الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي – برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département d'Electromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electrotechnique

Spécialité : Énergies renouvelables en électrotechnique

Par : - BENTOUHAMI Hadil

- KEDDOUCHE Halima

Sujet

Dimensionnement d'une installation photovoltaïque autonome pour alimenter les moyens communs d'un bâtiment

Soutenu publiquement, le 30 /06/ 2026, devant le jury composé de :

Dr. SAAD SAOUD Marouane	MCA	**Univ-BBA**	Président
Pr. DAOUDI Salim	Pr	**Univ-BBA**	Encadrant
Dr. SLAMA Fateh	MCB	**Univ-BBA**	Examinateur

Année universitaire 2025/2026

Remerciements

Avant toute chose, nous remercions **Allah le Tout-Puissant** de nous avoir accordé la santé, la volonté et le courage nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à **nos chers parents** pour leurs sacrifices, leur soutien moral, leurs encouragements constants ainsi que leur confiance tout au long de notre parcours universitaire.

Nous exprimons notre profonde reconnaissance à **notre encadreur, Monsieur Daoudi Salim**, pour son accompagnement, ses orientations précieuses et ses conseils avisés qui ont grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.

Nous remercions également **tous les membres du jury** pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant d'évaluer ce travail.

Enfin, nous adressons nos remerciements à **tous les enseignants du département d'électromécanique** pour la qualité de la formation qu'ils nous ont assurée durant toutes nos années d'études.

Dédicaces

À **mes très chers parents**,

Je vous remercie pour votre amour, votre soutien et tous les sacrifices que vous avez consentis pour ma réussite. Je n'oublierai jamais votre bonté et vos bienfaits depuis mon enfance.

Je vous dédie ce modeste travail avec toute ma gratitude, mon estime et mon profond respect.

Bentouhami Hadil

Dédicaces

J'offre ce modeste travail à **mes chers parents**, en reconnaissance de leur amour, de leurs sacrifices et de leur soutien constant, ainsi qu'à **mes chers frères et sœurs**, en témoignage de ma gratitude pour leur aide et leurs encouragements permanents.

Je l'offre également à l'homme le plus cher à mon cœur, **mon cher mari**, merci pour ton soutien et ton appui constants, et pour avoir été à mes côtés à chaque étape de ma vie.

Keddouche Halima

الملخص

خلال السنوات الأخيرة، أولت الجزائر أهمية متزايدة لتطوير واستغلال الطاقة الشمسية، باعتبارها واحدة من أهم مصادر الطاقة المتجددة والأكثر استدامة. وفي هذا السياق، يهدف هذا العمل إلى دراسة وتحليل تصميم نظام كهروضوئي، مع إجراء مقارنة بين الحسابات النظرية ونتائج المحاكاة المتحصل عليها باستخدام برنامج PVsyst.

يتناول هذا العمل تصميم نظام كهروضوئي مستقل مخصص لتغذية الوسائل المشتركة للمبنى. وتعتمد هذه الدراسة على منهجية حسابية تسمح بتقدير الاحتياجات الطاقوية للموقع، والتي تشمل المصابيح، جهاز الاتصال الداخلي ونظام الصحن الهوائي، وذلك من أجل تحديد الخصائص المثلى لمختلف مكونات النظام، وخاصة الألواح الكهروضوئية، وبطاريات التخزين، ومنظم الشحن، والعاكس الكهربائي. كما تم إجراء محاكاة باستخدام برنامج PVsyst للتحقق من النتائج النظرية وتقييم الأداء الطاقوي للنظام في ظروف تشغيل حقيقية.

الكلمات المفتاحية: التقييس، الوسائل المشتركة، النظام الكهروضوئي، PVsyst.

Résumé

Ces dernières années, l'Algérie a accordé une importance croissante au développement et à l'exploitation de l'énergie solaire, considérée comme l'une des sources d'énergie renouvelable les plus importantes et les plus durables. Dans ce contexte, ce travail vise à étudier et analyser le dimensionnement d'un système photovoltaïque, tout en réalisant une comparaison entre les calculs théoriques et les résultats de simulation obtenus à l'aide du logiciel PVsyst.

Ce travail porte sur le dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome destiné à alimenter les moyens communs d'un bâtiment. Cette étude repose sur une méthodologie de calcul permettant d'estimer les besoins énergétiques du site, qui incluent les lampes, l'interphone et le système du parabole, afin de déterminer les caractéristiques optimales des différents composants de l'installation, notamment les modules photovoltaïques, les batteries de stockage, le régulateur de charge et l'onduleur. Une simulation a également été réalisée à l'aide du logiciel PVsyst afin de vérifier les résultats théoriques et d'évaluer les performances énergétiques du système dans des conditions réelles d'exploitation.

Mots-clés : Dimensionnement, moyens communs, système photovoltaïque, PVsyst.

Abstract

In recent years, Algeria has placed increasing importance on the development and exploitation of solar energy, which is considered one of the most important and sustainable renewable energy sources. In this context, this work aims to study and analyze the sizing of a photovoltaic system, while carrying out a comparison between theoretical calculations and simulation results obtained using the PVsyst software.

This work focuses on the sizing of an autonomous photovoltaic system intended to supply the common areas of a building. This study is based on a calculation methodology that allows estimating the site's energy requirements, including lamps, the intercom, and the satellite dish system, in order to determine the optimal characteristics of the different components of the installation, particularly photovoltaic modules, storage batteries, the charge controller, and the inverter. A simulation was also carried out using PVsyst software to verify the theoretical results and evaluate the energy performance of the system under real operating conditions.

Keywords: Sizing, common areas, photovoltaic system, PVsyst.

Table des matières

Remerciements.....

Dédicaces.....

Résumé.....

Liste des figures.....

Liste des tableaux.....

Liste des abréviations et des symboles .....

Introduction générale 1

Chapitre I : Gisement solaire

I.1 Introduction 3

I.2 Généralités sur le Soleil..... 3

I.2.1 Définition 3

I.2.2 Les couches du Soleil..... 4

I.2.3 Les réactions thermo-nucléaires dans le Soleil 5

I.3 Le rayonnement solaire hors atmosphère..... 8

I.3.1 Définition du corps noir 8

I.3.2 Rayonnement solaire dans l'espace..... 8

I.3.3 Le flux de rayonnement solaire et la constante solaire 9

I.3.4 Les composantes du rayonnement solaire..... 10

I.4 L'atmosphère..... 11

I.4.1 La structure de l'atmosphère..... 11

I.4.2 La composition chimique de l'atmosphère 13

I.5 La constante solaire 14

I.6 La masse d'air 14

I.7 Mouvement apparent du Soleil 16

I.7.1 Les coordonnées équatoriales 16

I.7.2 Les coordonnées horizontales 18

I.8 Mouvement de la Terre 19
I.8.1 Coordonnées terrestres 20
I.9 Heurs et temps 21
I.9.1 Durée du jours 21
I.9.2 Relation entre temps légale et temps solaire 22
I.10 Durée et taux d'ensoleillement 22
I.10.1 Durée d'ensoleillement 22
I.10.2 Taux d'ensoleillement 22
I.11 Conclusion 23

Chapitre II : Énergie solaire photovoltaïque

II.1 Introduction 24
II.2 Historique 24
II.3 Rayonnement solaire porteur d'énergie 25
II.4 L'effet photovoltaïque 26
II.5 Le silicium métallurgique (MG-Si) 26
II.5.1 Le silicium 28
II.5.2 Production du silicium métallurgique 28
II.6 Conversion photovoltaïque 30
II.6.1 Semi- conducteurs 30
II.6.2 Dopage des semi-conducteurs 30
II.6.3 Les techniques de dopage 32
II.6.4 La jonction PN 34
II.7 Cellules PV 34
II.7.1 Définition 38
II.7.2 Principe de fonctionnement d'une cellule PV 35
II.7.3 Les technologies des cellules PV 35
II.7.3.1 Les technologies du silicium cristallin (première génération) 35

II.7.3.2 Les technologies à couches minces (deuxième génération) 36

II.7.3.3 Les technologies à base de cellules organiques (troisième génération)..... 37

II.7.4 Les associations des cellules photovoltaïques 38

II.8 Modélisation électrique d'une cellule solaire idéale et réelle (modèle électrique équivalent PV) 41

II.8.1 Cas d'une cellule idéale 41

II.8.2 Cas d'une cellule réelle 42

II.8.3 Caractéristique électrique d'une cellule solaire 44

II.8.4 Paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque..... 45

II.9 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque..... 46

II.10 Conclusion 47

Chapitre III : Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour alimenter l'espace commun d'un bâtiment

III.1 Introduction 48

III.2 Différents types de systèmes photovoltaïques..... 48

III.2.1 Système autonome..... 48

III.2.2 Système hybride 48

III.2.3 Systèmes connectés au réseau 49

III.3 Les composants d'un système photovoltaïque 49

III.3.1 Les panneaux solaires..... 50

III.3.2 Convertisseur DC/AC..... 50

III.3.2.1 Caractéristique des onduleurs..... 51

III.3.3 Batterie..... 51

III.3.3.1 Composition des batteries..... 52

III.3.3.2 Caractéristiques de la batterie..... 52

III.3.3.3 Les types de batteries..... 54

III.3.4 Régulateur..... 56

III.3.4.1 Types de régulateurs 56

III.3.5 Les charges 57
III.3.6 Câblage 57
III.3.7 Dispositifs de protection d'un système photovoltaïque 57
III.4 Dimensionnement 58
III.4.1 Les méthodes de dimensionnement d'un système PV 58
III.4.2 Les étapes du dimensionnement 64
III.4.2.1 Évaluation de la consommation 64
III.4.2.2 Détermination et importance de l'orientation et d'inclinaison des panneaux 65
III.4.2.3 Ombrage ou repérage des masques 66
III.4.2.4 Données météorologiques 66
III.4.2.5 Détermination de la puissance crête des panneaux 66
III.4.2.6 Tension de fonctionnement du champ photovoltaïque 67
III.4.2.7 Calcul du nombre de panneaux 67
III.4.2.8 Dimensionnement du système de stockage (batteries) 68
III.4.2.9 Dimensionnement du régulateur 70
III.4.2.10 Dimensionnement de l'onduleur 71
III.4.2.11 Dimensionnement des câbles 72
III.5 Conclusion 73

Chapitre IV: Simulation d'un système photovoltaïque autonome à l'aide du logiciel PVsyst

IV.1 Introduction 74
IV.2 Algorithme 74
IV.3 Application numérique du dimensionnement PV 75
IV.3.1 Consommation énergétique (étape I) 76
IV.3.2 Localisation du site (étape II) 76
IV.3.3 Données météorologiques (étape III) 76
IV.3.4 Dimensionnement du générateur photovoltaïque (étapes IV) 76

IV.3.5 Calcul du nombre de panneaux à utiliser pour l'installation (étape V) 77

IV.3.6 Dimensionnement du système de stockage (étape VI)..... 77

IV.3.7 Choix du régulateur de charge et de l'onduleur..... 77

IV.3.8 Choix de la section des câbles 78

IV.4 Application du logiciel PVsyst 78

IV.4.1 Définition 78

IV.4.2 Les étapes de dimensionnement avec logiciel PVsyst..... 78

IV.4.2.1 Démarrage PVsyst 78

IV.4.2.2 Désignation du projet..... 79

IV.4.2.3 Paramètres climatiques du site..... 79

IV.4.2.4 Détermination de l'orientation..... 80

IV.4.2.5 Détermination des besoins électriques..... 81

IV.4.2.6 Distribution horaire de la charge..... 81

IV.4.2.7 Dimensionnement du parc de batteries..... 82

IV.4.2.8 Dimensionnement du champ PV 82

IV.4.2.9 Rapport de simulation..... 83

IV.4.2.10 Analyse 86

IV.5 Conclusion 88

Conclusion générale 89

Références bibliographiques..... 91

Liste des figures

Chapitre I : Gisement solaire

Figure I.1: Les couches du Soleil 5
Figure I.2: Transformation de l'hydrogène dans le Soleil 7
Figure I.3: Variation mensuelle de la constante solaire 10
Figure I.4: Les composantes du rayonnement solaire 11
Figure I.5: La structure de l'atmosphère 13
Figure I.6: La masse d'air 15
Figure I.7: Déclinaison du Soleil 17
Figure I.8: Repère équatorial 18
Figure I.9: Repère horizontal 19
Figure I.10: Le mouvement de la Terre autour du Soleil 20
Figure I.11: Coordonnées terrestres 21

Chapitre II : Énergie solaire photovoltaïque

Figure II.1: Principe de l'effet photovoltaïque 26
Figure II.2: Un semi-conducteur plus performant que le silicium 28
Figure II.3: La Méthode de Czochralski 29
Figure II.4: Dopage de type N (au phosphore) 31
Figure II.5: Dopage de type P (au bore) 32
Figure II.6: La structure de bandes d'une jonction PN 34
Figure II.7: Principe de fonctionnement d'une cellule PV 35
Figure II.8: Cellule monocristalline 36
Figure II.9: Cellule polycristalline 36
Figure II.10: Cellule amorphe 37
Figure II.11: Schéma des cellules photovoltaïques associées en série 39
Figure II.12: Schéma des cellules photovoltaïques associées en parallèle 40
Figure II.13: Association série-parallèle des cellules PV 41
Figure II.14: Schéma équivalent d'une cellule idéale 41
Figure II.15: Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque 43
Figure II.16: Caractéristique I-V d'une cellule 45

Chapitre III : Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour alimenter l'espace commun d'un bâtiment

