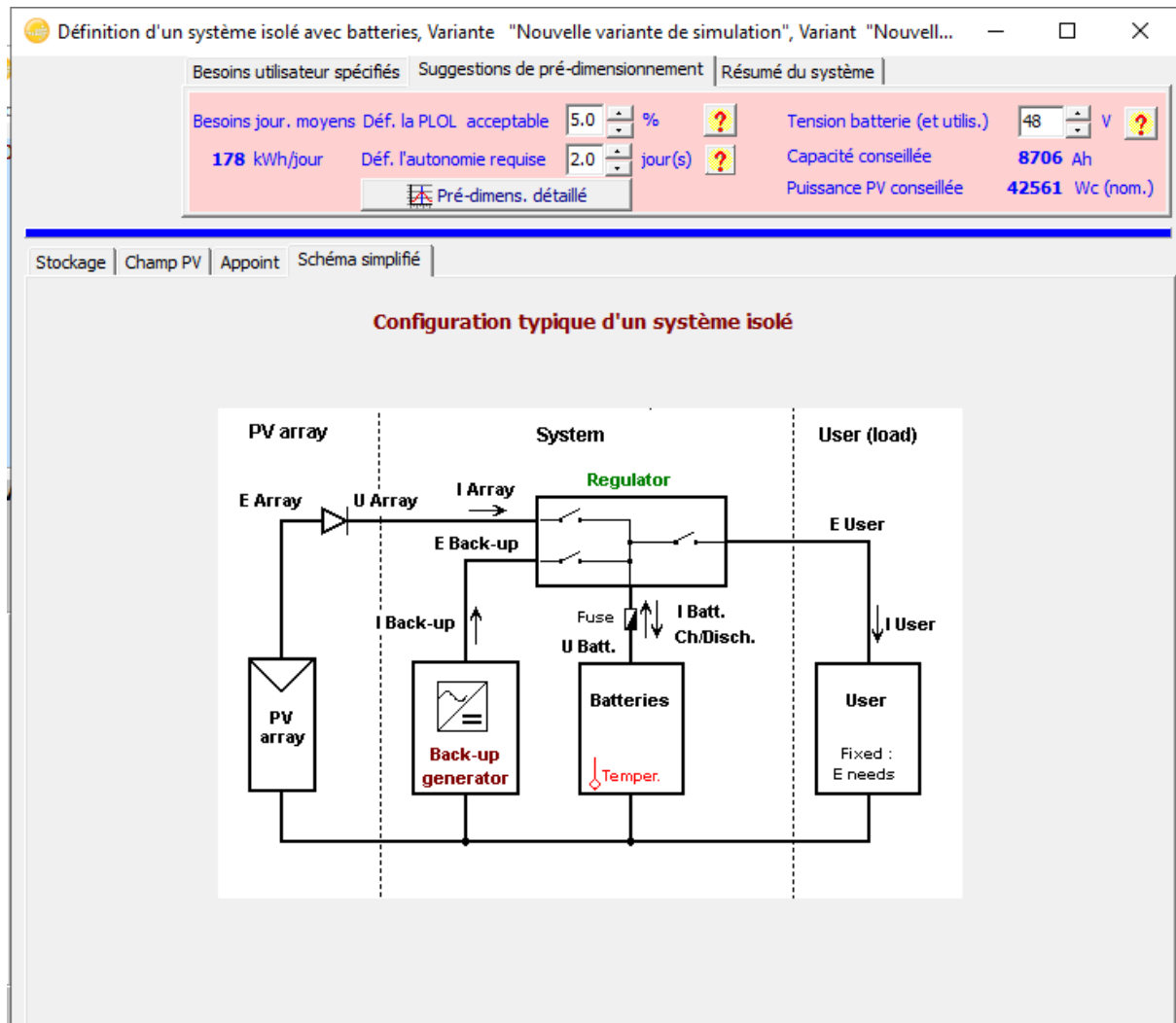


Figure IV.14 : Schéma simplifié de l'installation PV

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans un contexte mondial marqué par la nécessité de transition énergétique, l'intégration des énergies renouvelables dans les systèmes agricoles apparaît comme une solution stratégique, innovante et durable. Ce mémoire a permis d'explorer en profondeur le rôle que peut jouer l'énergie solaire dans le secteur de l'élevage avicole, en mettant en lumière ses avantages, ses limites et ses perspectives d'avenir.