Figure III.1: Système autonome 48
Figure III.2: Système hybride 49

Figure III.3: Systèmes connectés au réseau 49
Figure III.4: Le mode de connexion des panneaux solaires..... 50
Figure III.5: Symbole d'un onduleur..... 50
Figure III.6: Caractéristiques des onduleurs 51
Figure III.7: Un accumulateur électrochimique..... 52
Figure III.8: Composition de la batterie acide-plomb..... 55
Figure III.9: Composition d'une batterie plomb-gel..... 56
Figure III.10: Régulateur solaire..... 56
Figure III.11: Schéma de câblage d'un système photovoltaïque autonome 57
Figure III.12: Les angles sur un plan incliné 65
Figure III.13: Choix des sections des câbles pour un système 12 V 73

Chapitre IV : Simulation d'un système photovoltaïque autonome à l'aide du logiciel PVsyst

Figure IV.1: Schéma de l'algorithme adopté pour le dimensionnement du système PV ... 75
Figure IV.2: Démarrage de PVsyst 79
Figure IV.3: Paramètres du site géographique..... 79
Figure IV.4: Paramètres climatiques de BBA 80
Figure IV.5: Boîte de dialogue d'orientation 80
Figure IV.6: Les besoins électriques du système..... 81
Figure IV.7: Distribution horaire de la charge..... 81
Figure IV.8: Dimensionnement du parc de batteries 82
Figure IV.9: Dimensionnement du champ PV..... 82
Figure IV.10: Caractéristiques du système photovoltaïque autonome (BBA) 83
Figure IV.11: Rapport des résultats de simulation du système photovoltaïque..... 86

Liste des tableaux

Chapitre I Gisement solaire

Tableau I. 1: Les caractéristiques du Soleil.....4

Chapitre II Énergie solaire photovoltaïque

Tableau II.1: Comparaison des performances des différentes technologies de cellules photovoltaïques.....39

Chapitre III Dimensionnement d'un système photovoltaïque pour alimenter l'espace commun d'un bâtiment

Tableau III.1 : Relation entre la latitude du site et l'angle d'inclinaison optimal des panneaux photovoltaïques 66
Tableau III.2: Tension recommandée pour les systèmes photovoltaïques 67

Chapitre IV Simulation d'un système photovoltaïque autonome à l'aide du logiciel PVsyst

Tableau IV.1: La consommation énergétique des équipements communs d'un bâtiment ……76

Liste des abréviations et des symboles

Abréviation	Signification
AC	Alternating Current (Courant alternatif)
Ah	Ampère-heure
AM	Air Mass (Masse d'air)
CdTe	Tellurure de Cadmium
CIGS	Cuivre-Indium-Gallium-Sélénium
CIS	Cuivre-Indium-Sélénium
DC	Direct Current (Courant continu)
DoD	Depth of Discharge (Profondeur de décharge)
FF	Fill Factor (Facteur de forme)
LLP	Loss of Load Probability
LPSP	Loss of Power Supply Probability
LPE	Liquid Phase Epitaxy (Épitaxie en phase liquide)
MBE	Molecular Beam Epitaxy (Épitaxie par jet moléculaire)
MCB	Miniature Circuit Breaker (Disjoncteur modulaire)
MPP	Maximum Power Point (Point de puissance maximale)
MPPT	Maximum Power Point Tracking (Suivi du point de puissance maximale)
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature
PV	Photovoltaïque
PVsyst	Photovoltaic System Software
SOC	State of Charge (État de charge)
SPD	Surge Protective Device (Dispositif de protection contre les surtensions)
STC	Standard Test Conditions (Conditions standard d'essai)
UTE	Union Technique de l'Électricité
VPE	Vapor Phase Epitaxy (Épitaxie en phase vapeur)
W	Watt
Wh	Watt-heure
Wc	Watt-crête
KWc	Kilowatt-crête

Symbole	Signification
α	Angle d'inclinaison des panneaux
φ	Latitude du site
a	Angle d'azimut
βp	Coefficient de température du rendement
ε	Chute de tension admissible
η	Rendement
ηond	Rendement de l'onduleur
ηp	Rendement moyen du module photovoltaïque
ηr	Rendement de référence du module
λc	Pertes du conditionnement de l'énergie
λp	Pertes du champ photovoltaïque
ρ	Résistivité du conducteur
σ	Taux d'autodécharge
q	Charge élémentaire de l'électron
K	Constante de Boltzmann
Ki	Coefficient thermique du courant
Eg	Énergie de bande interdite (gap)
E	Énergie ou éclairement selon le contexte
Ec	Énergie consommée
Ect	Énergie totale consommée
Ep	Énergie produite
Ea(t)	Énergie disponible à l'instant t
Es(t)	Énergie produite par la source à l'instant t
Ebat	Énergie stockée dans la batterie
G	Irradiation solaire
It	Irradiation horaire incidente
I	Courant électrique
Icc	Courant de court-circuit
Iccp	Courant de court-circuit en parallèle
Iccs	Courant de court-circuit en série
Id	Courant de diode
Iph	Photocourant

Ish	Courant de fuite (shunt)
Isat	Courant de saturation de la diode
Im	Courant au point de puissance maximale
Ir	Irradiation de référence
L	Longueur du câble
N	Nombre de jours d'autonomie
Nm	Nombre total de modules
Np	Nombre de modules en parallèle
Ns	Nombre de modules en série
Nbp	Nombre de batteries en parallèle
Nbs	Nombre de batteries en série
Pc	Puissance crête du générateur photovoltaïque
Pm	Puissance maximale
Pp	Puissance d'un panneau photovoltaïque
Pond	Puissance nominale de l'onduleur
Preg	Puissance nominale du régulateur
R	Résistance électrique
Rs	Résistance série
Rsh	Résistance shunt
S	Section du câble ou surface du champ PV (selon le contexte)
Sm	Surface d'un module photovoltaïque
T	Température absolue
Ta	Température ambiante
Tc	Température de cellule
Tr	Température de référence
Tj	Température journalière
Tsun	Nombre d'heures d'ensoleillement équivalent
U	Tension du système
V	Tension électrique
Vco (Voc)	Tension à circuit ouvert
Vcop	Tension à vide en parallèle
Vcos	Tension à vide en série
Vm	Tension au point de puissance maximale

Vond	Tension maximale de l'onduleur
Vreg	Tension maximale du régulateur
Vt	Tension thermique

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie constitue l'un des défis majeurs auxquels l'humanité sera confrontée dans les années à venir, en raison de l'augmentation continue de la demande au sein des sociétés industrielles, ainsi que du besoin croissant des pays en développement en énergie pour assurer leur développement économique et social. Actuellement, une grande partie de la production mondiale d'énergie repose sur les sources fossiles. Cependant, ces sources entraînent des émissions nocives de gaz à effet de serre, ce qui contribue à l'augmentation de la pollution environnementale. De plus, la surexploitation des ressources naturelles non renouvelables menace leur épuisement et représente un danger pour les générations futures.

Dans ce contexte, les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne et l'énergie hydraulique, apparaissent comme une alternative propre et prometteuse, car elles sont inépuisables et faciles à exploiter. À titre d'exemple, une surface relativement réduite de déserts recouverte de panneaux photovoltaïques peut couvrir une part importante des besoins énergétiques mondiaux.

Le domaine de l'énergie solaire constitue l'un des secteurs de recherche les plus importants de ces dernières années, en raison de son rôle majeur dans le développement durable. Il repose sur l'exploitation directe du rayonnement solaire pour le convertir en énergie électrique à l'aide des cellules photovoltaïques, ce qui en fait une technologie efficace et prometteuse pour la production d'énergie propre.

Dans ce cadre, cette étude porte sur le dimensionnement d'un système énergétique destiné à alimenter les moyens communs d'un bâtiment situé dans la wilaya de Bordj Bou Arreridj, à travers l'analyse des différents équipements techniques et services qui assurent le confort des usagers et le bon fonctionnement du bâtiment, tels que l'éclairage commun, les ascenseurs, la ventilation et les réseaux de communication. Cette étude vise également à évaluer la performance de ces systèmes et à proposer des solutions permettant d'améliorer la consommation d'énergie et de renforcer l'efficacité de la gestion au sein du bâtiment.

Dans ce contexte, ce mémoire est structuré en quatre chapitres principaux :

Le premier chapitre est consacré au gisement solaire, où sont présentés le concept de l'énergie solaire, ses sources, les caractéristiques du rayonnement solaire, les facteurs qui l'influencent, ainsi que les principales notions liées à l'exploitation de cette énergie.

Le deuxième chapitre traite de l'énergie solaire photovoltaïque, à travers l'étude du principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, la présentation des composants de la cellule photovoltaïque, les différents types de panneaux solaires, ainsi que les avantages et les inconvénients de cette technologie.

Le troisième chapitre est dédié à l'étude et au dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome, où sont déterminés les besoins énergétiques du système et le choix des différents composants, tels que les panneaux solaires, les batteries, les régulateurs de charge et les onduleurs, selon une méthode de dimensionnement appropriée.

Le quatrième chapitre porte sur la simulation d'un système photovoltaïque à l'aide du logiciel PVsyst, dans lequel les résultats de simulation sont analysés et comparés aux calculs théoriques afin d'évaluer les performances du système.

Chapitre I

Gisement solaire

I.1 Introduction :

Ce chapitre est consacré au gisement solaire. Le gisement solaire est la quantité d'énergie solaire ou de rayonnement solaire reçue par une zone géographique donnée pendant une période déterminée. Il est utilisé pour évaluer le potentiel énergétique solaire d'un site donné. Il constitue un élément essentiel dans l'étude et l'exploitation des énergies renouvelables, et plusieurs grandeurs caractérisent le gisement solaire, telles que l'irradiance solaire, la durée d'ensoleillement, les coordonnées géographiques et les effets atmosphériques…etc.

I.2 Généralités sur le Soleil :

I.2.1 Définition :

Le Soleil est une étoile unique du système solaire, de forme sphérique, ressemblant à une énorme boule. C'est l'étoile la plus proche de la Terre. Il nous fournit de l'énergie lumineuse et thermique. Sa lumière met environ 8 minutes pour atteindre la Terre **[1]**.

Le Soleil est une énorme boule de gaz très chaud. Lorsque les gaz sont fortement chauffés, ils se transforment en plasma, où les électrons se séparent des atomes et la matière devient ionisée. Il est composé de 80 % d'hydrogène et de 19 % d'hélium. Le 1 % restant est un mélange de plus de 100 éléments lourds (fer, néon, azote, silicium, etc.) **[1]**.

Les principales caractéristiques du Soleil sont résumées dans **le tableau 1**.

Tableau I. 1: Les caractéristiques du Soleil **[1]**.

Âge	4,5 milliards d'années
Surface	$6{,}09\times 10^{12}\text{km}^2$
Volume	$1{,}41\times 10^{18}\text{km}^3$
Rayon	Environ 696 000 km (soit 109 fois celui de la Terre)
Masse	$2{,}0 \times 10^{30}$kg (environ 333 000 masses terrestres)
Distance par rapport à la Terre	Environ 150 millions km
Température à la surface (K)	5900
Température au centre	16

(MK)	
Vitesse (km/s)	217 (Déplacement du Soleil autour du centre de la Voie lactée)
Masse volumique moyenne (kg/m^3)	1408(Masse du Soleil par unité de volume).

I.2.2 Les couches du Soleil :

Le Soleil est structuré en deux grandes parties composées de sept couches principales **[2] :**

a) les couches internes :

- **Le noyau :** C'est le centre du Soleil, où se produisent les réactions de fusion nucléaire qui génèrent l'énergie. Il s'étend du centre du Soleil jusqu'à environ 0,2 de son rayon, et sa densité atteint environ 150 g/cm^3 **[3]**.

- **La zone radiative :** C'est la couche dans laquelle l'énergie se propage de l'intérieur vers l'extérieur sous forme de rayonnement. Elle s'étend de 0,2 à 0,7 du rayon solaire. La température y est inférieure à celle du noyau, et sa densité augmente **[3]**.

- **La zone convective :** L'énergie y est transportée par des courants de convection dus aux différences de température. Elle s'étend de 0,7 du rayon jusqu'à environ 200 000 km **[3]**.

b) les couches externes :

- **La photosphère :** C'est la surface apparente du Soleil que l'on observe à l'œil nu, d'où provient la lumière. Elle a une épaisseur d'environ 400 à 500 km **[3]**.

- **La chromosphère :** C'est une couche mince située au-dessus de la photosphère, de couleur rougeâtre **[2]**.

- **La zone de transition :** C'est la région qui sépare la chromosphère de la couronne solaire **[2]**.

- **La couronne solaire :** C'est la couche externe du Soleil, elle s'étend sur de très grandes distances dans l'espace **[2]**

La figure suivante représente les couches du Soleil **:**

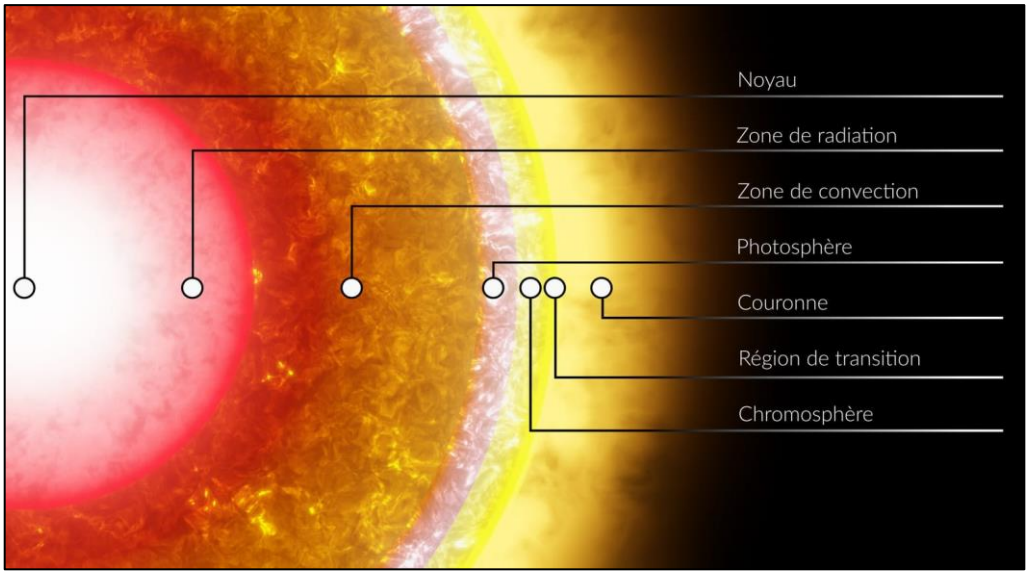


Figure I.1: Les couches du Soleil **[2]**.

I.2.3 Les réactions thermo-nucléaires dans le Soleil :

Les réactions nucléaires se produisent au cœur du Soleil, constitué principalement d'hydrogène et d'hélium. Elles se présentent essentiellement sous forme de chaînes proton–proton, qui constituent la principale source d'énergie solaire, en assurant la fusion des noyaux d'hydrogène en hélium avec libération d'une grande quantité d'énergie **[4]**.

a) La chaîne proton – proton:(p-p-I)

$$2\,{}_1^1\mathbf{H} \rightarrow {}_1^2\mathbf{H} + \mathbf{e}^+ + \mathbf{v}(< \mathbf{E}\nu > = \mathbf{0,26\ MeV})$$

$${}_1^2\mathbf{H} + {}_1^1\mathbf{H} \rightarrow {}_2^3\mathbf{He} + \boldsymbol{\gamma}$$

$$2\,{}_2^3\mathbf{He} \rightarrow {}_2^4\mathbf{He} + 2\,{}_1^1\mathbf{H}$$

b) Chaîne proton-proton II (p-p II)

$$2{}_1^1\mathbf{H} \rightarrow {}_1^2\mathbf{H} + \mathbf{e}^+ + \mathbf{v}(< \mathbf{E}\nu > = \mathbf{0,26\ MeV})$$

$${}_1^2\mathbf{H} + {}_1^1\mathbf{H} \rightarrow {}_2^3\mathbf{He} + \boldsymbol{\gamma}$$

$$\mathbf{2\,{}^{3}_{2}He \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{1}H}$$

$$\mathbf{{}^{3}_{2}He + {}^{4}_{2}He = {}^{7}_{4}Be + \gamma}$$

$$\mathbf{{}^{7}_{4}Be + \gamma + e^{-} \rightarrow {}^{7}_{4}Li + \nu(< E\nu > \; = 0,86\ MeV)}$$

$$\mathbf{{}^{7}_{4}Li + \nu(< E\nu >= 086MeV)}$$

$$\mathbf{{}^{7}_{4}Li + {}^{1}_{1}H = 2\,{}^{4}_{2}He}$$

c) Chaîne proton-proton III (p-p III)

$$\mathbf{2\,{}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{2}_{1}H + e^{+} + \nu(< E\nu > = \; 0,26\ MeV)}$$

$$\mathbf{{}^{2}_{1}H + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{3}_{2}He + \gamma}$$

$$\mathbf{{}^{3}_{2}He + {}^{4}_{2}He = {}^{7}_{4}Be + \gamma}$$

$$\mathbf{{}^{7}_{4}Be + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{8}_{5}B + \gamma}$$

$$\mathbf{{}^{8}_{5}B \rightarrow {}^{8}_{4}Be + e^{+} + \nu(< E\nu > = \; 6,80MeV)}$$

$$\mathbf{{}^{8}_{4}B \rightarrow 2\,{}^{4}_{2}H}$$

Avec :

$\mathbf{{}^{1}_{1}H}$: Hydrogène (proton) ; ${}^{2}_{1}$H: noyau de deutérium (numéro atomique Z = 1, nombre de neutrons N = 1).

$\mathbf{{}^{3}_{2}He:}$ noyau d'hélium 3 (Z = 2, N = 1) ; $\mathbf{{}^{4}_{2}He}$: noyau d'hélium 4 (Z = 2, N = 2).

$\mathbf{{}^{7}_{4}Li:}$ noyau de lithium 7 (Z = 3, N= 4) ; $\mathbf{{}^{7}_{4}Be}$: noyau de béryllium 7 (Z = 4, N = 3).

$\mathbf{{}^{8}_{4}B:}$ noyau de béryllium 8 (Z = 4, N = 4); $\mathbf{{}^{8}_{5}B:}$ noyau de bore 8 (Z = 5, N = 3); $\mathbf{e^{+}:}$ positron ; $\mathbf{e^{-}:}$ électron $\mathbf{\nu:}$ neutrino électronique ; $\boldsymbol{\gamma}$ **:** photon gamma.

Photons : (particules fondamentales sans masse ni charge électrique).

Neutrinos : (particules de masse très faible et de charge nulle).

On peut résumer de manière simple les réactions nucléaires au cœur du Soleil comme suit :

$$4\,{}_{1}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}_{2}^{4}\mathrm{He} + 2\mathrm{v} + \gamma + 2\mathrm{e}^{+}$$

La figure suivante est un résumé de ce qui précède :

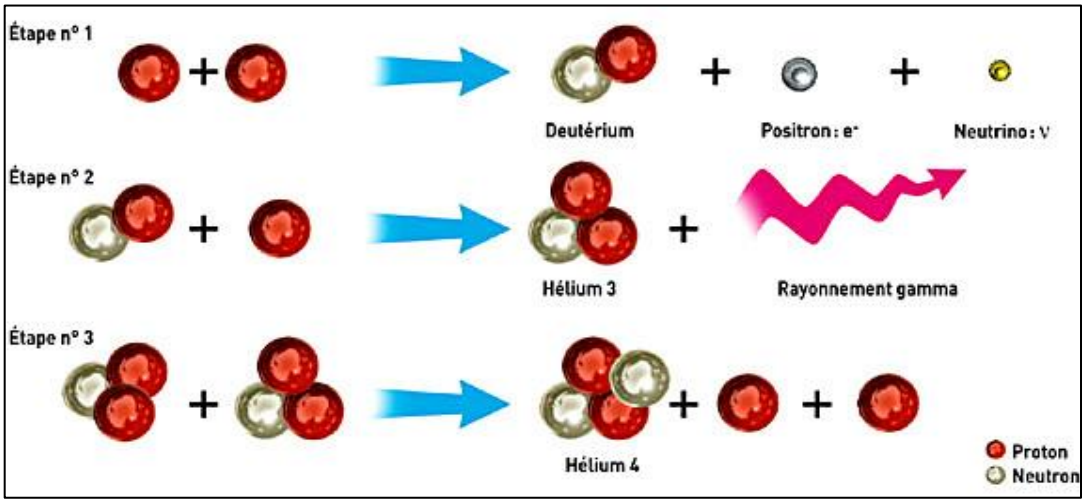


Figure I. 2: Transformation de l'hydrogène dans le Soleil **[15]**.

Au cœur du Soleil se produisent des réactions de fusion nucléaire thermonucléaire au cours desquelles les noyaux d'hydrogène se transforment progressivement en noyaux d'hélium, libérant ainsi d'énormes quantités d'énergie. Durant ce processus, une perte de masse d'environ 4 millions de tonnes par seconde est observée, et cette masse est convertie en énergie selon la célèbre relation d'Einstein. Ces réactions ont lieu dans des conditions extrêmement élevées, avec une température d'environ 15 millions de degrés Celsius, où les atomes d'hydrogène et leurs isotopes entrent en collision pour former de l'hélium en émettant des rayonnements de haute énergie sous forme de rayons gamma.

Cette énergie se propage ensuite à travers les couches internes du Soleil, où elle est absorbée puis réémise progressivement sous forme de photons de plus faible énergie, avant de traverser la zone de convection et d'atteindre la photosphère. Le transport de cette énergie du cœur du Soleil jusqu'à sa surface peut durer des milliers d'années, puis le rayonnement solaire met environ 8 minutes pour atteindre la Terre sous forme de rayonnement électromagnétique, constituant la principale source d'énergie solaire reçue par notre planète, donc la formule suivante **[3]** :

$$\mathbf{E = |\Delta m|.C^2 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ I.1}$$

Avec :

E : l'énergie exprime en (ev ou J, avec 1ev=1,602 $\times 10^{-19}$ J).

C : la vitesse de la lumière (C=3.10^{8} m/s)

$|\Delta m|$: La valeur absolue de différence de masse entre le noyau produit et la somme des noyaux initiaux.

$$\Delta m = \sum m_{produit} - \sum m_{initiaux} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{ I.2}$$

I.3 Le rayonnement solaire hors atmosphère :

I.3.1 Définition du corps noir :

Un corps noir est un système idéal qui absorbe totalement le rayonnement incident et émet un rayonnement thermique parfait en équilibre avec ses parois. Le rayonnement réémis dépend uniquement de la température, indépendamment de la nature du matériau. Son comportement est régi par les lois de Lambert, de Stefan-Boltzmann et de Wien **[9]**.

I.3.2 Rayonnement solaire dans l'espace :

Le Soleil peut être assimilé à un corps noir de température effective $T_S = 5800K$ [**17**]. Dans ce cadre, le flux d'énergie émis par unité de surface de sa surface est déterminé par la loi de Stefan-Boltzmann, où σ désigne la constante de Stefan-Boltzmann, selon la relation suivante **[16]** :

$$E^n(T) = \sigma\, T^4 \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{ I.3}$$

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15 c^2 h^3} = 5,67.10^{-8}[w\, m^{-2} k^{-4}]\ ] \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{ I.4}$$

Avec :

$E^n(T)$: Émittance énergétique ($w\, m^{-2}$).

T (K) : Température absolue.

σ: Constante de Stefan-Boltzmann ($\sigma = 5{,}67.10^{-8} w\, m^{-2} k^{-4}$).

K : Constante de Boltzmann ($k = 1{,}38.10^{-23} j.k^{-1}$).

h : Constante de Planck ($h = 2{,}62.10^{-34} j.s$).

c : Vitesse de la lumière dans le vide ($c = 3.10^{8}$).

La conservation de flux d'énergie $\emptyset_S(w)$ émis par le soleil s'écrit **[6] :**

$$\emptyset_S = 4\pi R_S^2 E^n(T) = 4\pi D_{TS} E_{SC} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{I.5}$$

Avec :

D_{TS}: Distance moyenne entre la terre et le Soleil (D_{TS}=149,6.109m).

$\emptyset_S$: Flux solaire (w).

E_{SC}: Flux d'énergie incident au niveau de la Terre.

R_S: Le rayon solaire (R_S= 695500 km).

I.3.3 Le flux de rayonnement solaire et la constante solaire :

La constante solaire est le rayonnement solaire sortant de l'atmosphère et atteignant une unité de surface perpendiculaire aux rayons du Soleil, généralement exprimée en watts par mètre carré (W/m²). Sa première valeur, mesurée par des moyens anciens, était d'environ 1355,7 W/m², appelée "valeur initiale" ou E_o. La valeur moyenne moderne, estimée à environ 1367 W/m² après amélioration des mesures par les satellites, est souvent désignée comme E_o corrigée ou E. Pour obtenir une estimation plus précise, cette valeur est corrigée quotidiennement afin de tenir compte de la variation de la distance Terre-Soleil au cours de l'année, selon une équation dépendant du jour grégorien.

Le rayonnement atteignant la surface terrestre est fortement influencé par l'absorption et la diffusion dans l'atmosphère, ainsi que par les variations quotidiennes et saisonnières et la diversité des composants atmosphériques selon les régions, ce qui rend sa modélisation exacte difficile. Pour cette raison, des modèles empiriques sont utilisés pour estimer sa valeur de manière approximative. La constante solaire corrigée est donnée par la relation suivante **[6]** :

$$E = E_0[1 + 0.033\cos(0.984j)] \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{I.6}$$

Avec :

E_0 : La valeur moyenne de la constante solaire W/m².

E: La Constante solaire.

j: Le nombre du jour de l'année.

La figure suivante représente la variation mensuelle de la constante solaire :

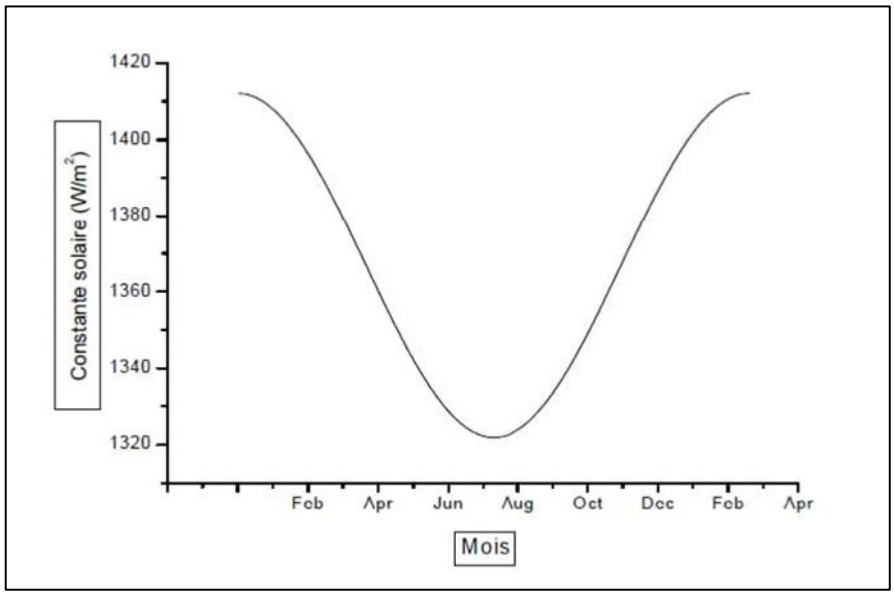


Figure I. 3: Variation mensuelle de la constante solaire **[3]**.