D'un point de vue technique, l'énergie solaire offre une réponse efficace aux besoins spécifiques des élevages de volaille, notamment en matière de régulation thermique, d'éclairage, de ventilation et d'automatisation. Ces solutions permettent d'améliorer la qualité de vie des animaux, tout en assurant une meilleure stabilité des conditions d'élevage.

Sur le plan économique, l'installation de systèmes solaires permet de réduire considérablement les coûts énergétiques, rendant les exploitations plus rentables à long terme. Grâce aux subventions, aux crédits d'impôt et aux aides gouvernementales, de plus en plus d'éleveurs peuvent accéder à ces technologies, malgré le coût initial souvent élevé. Le retour sur investissement s'avère rapide et bénéfique pour la pérennité des exploitations.

En ce qui concerne le bien-être animal, l'apport des technologies solaires est significatif. En garantissant des conditions de vie plus stables et confortables pour les volailles, elles favorisent une meilleure croissance, une réduction du stress et une augmentation de la productivité, tant en qualité qu'en quantité.

Cependant, malgré ces nombreux atouts, certains défis subsistent, tels que la dépendance aux conditions climatiques, les coûts d'entretien, ou encore le manque de sensibilisation dans certaines régions rurales. Néanmoins, les perspectives d'évolution sont prometteuses, notamment grâce aux innovations technologiques et aux politiques publiques favorables à la transition énergétique.

En conclusion, l'utilisation de l'énergie solaire dans l'élevage de volaille ne constitue pas seulement une alternative écologique et économique, mais aussi une véritable révolution agricole. Elle s'inscrit pleinement dans une vision d'avenir où performance, durabilité et respect du vivant sont étroitement liés. Ce modèle, encore en développement, mérite d'être soutenu, étudié et adapté pour répondre aux enjeux agricoles et environnementaux des prochaines décennies.

Les références bibliographiques

Références bibliographiques

Je cite ci-dessous les différentes références bibliographiques dont j'ai repris intégralement certains passages, concepts, formules et définitions dans les différents chapitres de mon mémoire :

- **L'énergie solaire et son utilisation sous sa forme thermique et photovoltaïque, auteur : Khedim ahmed, édition : centre de publications universitaires Tunis 2003, [1].**
- **Thèse de doctorat, auteur :Ferdj Mohammed amine, édition : université USTHB 2021, [2].**
- **Du soleil à la terre, auteurs :Liliensten Jean et Pierre Louis Blelly, édition: première édition (Avril 2008), référence : eBook[PDF]L 4671, [3].**
- **Les réactions nucléaires dans le soleil, auteur : Vincent Tatischeff, édition : CSNSM, CNRS université Paris Sud (13 Aout 2015), [4].**
- **Optique géométrique et phénomènes de vision, auteur :Hakiki Nour Eddine, édition :office des publications universitaires(2019), [5].**
- **Energie solaire photovoltaïque auteurs :Anne Labouret et Michel Viloz, édition : troisième édition, [6].**
- **Etude et dimensionnement d'un système photovoltaïque connecté au réseau(on grid), auteurs : Boulabiza Ilyes et Amrani Charef Eddine, édition : Université Saïd Dahleb, faculté de technologie de la wilaya de Blida, [7].**
- **Cahier de charge (2024) fixant les conditions minimales de réalisation d'un projet d'installations photovoltaïques, marché de réalisation d'un projet d'installations photovoltaïques(2024), et exemple d'une offre, auteur : direction de l'énergie et des mines de la wilaya de Sidi Bel Abbès, [8]**

En outre, pour la préparation de mon présent mémoire, j'ai eu à consulter d'autres références bibliographiques dont je me suis inspiré sans pour autant reprendre intégralement toute partie de leurs contenus, elles sont les suivantes :

- **Les métaux rares: opportunité ou menace, auteur Florian Fizane, édition : TECHNIP.**

Références bibliographiques

- **L'énergie, ressources, technologies et environnement, auteur : Christion Ngo, édition : troisième édition DUNOD.**

- **Cellules solaires et les bases de l'énergie photovoltaïques, auteurs : A.labouret, P.cumunel, J-P braun, B. faraggi, édition : troisième édition, édition technique et scientifique française (ETSF).**

- **Etude d'installation d'un système photovoltaïque pour l'alimentation en énergie électrique, auteur : Hellal sohbia.**