I.3.4 Les composantes du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire, à son arrivée à la surface de la Terre, se divise en trois composantes principales : le rayonnement direct, le rayonnement diffus et le rayonnement réfléchi **[5]**.

a) Le rayonnement direct :

Le rayonnement direct est le rayonnement qui atteint directement la surface de la Terre depuis le Soleil sans subir de diffusion. Il se caractérise par son intensité et sa concentration, sa valeur maximale pouvant atteindre environ 1000 W/m². Ce type de rayonnement est très important pour les panneaux solaires et n'est obtenu que lorsque le Soleil est au zénith et que le ciel est dégagé, sans nuages **[5]**.

b) Le rayonnement diffus :

Le rayonnement diffus est celui qui est diffusé dans l'atmosphère à cause des nuages, de la poussière et des particules de l'air, et qui atteint la surface de la Terre dans toutes les directions, et il est présent même lors des journées nuageuses, lorsque le rayonnement direct est faible ou absent **[5]**.

c) Le rayonnement réfléchi :

Le rayonnement réfléchi est la partie du rayonnement solaire qui est réfléchie par la surface de la Terre, les bâtiments, l'eau ou la neige, puis renvoyée vers l'atmosphère, où les nuages peuvent en réfléchir une partie vers le sol. Le taux de réflexion dépend de la nature de la surface et est **appelé albédo**. La neige réfléchit environ 80 % du rayonnement solaire, tandis que les forêts et l'eau en réfléchissent moins de 20 % du rayonnement incident, et l'albédo moyen de la Terre est d'environ 30 % **[5]**.

d) Le rayonnement solaire global :

Le rayonnement solaire global est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus, il est mesuré sur une surface horizontale au niveau du sol **[5]**.

La figure suivante représente les composantes du rayonnement solaire :

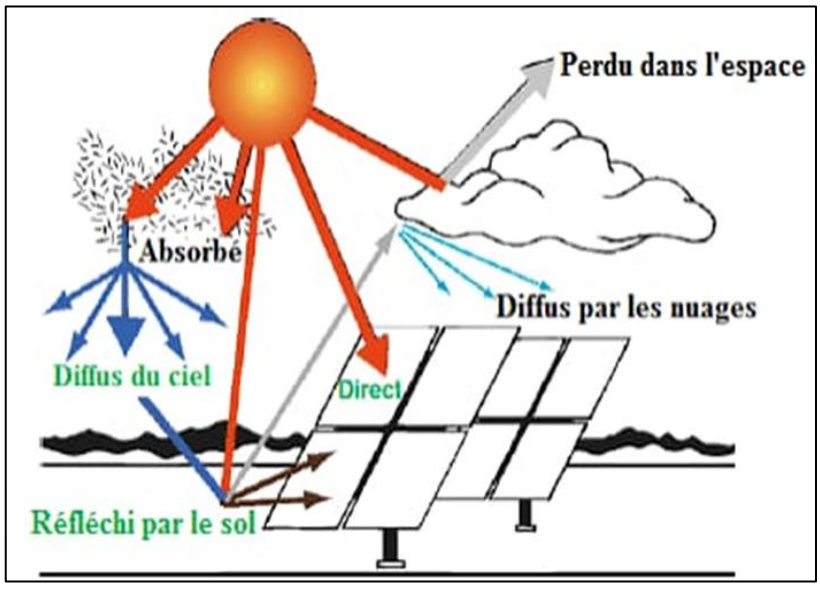


Figure I. 4: Les composantes du rayonnement solaire **[7]**.

I.4 L'atmosphère :

I.4.1 La structure de l'atmosphère :

L'atmosphère est une couche d'air qui entoure la Terre. Le terme atmosphère est d'origine grecque : il est composé d'atomes, qui signifie vapeur, et de sphaira, qui signifie sphère. La hauteur limite de l'atmosphère se situe dans une zone de transition relativement épaisse, où les molécules peuvent s'échapper vers l'espace sans subir de collisions avec d'autres molécules susceptibles de les renvoyer vers l'atmosphère. Cette hauteur varie entre 500 et 800 kilomètres **[8]**.

a) La troposphère :

La troposphère est la couche la plus basse de l'atmosphère et s'étend de la surface de la Terre jusqu'à environ 12 kilomètres. C'est la couche la plus agitée, où se produisent les phénomènes météorologiques tels que les nuages et les précipitations. La température y diminue d'environ 6,5 °C par kilomètre d'altitude, atteignant environ −56 °C au niveau de la tropopause. C'est également la couche la plus dense de l'atmosphère, contenant environ 75 % de la masse atmosphérique totale.

b) La stratosphère :

La stratosphère, située au-dessus de la troposphère entre 12 et 55 km d'altitude, se caractérise par une augmentation de la température avec l'altitude, passant d'environ −56 °C à près de 0 °C au niveau de la stratopause. Cette variation est due à l'absorption du rayonnement ultraviolet par la couche d'ozone située autour de 25 km. Elle présente une grande stabilité dynamique, avec une quasi-absence de turbulences et de phénomènes météorologiques, et joue un rôle essentiel dans la protection de la Terre contre les rayonnements solaires nocifs **[9]**.

c) La mésosphère :

La mésosphère est la troisième couche de l'atmosphère, située entre 50 et 85 km d'altitude. Elle est la plus froide, avec une température qui diminue de 0 °C à environ −90 °C. La pression y est très faible. C'est dans cette couche que les météorites se désintègrent en entrant dans l'atmosphère, produisant les « étoiles filantes », et où peuvent se former des nuages noctiluques.

d) L'ionosphère :

L'ionosphère, généralement associée à la thermosphère, s'étend approximativement de 80 à 200 km d'altitude. Elle présente une forte variation de température, allant d'environ −90 °C à sa base jusqu'à 400 à 1500 °C dans ses régions supérieures. Cette couche est caractérisée par une importante ionisation de l'atmosphère, influencée par le rayonnement solaire.

e) l'exosphère :

L'exosphère est la couche la plus externe de l'atmosphère terrestre, située au-delà d'environ 700 km d'altitude et se prolongeant progressivement vers l'espace interplanétaire sans limite bien définie. Dans cette région, l'air devient extrêmement raréfié et se dissipe progressivement dans le vide spatial. Elle constitue une zone de transition entre l'atmosphère terrestre et l'espace intersidéral. De nombreux satellites artificiels y orbitent autour de la Terre.

La figure suivante représente la structure de l'atmosphère :

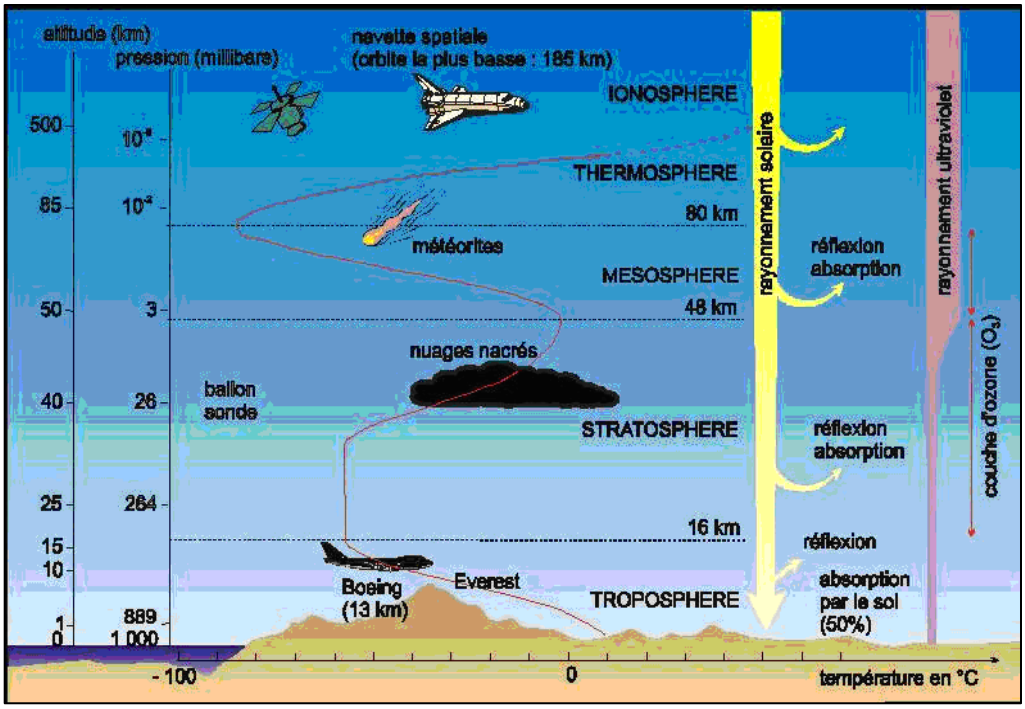


Figure I.5: La structure de l'atmosphère **[9]**.

I.4.2 La composition chimique de l'atmosphère :

L'air sec est composé d'environ 78 % en volume (75,54 % en masse) d'azote moléculaire (N_2), de 21 % d'oxygène moléculaire (O_2), de 0,9 % d'argon et de 0,03 % de

dioxyde de carbone (CO_2). De faibles quantités d'autres gaz, tels que le néon, l'hélium, le krypton, l'hydrogène, le xénon, le méthane, le protoxyde d'azote, l'ozone et le radon, sont présentes à l'état de traces, soit environ 0,03 %. L'atmosphère contient également de la vapeur d'eau, dont la concentration varie selon la latitude, l'altitude et les conditions météorologiques, et qui se présente sous diverses formes telles que la glace, la neige, les nuages, la pluie et le brouillard **[10]**.

I.5 La constante solaire :

La constante solaire représente la quantité d'énergie solaire qui atteint réellement la surface de la Terre par mètre carré après avoir traversé l'atmosphère. Bien que la constante solaire à la limite de l'atmosphère soit d'environ 1367 W/m², l'atmosphère absorbe et diffuse une partie de cette énergie en raison des gaz, de la vapeur d'eau, de la poussière et des nuages. Ainsi, en plein jour et par temps clair, la valeur de la constante solaire atteint généralement environ 1000 W/m² pour une surface perpendiculaire aux rayons du soleil. Cette valeur est importante pour l'étude du climat, de l'énergie solaire et du fonctionnement des panneaux photovoltaïques **[11]**.

I.6 La masse d'air :

On estime que la masse totale qui traverse une surface est d'environ $10\ tonnes\ /\ m^2$, ce qui correspond à un volume d'environ 7,8 km d'atmosphère dans des conditions normales (T=0°C et P=1013 mbar).

Si tous ces gaz étaient réunis dans ces conditions, ils se répartiraient approximativement comme suit : 6,2 km d'azote, 1,7 km d'oxygène, 30 m de vapeur d'eau, 24 m de dioxyde de carbone et 74 m d'argon, en plus de 4 cm d'hélium et 14 cm de néon, ainsi que des quantités très faibles d'autres gaz tels que le krypton, le monoxyde d'azote et le méthane, et environ 5 mm d'ozone **[10]**.

En supposant que cette couche est plane et stratifiée horizontalement, la longueur du trajet rectiligne d'un rayon lumineux incliné d'un angle h par rapport à l'horizontale s'exprime par la relation suivante :

$$\mathbf{OM = \frac{OA}{\sin h}} \text{..... I.7}$$

En utilisant l'équation suivante, le facteur de masse d'air est déterminé afin de représenter la longueur du trajet des rayons solaires à travers l'atmosphère en fonction de leur position relative :

$$\mathbf{m = \frac{p}{1013} * \frac{1}{\sin h} * \exp\left(\frac{-z}{7.8}\right)} \text{..... I.8}$$

Avec :

P : Pression (mbar)

h : Élévation du Soleil sur horizon (90° au zénith)

z : Altitude. Dans les conditions normales et au niveau de la mer (Ou z=0 Km, p=1013 hPa ou mbar)

On obtient l'expression suivante : $\mathbf{m = \frac{1}{\sin h}}$ **..... I.9**

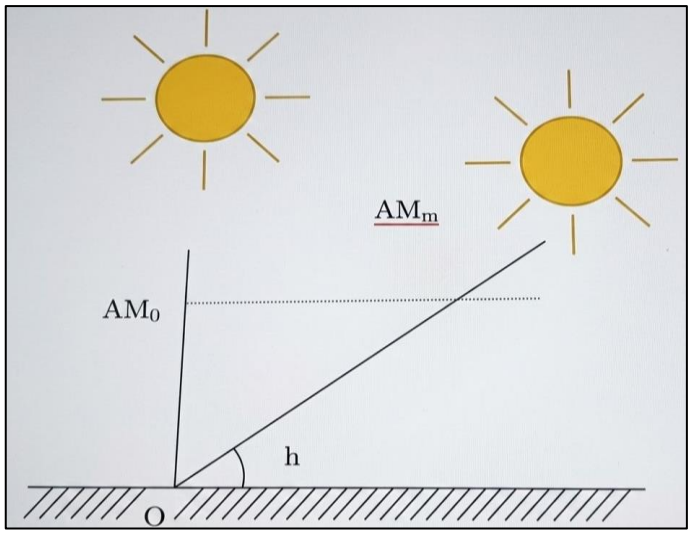


Figure I.6: La masse d'air.

On cite d'autres conditions telles que :

$\mathbf{AM_0}$: Hors atmosphère à haute altitude, on est dans les conditions AM_0.

$\mathbf{AM_1}$: Représente le spectre arrivant à la surface de la terre quand le soleil est au zénith. On dit que l'on a les conditions AM_1car les rayons lumineux traversent une épaisseur d'atmosphère unité (7.8 Km).

$\mathbf{AM_{1.5}}$: Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith).

$\mathbf{AM_2}$: Le spectre solaire ayant traversé 2 épaisseurs d'atmosphère (hauteur de 30° du soleil au-dessus de l'horizon).

I.7 Mouvement apparent du Soleil :

Le Soleil a une grande influence sur la détermination et le choix du site. Il est donc important de connaître sa position apparente dans le ciel, car celle-ci est indispensable à l'étude du rayonnement solaire et au dimensionnement des systèmes photovoltaïques **[17]**.

I.7.1 Les coordonnées équatoriales :

Le mouvement apparent du Soleil par rapport au plan de l'équateur terrestre se mesure par les grandeurs suivantes **[14]** :

a) Déclinaison du Soleil :

La déclinaison solaire est l'angle entre la direction des rayons du Soleil et le plan de l'équateur. Elle varie au cours de l'année. Elle est égale à 0° aux équinoxes (de printemps et d'automne). Elle atteint +23,44° au solstice d'été, et −23,44° au solstice d'hiver. La relation suivante est donnée :

$$\Gamma = 2\pi\left(\frac{j-1}{365}\right) \text{..... I.10}$$

Avec :

Γ: angle du jour, exprimé en radians.

En exprimant tous les angles en degrés on trouve l'équation de Cooper qui est donnée par **:**

$$\delta = 23,45 \sin\left[2\pi\left(\frac{284+j}{365}\right)\right] \text{..... I.11}$$

Avec :

j: numéro du jour dans l'année, variant de 1 à 365 (Pour le 1er janvier, j = 1 et pour le 31 décembre, j = 365).

L'évolution annuelle de la déclinaison du soleil est présentée dans la figure **(I.7)** :

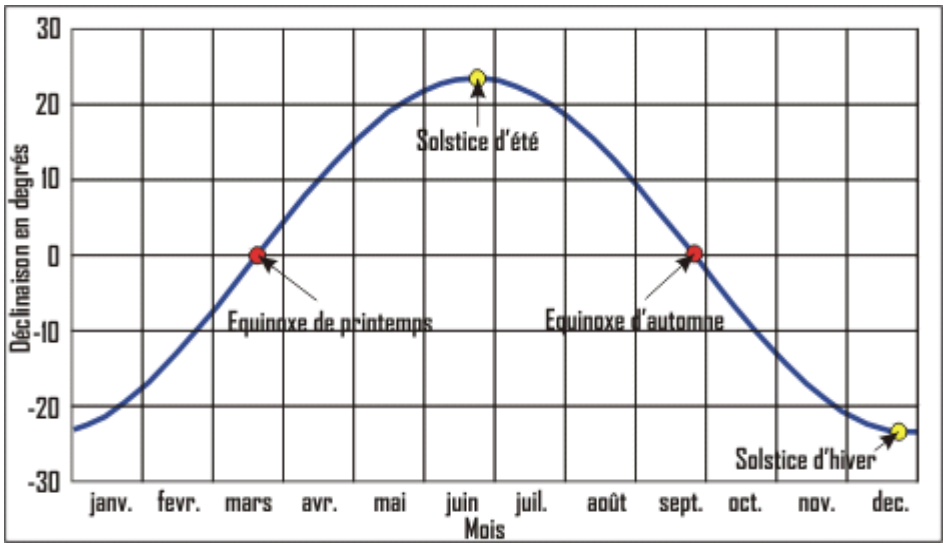


Figure I.7: Déclinaison du Soleil **[12]**.

b) Angle horaire du Soleil :

L'angle horaire est l'angle entre le méridien local (dirigé vers le sud) et la projection de la direction Terre-Soleil sur le plan de l'équateur. Il permet de repérer la position apparente du Soleil au cours de la journée. L'unité est l'angle horaire (24 h représente 360° horaires) La relation suivante est donnée :

$$\omega = 15(12 - TSV) \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{I.12}$$

Au midi solaire, l'angle horaire est égal à 0°. Avant midi, il est négatif. L'après-midi, il devient positif.

Avec :

TSV : Le temps solaire vrai.

La figure suivante représente le repère équatorial :

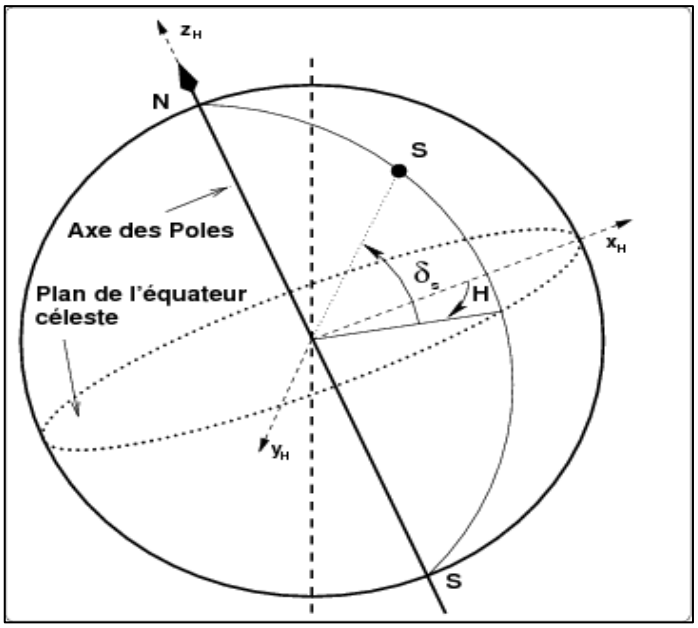


Figure I. 8 : Repère équatorial **[14]**.

I.7.2 Les coordonnées horizontales :

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et la verticale du lieu. Il est défini par les grandeurs suivantes **[16]** :

a) Hauteur du Soleil :

La hauteur est l'angle entre la direction du Soleil et sa projection sur le plan horizontal. Au lever et au coucher du Soleil la hauteur est de 0°, tandis qu'à midi solaire, elle atteint 90°. L'expression de la hauteur du Soleil est donnée par :

$$\sin(h) = \cos(\delta)\cos(\varphi)\cos(\omega) + \sin(\delta)\sin(\varphi) \quad \text{I.13}$$

Avec :

δ: la déclinaison du Soleil.

φ: est la latitude du lieu.

ω: l'angle horaire du Soleil.

b) Azimut du Soleil :

L'azimut est l'angle entre la projection du Soleil sur le plan horizontal et le méridien local (qui pointe vers le sud), il permet de déterminer la position du Soleil par rapport au sud. Il peut être calculé à l'aide de la formule suivante **:**

$$\sin(a) = \frac{\sin(\omega)\cos(\delta)}{\cos(h)} \text{..... I.14}$$

Avec :

δ**:** la déclinaison du Soleil.

ω**:** l'angle horaire du Soleil.

h: la hauteur du Soleil.

c) Le zénith :

L'angle zénithal (θZ) est le complément de la hauteur du Soleil et s'exprime par la relation suivante :

$$\theta Z = 90° - h \text{..... I.15}$$

Avec :

h : hauteur du Soleil.

La figure suivante représente le repère horizontal :

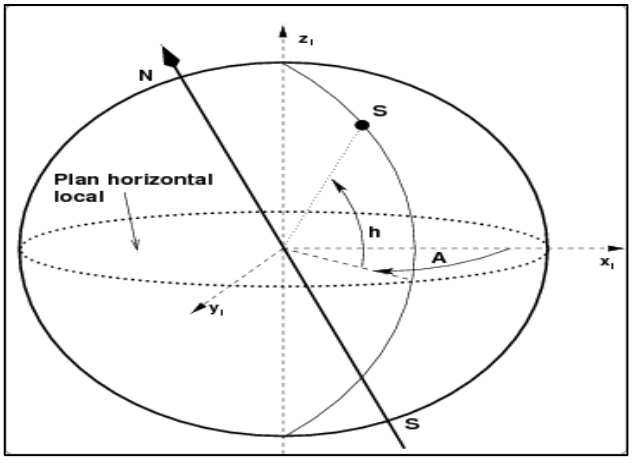


Figure I. 9 : Repère horizontal **[14]**.

I.8 Mouvement de la Terre :

La Terre tourne autour du Soleil selon une orbite elliptique dont le Soleil occupe l'un des foyers. Le plan de cette orbite est appelé le plan de l'écliptique. Cette révolution dure environ 365 jours et s'accompagne d'une variation de la distance entre la Terre et le Soleil **[20]**.

Le 21 décembre, correspondant au solstice d'hiver, la Terre est au plus près du Soleil, à une distance d'environ 147 millions de kilomètres. En revanche, le 22 juin, lors du solstice d'été, cette distance atteint environ 152 millions de kilomètres, ce qui correspond à son éloignement maximal. Les 21 mars et 21 septembre marquent respectivement les équinoxes de printemps et d'automne, périodes durant lesquelles la durée du jour est égale à celle de la nuit. Par ailleurs, la Terre effectue également une rotation sur elle-même autour de son axe en 24 heures, ce qui est à l'origine de l'alternance du jour et de la nuit. Le plan perpendiculaire à cet axe et passant par le centre de la Terre est appelé l'équateur **[17]**.

La figure suivante représente le mouvement de la Terre autour du Soleil.

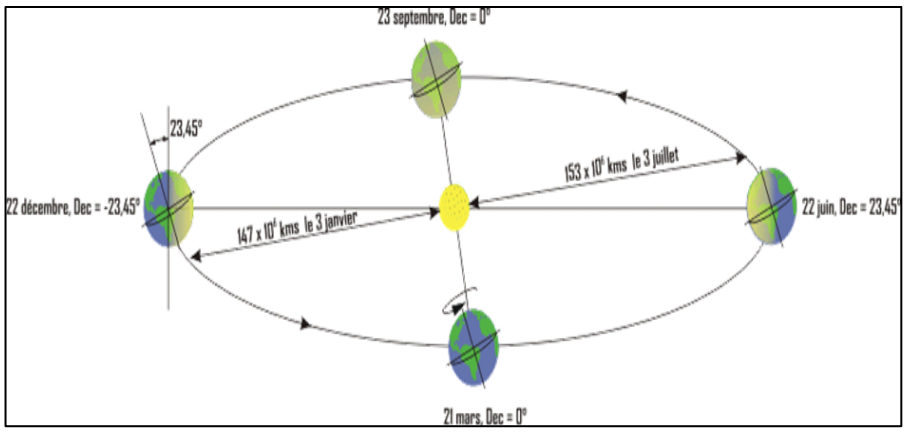


Figure I. 10 : Le mouvement de la terre autour du Soleil **[4]**.

I.8.1 Coordonnées terrestres :

a) La latitude θ :

Les coordonnées géographiques reposent sur l'équateur (0°), qui divise la Terre en deux hémisphères, Nord et Sud. Elles permettent de déterminer la position et le climat, et les cercles de latitude deviennent plus petits à mesure que l'on se rapproche des pôles **[1]**.

b) La longitude φ :

Aident les coordonnées géographiques à déterminer le temps et la position. Ils reposent sur le méridien de Greenwich (0°), qui divise la Terre en deux parties : Est et Ouest. Ce sont des demi-cercles de même longueur qui se rejoignent aux pôles Nord et Sud **[14]**.

c) L'altitude :

L'altitude est la hauteur d'un point mesurée verticalement, en mètres, par rapport au niveau de la mer considéré comme référence **[1]**.

La figure suivante représente les coordonnées terrestres :

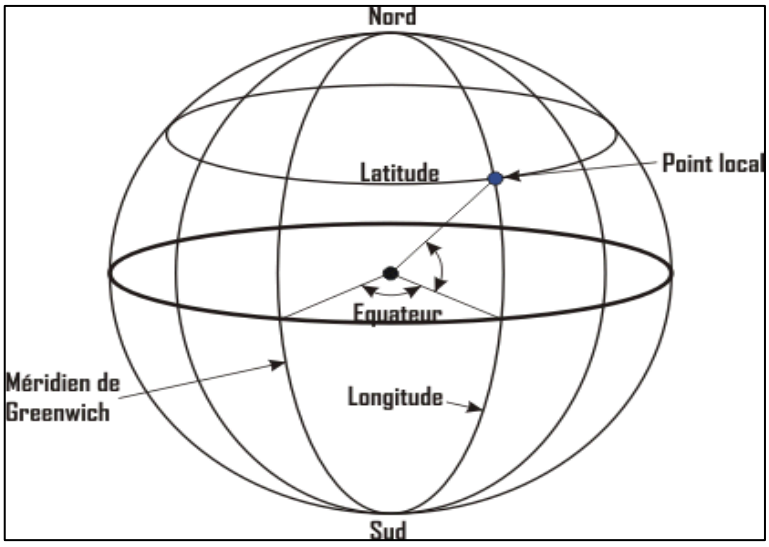


Figure I. 11 : Coordonnées terrestres **[12]**.

I.9 Heurs et temps :

I.9.1 Durée du jour :

On peut déduire les heures de lever et de coucher du Soleil à partir de la hauteur angulaire du Soleil en posant $\boldsymbol{sin\ h = 0}$ (soleil à l'horizon) dans l'équation **[17]** :

Avec :

$$\boldsymbol{\cos(\omega_L) = -\tan\varphi \tan\delta} \quad \text{.....I.16}$$

L'heure solaire au lever du soleil a donc pour valeur :

$$\boldsymbol{TS_L = 12 - \frac{\omega_l}{15}} \quad \text{.....I.17}$$

L'angle horaire $\boldsymbol{\omega_C}$ au coucher du Soleil est l'opposé de l'angle horaire à son lever, nous avons donc $\boldsymbol{\omega_C = -\omega_L}$ et la durée du jour vaut **[17] :**

$$\boldsymbol{d = 2\frac{\omega_L}{15}} \text{..... I.18}$$

I.9.2 Relation entre temps légale et temps solaire :

Le temps universel (TU) est le temps de référence basé sur le passage du Soleil au méridien d'origine (méridien de Greenwich). Il est utilisé comme référence internationale pour les calculs astronomiques et solaires. Le temps local (TL) correspond à l'heure officielle d'un lieu et diffère du temps universel selon le fuseau horaire. La relation entre ces deux temps s'exprime par **[17] :**

$$\text{C=TU-TL..... I.19}$$

C : le décalage horaire entre le temps local et le temps universel

La mesure du temps était basée sur la rotation de la Terre et sa vitesse qui introduit un terme correctif appelé équation de temps et noté ET **[17] :**

$$\boldsymbol{ET = -10^{-4}[2 - 4797cos(\omega j) + 32265cos(2\omega j) + 903cos(3\omega j) + 73509sin(\omega j) + 93912sin(2\omega j) + 3361sin(3\omega j)]} \text{..... I.20}$$

Avec :

ET : Equation de temps en min.

j : numéro du jour dans l'année et $\boldsymbol{\omega}$ **=0.984.**

I.10 Durée et taux d'ensoleillement :

I.10.1 Durée d'ensoleillement :

La durée d'ensoleillement est la période, au cours d'une journée donnée et dans un lieu géographique déterminé, pendant laquelle le rayonnement solaire direct atteint la surface de la Terre sans être obstrué par les nuages ou d'autres obstacles naturels **[3]**.

I.10.2 Taux d'ensoleillement :

En cas de ciel dégagé et sans nuages, la Terre reçoit un rayonnement solaire direct pendant toute la durée du jour. Le taux d'ensoleillement est défini comme le rapport entre la durée effective d'ensoleillement et la durée maximale possible du jour (du lever au coucher du Soleil), et il est généralement exprimé en pourcentage afin de représenter le degré de disponibilité du rayonnement solaire dans un lieu donné durant une période déterminée **[3]**. La relation suivante est donnée :

$$\delta = \frac{ss}{ss_0} \text{..... I.21}$$

Avec :

SS : Durée d'insolation mesurée.

ss_0: Durée maximale d'insolation.

La durée maximale d'ensoleillement ss_0 pour un site dégagé peut être prise égale à la durée du jour calculée par la formule **[3]** :

$$dj = \frac{2\omega_C}{15} \text{..... I.20}$$

I.11 Conclusion :

Le gisement solaire constitue un indicateur essentiel pour évaluer les projets d'énergie solaire. Son étude permet de déterminer la quantité d'énergie exploitable. Une bonne connaissance du gisement solaire aide à augmenter l'efficacité énergétique, à réduire les coûts de production et à garantir la durabilité des systèmes solaires, tout en tenant compte des variations saisonnières et des conditions climatiques locales.

Chapitre II

Energie solaire photovoltaïque

II.1 Introduction :

Cette étude traite de l'énergie photovoltaïque comme une solution moderne pour la production d'électricité à partir du rayonnement solaire. Ce chapitre a pour objectif de présenter le concept de l'énergie solaire photovoltaïque, ainsi que de comprendre le fonctionnement des cellules photovoltaïques et les principes physiques permettant la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Il aborde également les différentes technologies, leurs caractéristiques et leur efficacité.

II.2 Historique :

En 1839, l'effet photovoltaïque a été découvert par le physicien français Edmond Becquerel, qui a utilisé la lumière du soleil pour produire un courant électrique dans un matériau solide.

En 1875, l'étude de l'effet photoélectrique dans les semi-conducteurs a été développée par Werner von Siemens à l'Académie des sciences de Berlin.

En 1877, des recherches approfondies sur l'effet photoélectrique du sélénium ont été menées par William Grylls Adams et Richard Evans Day.

En 1883, la première cellule solaire au sélénium a été réalisée par Charles Fritts.

En 1954, le rendement et la qualité de la cellule photovoltaïque ont été améliorés par trois chercheurs américains : Daryl Chapin, Calvin Fuller et Gerald Pearson, aux Bell Laboratoires, où la première cellule au silicium à rendement relativement élevé a été développée.

En 1958, le rendement des cellules solaires a atteint environ 9%, et elles ont commencé à être utilisées pour alimenter les satellites en énergie solaire dans l'espace, notamment avec le lancement du satellite.

En 1973, la première maison alimentée par l'énergie solaire a été construite à l'Université du Delaware, aux États-Unis."

En 1983, la première voiture fonctionnant à l'énergie solaire capable de parcourir environ 4 000 kilomètres a été réalisée en Australie.

En 1995, l'installation de panneaux solaires sur les toits des maisons raccordés au réseau électrique a commencé, et leur diffusion s'est poursuivie jusqu'en 2001.

En 1996, le rendement des cellules solaires hybrides a atteint environ 11 % à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL).

En 2002, la puissance installée mondiale des systèmes photovoltaïques a atteint environ 2000 mégawatts.

En 2007, le rendement des cellules solaires organiques a atteint environ 6,5 % à l'Université de Californie, aux États-Unis.

En 2008, une collaboration a été établie entre l'entreprise Heliatek et l'entreprise Yingli Green Energy, ainsi que l'Institut Fraunhofer pour les systèmes d'énergie solaire en Allemagne, afin de développer et d'améliorer les technologies des cellules solaires **[1]**.

Depuis 2010 et jusqu'en 2026, la puissance installée de l'énergie solaire a connu une augmentation considérable à l'échelle mondiale. Parmi les projets les plus importants figure la centrale solaire du Parc Solaire du Barrage de Longyangxia en Chine, dont la capacité a atteint environ 850 mégawatts **[2]**.

II.3 Rayonnement solaire porteur d'énergie:

La lumière du soleil est constituée de photons. Chaque photon transporte une certaine énergie. Cette énergie dépend de la longueur d'onde du rayonnement : plus la longueur d'onde est petite, plus l'énergie est grande, et inversement. Par exemple, les rayons ultraviolets possèdent une faible longueur d'onde et une énergie élevée, tandis que les rayons infrarouges ont une grande longueur d'onde et une énergie faible **[3]**.

De plus, l'énergie dépend également de la fréquence du rayonnement : plus la fréquence est élevée, plus l'énergie du photon est importante. Ainsi, la fréquence est inversement proportionnelle à la longueur d'onde.

L'énergie d'un photon est donnée par la relation suivante :

$$\mathbf{E = hv = \frac{h.c}{\lambda}} \text{..... II.1}$$

Avec :

E: énergie (J).

h: constante de Planck ($h = 6{,}62.10^{-34} j.s$).

v: fréquence (Hz).

c: la vitesse de la lumière(m/s).

λ: longueur d'onde (m).

II.4 L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique basé sur la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Découvert par le physicien français Edmond Becquerel en 1839, il repose sur l'utilisation de matériaux semi-conducteurs possédant des propriétés physiques particulières, permettant la libération d'électrons de leurs atomes lorsqu'ils sont exposés à des photons issus de la lumière solaire, dont l'énergie dépend de leur longueur d'onde. Une fois libérés, ces électrons se déplacent à l'intérieur du matériau, générant ainsi un courant électrique continu, ce qui entraîne l'apparition d'une force électromotrice aux bornes du semi-conducteur, constituant ainsi le principe fondamental de l'effet photovoltaïque **[4]**. La figure suivante représente le principe de l'effet photovoltaïque :

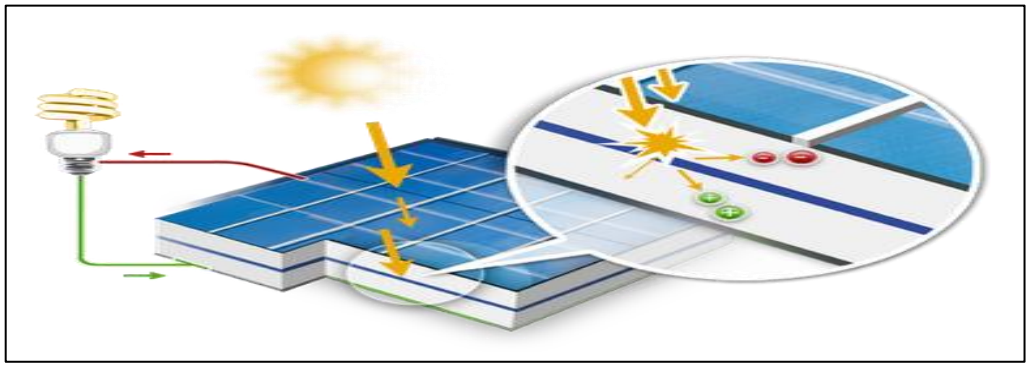


Figure II. 1: Principe de l'effet photovoltaïque **[1].**

II.5 Le silicium métallurgique (MG-Si) CNRS :

II.5.1 Le silicium :

Le silicium est l'un des éléments les plus abondants dans la croûte terrestre, avec une proportion d'environ 28 %. Il se trouve naturellement sous forme de silice (SiO_2), présente dans le sable et le quartz, et se distingue par de bonnes propriétés électroniques.

Dans le domaine des cellules solaires, le silicium est un matériau essentiel. Il est obtenu par réduction de la silice dans un four à arc électrique à une température d'environ 1700 °C. La réaction principale est :

$$\mathbf{SiO_2 + 2C \rightarrow Si + 2CO} \text{……. II.2}$$

Ensuite, le silicium fondu est séparé des impuretés, puis coulé dans des moules. Il subit enfin plusieurs étapes de purification afin d'obtenir un silicium de haute pureté.

Dans le silicium, il existe quatre électrons de valence dans la couche de valence. Lors de la formation de la structure cristalline, chaque atome de silicium se lie à quatre atomes voisins par des liaisons covalentes, ce qui permet à chaque atome de respecter la règle de l'octet et d'obtenir une structure stable. À basse température, le semi-conducteur se comporte presque comme un isolant, car l'énergie disponible n'est pas suffisante pour libérer les électrons des liaisons covalentes. En revanche, à haute température, l'énergie thermique casse certaines liaisons et libère des électrons, ce qui augmente le nombre de porteurs de charge et donc la conductivité électrique. Lorsqu'un électron quitte une liaison dans le silicium, il laisse un emplacement vide appelé « trou ». Un autre électron peut occuper ce vide, ce qui donne l'impression que les trous se déplacent comme des charges positives. Ainsi, les électrons sont des porteurs de charge négative, tandis que les trous sont des porteurs de charge positive. Dans certains cas, un courant de fuite peut apparaître. Afin d'améliorer les propriétés de conduction et de contrôler la conductivité, on utilise le dopage par l'ajout d'impuretés spécifiques. La figure **(II.2)** illustre cette représentation **[5].**

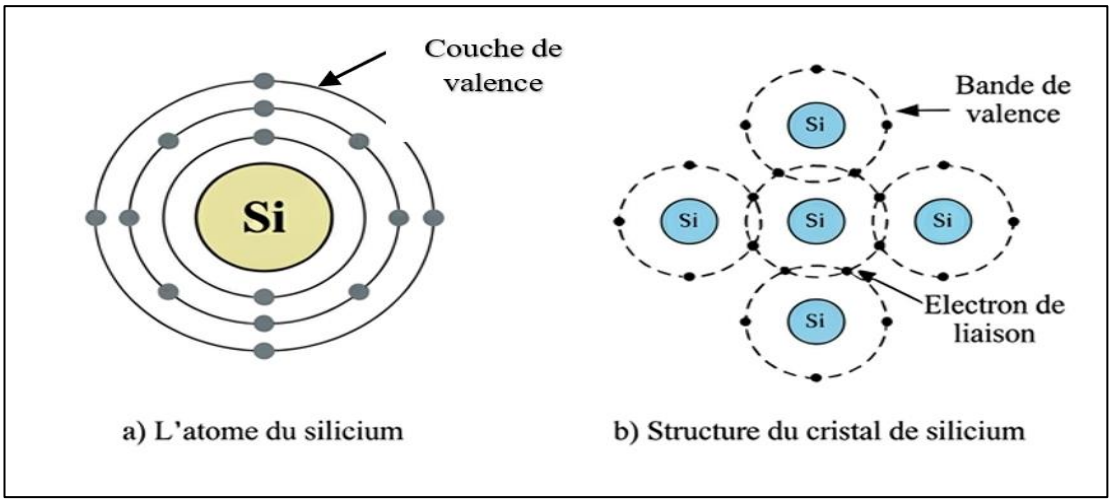


Figure II. 2: Un semi-conducteur plus performant que le silicium **[5]**.

II.5.2 Production du silicium métallurgique :

On obtient le silicium de haute pureté (jusqu'à 99,9999999%, soit 9N) à travers une série de transformations chimiques successives. Dans la première étape, le silicium métallique réagit avec des composés chlorés tels que l'acide chlorhydrique (HCl), ce qui conduit à la formation de gaz appelés chlorosilanes. Le trichlorosilane ($SiHCl_3$) est le plus important car il constitue le vecteur principal du silicium à extraire. Ce composé est ensuite séparé et purifié par distillation, puis soumis à une décomposition thermique, ce qui permet le dépôt du silicium sur des barres de silicium de haute pureté chauffées à environ 1000°C, selon la réaction **[6]** :

$$\mathbf{Si(s) + 3HCl(g) \rightarrow SiHCl_3\,(g) + H_2(g)} \quad \text{..... II.3}$$

Dans la deuxième étape, le trichlorosilane est vaporisé et mélangé avec de l'hydrogène, puis le mélange est injecté dans un réacteur Siemens où il se décompose à la surface de filaments chauffés à environ 1100°C, entraînant le dépôt progressif du silicium selon la réaction :

$$\mathbf{SiHCl_3(g) + H_2(g) \rightarrow Si(s) + 3HCl(g)} \quad \text{..... II.4}$$

Le procédé Siemens permet d'obtenir du silicium polycristallin de très haute pureté, mais il reste très énergivore. Après distillation, la teneur en impuretés devient extrêmement faible, permettant d'obtenir un silicium de qualité électronique, mais de structure polycristalline. Il est donc transformé en silicium monocristallin afin d'améliorer ses

propriétés électriques, à l'aide de la méthode de Czochralski, qui consiste à tirer le cristal dans des conditions contrôlées pour obtenir une structure régulière.

Enfin, le silicium monocristallin subit un dopage par l'ajout contrôlé de faibles quantités d'impuretés afin de modifier ses propriétés électriques et de déterminer le type de porteurs de charge, ce qui permet d'obtenir du silicium de type P ou de type N selon les éléments introduits.

a) Méthode de Czochralski :

La méthode de Czochralski est une technique permettant d'obtenir du silicium monocristallin. Dans ce procédé, le silicium est d'abord fondu dans un creuset spécial jusqu'à devenir liquide. Lorsque la température approche le point de solidification, une très petite pièce de silicium cristallin pur appelée « germe » est introduite. Le silicium fondu commence alors à se fixer sur ce germe et à se solidifier selon la même structure cristalline. Ensuite, le germe est tiré lentement vers le haut tout en étant mis en rotation, ce qui permet la croissance d'un seul cristal bien ordonné. À la fin du processus, on obtient une longue barre de silicium monocristallin **[6]**.

Ces barres sont ensuite transformées en lingots, puis découpées en fines plaques appelées « wafers », dont l'épaisseur est d'environ 200 à 300 µm **[6]**.

La figure suivante représente la Méthode de Czochralski :

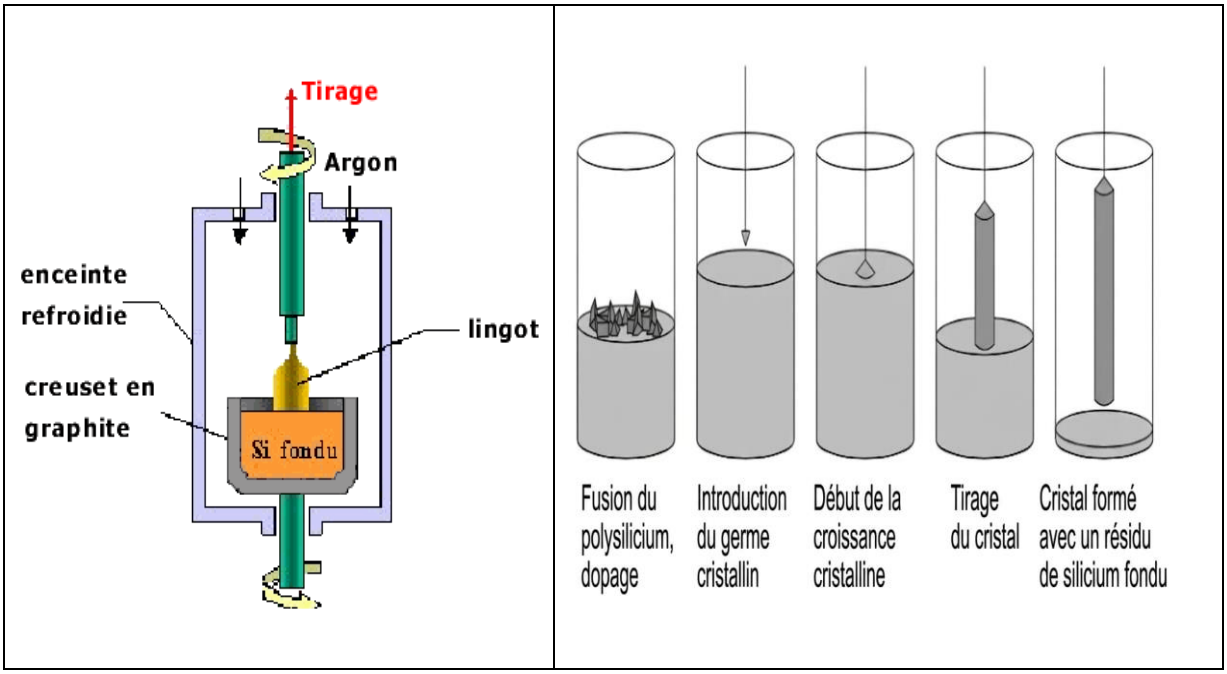


Figure II. 3: La Méthode de Czochralski **[6]**.

b) La continuité de la procédure subit les étapes suivantes [6]:

- Après le découpage du lingot en blocs à l'aide d'une scie à câble ou d'une scie diamantée, ces blocs sont découpés en fines tranches (wafers) d'une épaisseur comprise entre 200 et 300 µm.
- Ces wafers subissent ensuite l'opération de formation de la jonction PN dans un four de diffusion à une température de 800°C.
- L'étape de métallisation consiste à déposer des électrodes afin de collecter le courant électrique.
- On obtient des cellules solaires recouvertes d'une couche antireflet, qui sont testées puis assemblées.
- Ces cellules sont regroupées en chaînes et intégrées pour former un panneau solaire.

II.6 Conversion photovoltaïque :

II.6.1 Semi- conducteurs :

Les semi-conducteurs sont des matériaux dont les propriétés électriques se situent entre celles des isolants et des conducteurs. Ils permettent le passage d'un faible courant électrique grâce à un nombre limité d'électrons libres. Leur comportement est expliqué par la théorie des bandes d'énergie, qui comprend une petite bande interdite permettant le passage des électrons lorsqu'ils acquièrent suffisamment d'énergie. Lorsqu'une différence de potentiel est appliquée, les électrons et les trous se déplacent en sens opposés, ce qui génère un courant électrique.

Les semi-conducteurs se caractérisent par la possibilité de contrôler leur conductivité électrique par le dopage, ce qui permet d'augmenter le nombre de porteurs de charge (électrons ou trous). Parmi les matériaux les plus connus figurent le silicium et le germanium, ainsi que d'autres composés tels que GaAs, InP et CdS **[7]**.

II.6.2 Dopage des semi-conducteurs :

Le dopage est un processus consistant à introduire des impuretés dans un semi-conducteur pur tel que le silicium, ce qui permet de transformer le silicium d'un semi-conducteur intrinsèque en un semi-conducteur extrinsèque. Ce procédé augmente la densité des porteurs de charge dans le matériau, qu'il s'agisse d'électrons ou de trous **[7]**.

a) Dopage de type N :

Le dopage de type N est un processus consistant à introduire des impuretés dans un semi-conducteur pur tel que le silicium, en utilisant des éléments pentavalents. Le phosphore est le plus couramment utilisé, ainsi que d'autres éléments tels que l'arsenic et l'antimoine. Dans la structure cristalline du silicium, quatre électrons de l'atome dopant forment des liaisons covalentes avec les atomes de silicium, tandis que le cinquième électron reste libre et peut se déplacer dans le matériau (électron en excès), ce qui augmente le nombre d'électrons libres. Après la perte de cet électron, l'atome dopant devient un ion positif fixe. Le dopage de type N a pour objectif d'augmenter la concentration des porteurs de charge (électrons) **[7]**. La figure suivante représente le dopage de type N (au phosphore):

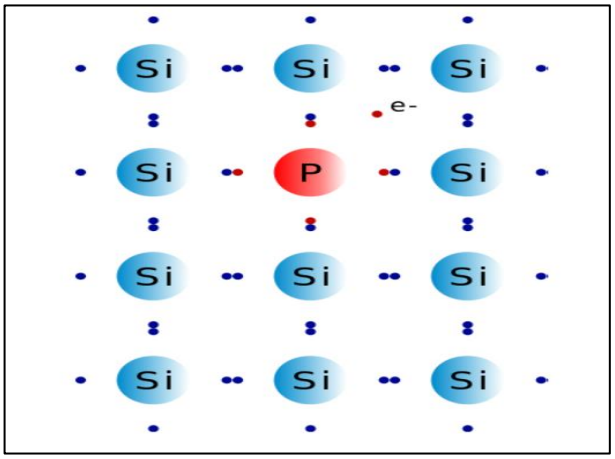


Figure II. 4: Dopage de type N (au phosphore) **[8]**.

b) Dopage de type P :

Le dopage de type P est, en un processus consistant à introduire des impuretés dans un semi-conducteur pur tel que le silicium utilisant des éléments trivalents. Le bore est le plus couramment utilisé, ainsi que d'autres éléments tels que l'aluminium, le gallium et l'indium. Lors de l'introduction de ces atomes dans la structure cristalline, trois électrons de l'atome dopant forment des liaisons covalentes avec les atomes de silicium, tandis qu'un électron manque, ce qui entraîne la formation d'une lacune appelée « trou ». Ce trou

peut se déplacer dans le réseau cristallin et est considéré comme un porteur de charge positif. Après la capture d'un électron, l'atome dopant devient un ion négatif fixe. Le dopage de type P a pour objectif d'augmenter la concentration des porteurs de charge positifs (les trous) **[7]**.

La figure suivante représente le dopage de type P (au bore) :

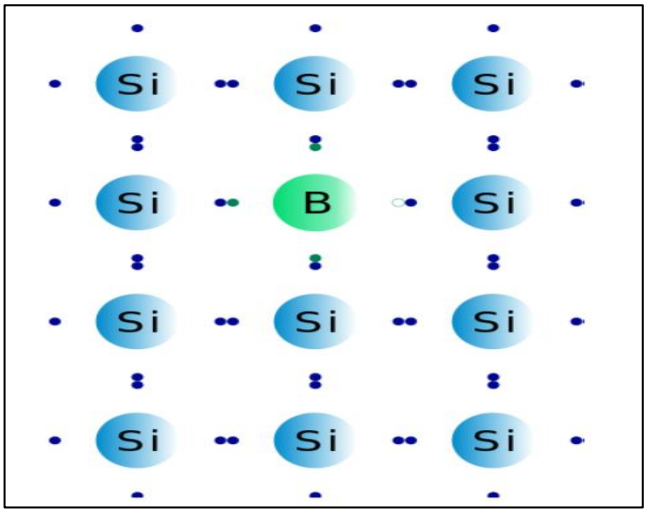


Figure II. 5: Dopage de type P (au bore) **[8]**.

II.6.3 Les techniques de dopage :

Les techniques de dopage des semi-conducteurs sont essentielles pour contrôler leurs propriétés électriques. Il existe quatre principales méthodes **[9]** :

a) Dopage par implantation ionique :

Le dopage par implantation ionique est une méthode qui consiste à introduire des impuretés dans un matériau semi-conducteur à l'aide d'ions accélérés. Dans ce procédé, on choisit des atomes dopants selon le type de dopage (type P ou type N), puis on les transforme en ions chargés électriquement. Ensuite, on les accélère grâce à un champ électrique intense, ce qui leur permet de percuter le matériau semi-conducteur et d'y pénétrer.

Cette technique permet un contrôle précis de la quantité d'atomes implantés. De plus, elle se réalise à basse température. Cependant, son inconvénient est que le bombardement d'un monocristal par des ions peut endommager la structure cristalline du matériau implanté.

b) Dopage par Diffusion thermique :

La diffusion thermique est une méthode de référence pour le dopage des semi-conducteurs, consistant à introduire des impuretés à partir d'une phase gazeuse vers la surface du matériau, formant ainsi un profil de concentration décroissant de la surface vers l'intérieur. Ce procédé nécessite des températures élevées (environ 1000°C) afin de favoriser la diffusion des atomes dans le réseau cristallin. Les dopants peuvent être fournis à partir de sources solides, liquides ou gazeuses.

c) Dopage par technique laser :

Le procédé de dopage par faisceau laser exploite des cycles de fusion-solidification ultrabrefs, dont la cinétique se situe à l'échelle de la nanoseconde (10^{-8}s). Durant la phase liquide transitoire, le dopant bénéficie d'un coefficient de diffusion extrêmement élevé, contrastant avec une mobilité quasi nulle en phase solide. La répétition de ces impulsions permet d'incorporer des impuretés à des niveaux de concentration supérieurs à la limite de solubilité solide à l'équilibre. Cette approche permet ainsi de s'affranchir des contraintes thermodynamiques propres aux techniques de dopage conventionnelles.

d) Dopage par L'épitaxie :

L'épitaxie représente une étape technologique sophistiquée dont le principe fondamental repose sur la croissance cristalline homopitaxiale ou hétéroépitaxiale. Cette méthode consiste à utiliser le réseau atomique du substrat comme germe de nucléation, permettant ainsi d'ordonner les atomes apportés selon une structure cristallographique prédéfinie. La couche ainsi formée, dont les propriétés électriques peuvent être ajustées par un dopage in situ, conserve une continuité structurelle avec le matériau support.

On distingue principalement trois variantes de cette technologie selon le mode de transport des réactifs :

- L'épitaxie par jet moléculaire (MBE) : basée sur l'évaporation thermique sous ultravide.
- L'épitaxie en phase liquide (LPE) : utilisant la précipitation à partir d'une solution saturée.

- L'épitaxie en phase vapeur (VPE) : s'appuyant sur des réactions chimiques gazeuses.

II.6.4 La jonction PN :

Lorsqu'un semi-conducteur de type P est mis en contact avec un semi-conducteur de type N, une jonction PN se forme. Les électrons de la région N et les trous de la région P migrent vers l'interface, où ils se recombinent, entraînant la disparition progressive des porteurs de charge libres près de la jonction.

Après le contact entre les régions de type P et de type N, une zone de déplétion se forme, où subsistent des ions fixes positifs et négatifs en raison de la disparition des porteurs de charge libres. Cette répartition des charges crée un champ électrique interne qui engendre une barrière de potentiel empêchant la poursuite du mouvement des électrons et des trous. Ainsi, aucun courant ne circule à l'état d'équilibre, sauf en cas d'application d'une tension extérieure **[10].** La figure suivante représente la structure de bandes d'une jonction PN :

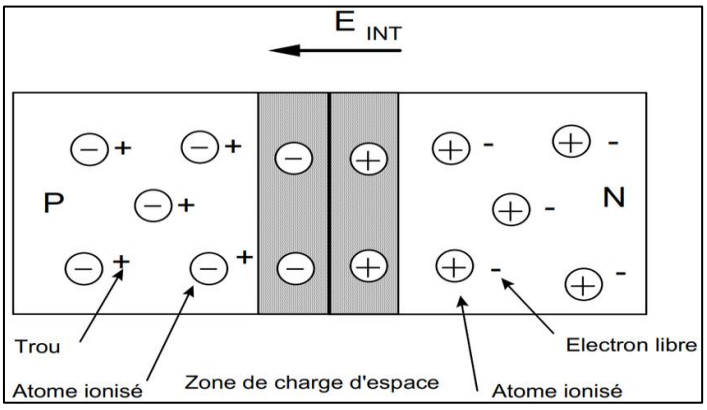


Figure II. 6: La structure de bandes d'une jonction PN **[11]**.

II.7 Cellules PV :

II.7.1 Définition :

La cellule solaire est un composant électronique fabriqué à partir d'un semi-conducteur, qui convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique grâce à l'effet photovoltaïque. Le silicium est le matériau le plus utilisé dans sa fabrication, tandis que le cadmium est utilisé dans certaines technologies comme le CdTe. Une cellule solaire est une fine plaque, et l'assemblage de plusieurs cellules forme un panneau solaire

II.7.2 principes de fonctionnement d'une cellule PV :

La cellule photovoltaïque est un capteur fabriqué à partir d'un matériau semi-conducteur qui convertit l'énergie lumineuse en courant électrique. Elle est composée de deux couches de silicium : une couche P dopée au bore et une couche N dopée au phosphore. Lorsqu'elles sont mises en contact, une jonction PN se forme. Lors de l'exposition à la lumière, des électrons sont libérés et des paires électron-trou sont créées. Les électrons se déplacent vers la couche N et les trous vers la couche P, ce qui génère une différence de potentiel permettant le passage d'un courant électrique lorsqu'un circuit externe est connecté. La figure suivante représente le principe de fonctionnement d'une cellule PV **[12] :**

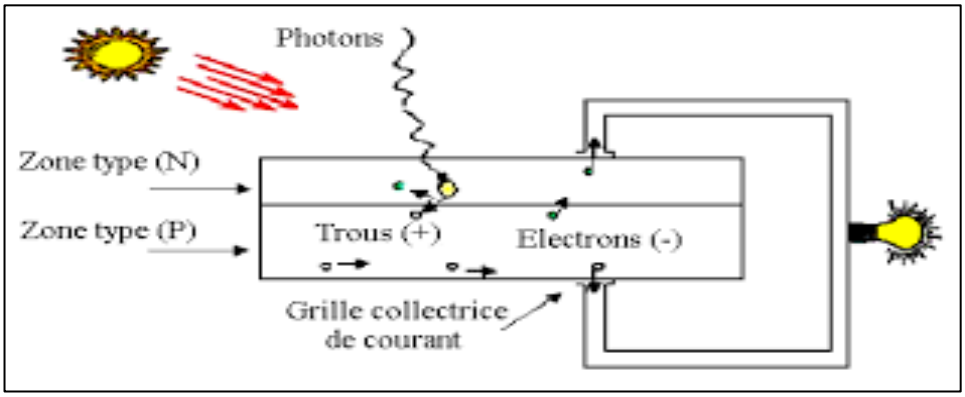


Figure II. 7: Principe de fonctionnement d'une cellule PV **[13].**

II.7.3 Les technologies des cellules PV :

Les cellules photovoltaïques se composent de trois générations principales selon les techniques de fabrication **[14].**

II.7.3.1. Les technologies du silicium cristallin (première génération) :

La première génération de cellules photovoltaïques est la plus répandue industriellement et repose principalement sur le silicium monocristallin et polycristallin. Le silicium monocristallin présente un meilleur rendement (environ 24,7 % en laboratoire et 19,8 % en conditions réelles), mais il est plus coûteux que le polycristallin.

a) Cellule monocristalline :

Elle est constituée d'un seul cristal de silicium découpé en fines tranches. Elle offre un bon rendement (14 % à 16 %), mais son coût de fabrication est élevé et sa production est complexe. La figure suivante représente la cellule monocristalline :



Figure II. 8: Cellule monocristalline **[15].**

b) Cellule polycristalline :

Elle est obtenue par refusion de déchets de silicium pour former des cristaux multiples. Moins coûteuse que la cellule monocristalline, elle présente un rendement plus faible, mais amélioré avec le temps, passant de 8–10 % à environ 16–17 %. La figure suivante représente la cellule polycristalline :

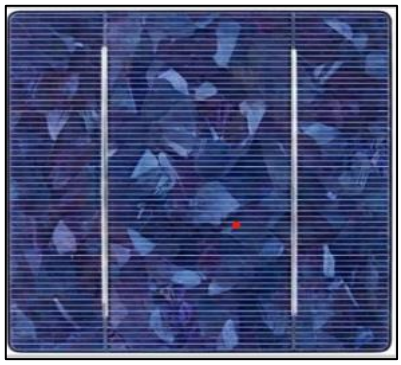


Figure II. 9: Cellule polycristalline **[15].**

II.7.3.2 Les technologies à couches minces (deuxième génération) :

Les technologies photovoltaïques à couches minces reposent sur le dépôt de fines couches de matériaux à fort coefficient d'absorption sur des substrats. Elles ont évolué vers des dispositifs complets et représentent aujourd'hui une technologie prometteuse grâce à leur efficacité et à leur développement rapide.

a) Cellule amorphe :

Elle est basée sur le silicium non cristallin déposé en couche mince. Elle fonctionne bien en faible luminosité et présente un faible coût, mais son rendement reste limité (5–8 %). Elle est utilisée dans des applications de faible puissance comme les montres et les calculatrices solaires. La figure suivante représente la cellule amorphe :

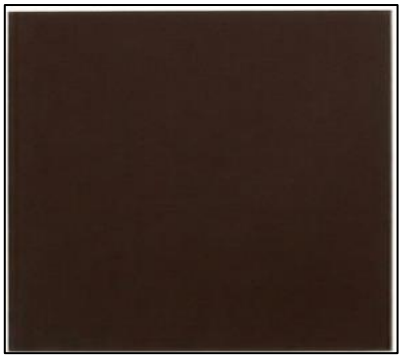


Figure II. 10: Cellule amorphe **[15].**

b) Les cellules au tellurure de cadmium (CdTe) :

Cette technologie présente un bon rendement pouvant atteindre 16,5 % et un fort pouvoir d'absorption grâce à une bande interdite adaptée. Cependant, son utilisation est limitée en raison de la toxicité du cadmium, malgré ses bonnes performances.

c) Cuivre indium sélénium (CIS) / Cuivre indium Gallium sélénium (CIGS) :

Il s'agit d'une technologie prometteuse avec des rendements pouvant atteindre environ 20 % en laboratoire. Toutefois, son développement industriel est limité par la rareté des matériaux utilisés, ce qui freine sa généralisation.

II.7.3.3 Les technologies à base de cellules organiques (troisième génération) :

Les cellules organiques sont une technologie récente de conversion de l'énergie solaire basée sur des matériaux organiques, et elles se divisent en deux types : les cellules à petites molécules et celles à base de polymères. Elles se caractérisent par un faible coût, mais présentent un rendement limité (environ 6 %), ainsi qu'une faible stabilité et une durée de vie courte (environ 1000 heures). Cependant, les avancées en nanotechnologie offrent des perspectives prometteuses pour améliorer leurs performances et permettre le développement de cellules flexibles et peu coûteuses.

Le tableau présente une comparaison des performances des différentes technologies de cellules photovoltaïques **[14] :**

Tableau II. 1: Comparaison des performances des différentes technologies de cellules photovoltaïques.

	Technologies	**Rendement**	**Avantages**	**Inconvénients**	**Durée de vie**
1ére Génération	Silicium monocristallin	14-17%	Bon rendement pour une cellule	Coût élevé, perte de matière première en cours de fabrication	35 ans
	Silicium Poly cristallin	12-15%	Bon rendement Pour Un module	Coût élevé, perte de matière première en cours de fabrication	35 ans
2iéme Génération	Silicium amorphe	6-10%	Facile à fabriquer	Mauvais rendement	< 10 ans
	CdTe	8-11%	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium très polluant	Non évaluée
	CIS/CIGS	10-12%	Énergie de gap ajustable 99% des photons absorbés	Manque de matière première	5 ans
3iéme Génération	Cellules organiques	10%	Faible coût de fabrication, Flexible	Rendement encore trop bas	Faible actuellement

II.7.4 Les associations des cellules photovoltaïques :

Un générateur photovoltaïque est constitué de l'association de plusieurs cellules photovoltaïques, soit en série, soit en parallèle. Lorsqu'elles sont connectées en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, ce qui augmente la tension totale du générateur. En revanche, lorsqu'elles sont connectées en parallèle, c'est le courant qui augmente **[16].**

a) Association des cellules photovoltaïques en série :

Dans une configuration en série, les cellules photovoltaïques sont parcourues par un même courant électrique. La caractéristique électrique équivalente du groupement en série (notée indice s) est obtenue par la somme des tensions pour une valeur de courant donnée.

Ainsi, la tension en circuit ouvert du module est proportionnelle au nombre de cellules associées en série, et s'exprime par la relation :

$$\mathbf{Vcos = Ns.\,Vco} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{II.5}$$

$$\mathbf{Iccs = Icc} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{II.6}$$

Avec :

***Vcos*:** la somme des tensions en circuit ouvert de Ns cellules en série.

***Icc*:** le courant de court-circuit de Ns cellules en série.

La figure suivante représente un schéma des cellules photovoltaïques associées en série :

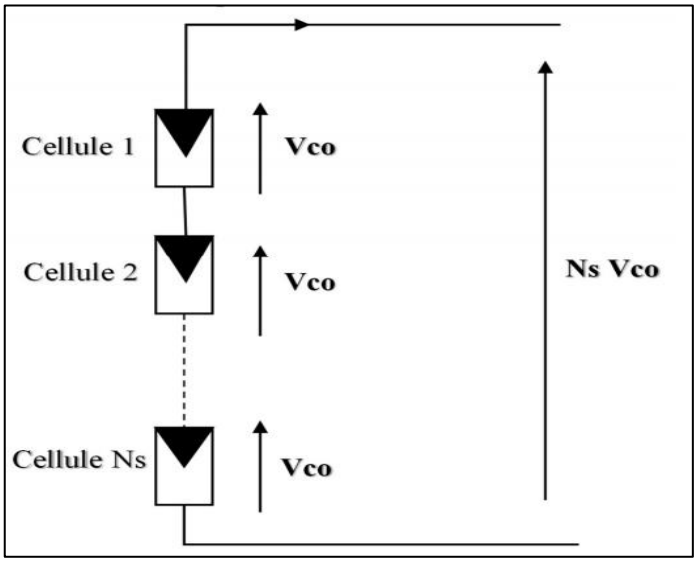


Figure II. 11: Schéma des cellules photovoltaïques associées en série **[16].**

b) Association des cellules photovoltaïques en parallèle :

Dans une configuration en parallèle, l'association des cellules photovoltaïques conduit à une augmentation de l'intensité du courant fourni par le générateur photovoltaïque, du fait de l'addition des courants produits par chaque cellule. Cette méthode de couplage constitue une approche essentielle pour adapter les performances du système aux besoins énergétiques, et s'exprime par la relation :

$$\mathbf{Vcop = Vco} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{II.7}$$

$$\mathbf{Iccp = Np.\,Icc} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{II.8}$$

Avec :

Iccp: la somme des courants de cout circuit de (Np) cellule en parallèle

Vcop: la tension du circuit ouvert de (Np) cellules en parallèle

La figure suivante représente un schéma des cellules photovoltaïques associées en parallèles :

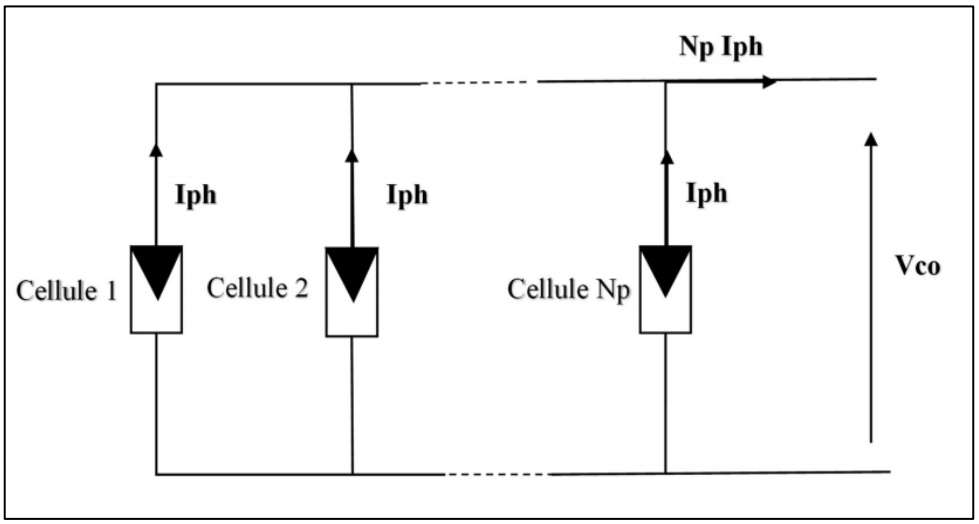


Figure II. 12: Schéma des cellules photovoltaïques associées en parallèle **[16].**

c) Association des cellules photovoltaïques mixte (en série et en parallèle) :

La configuration série–parallèle des cellules photovoltaïques permet d'augmenter simultanément la tension et l'intensité du courant délivré par le générateur photovoltaïque. Cette association combine les avantages des montages en série et en parallèle, offrant ainsi une meilleure adaptation des caractéristiques électriques du système aux exigences de l'application, les valeurs du courant de court-circuit total ainsi que de la tension à vide totale sont déterminées à partir des relations :

$$\mathbf{Vcot = Ns.\,Vco} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{II.9}$$

$$\mathbf{Icc = Np.\,Icc} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{II.10}$$

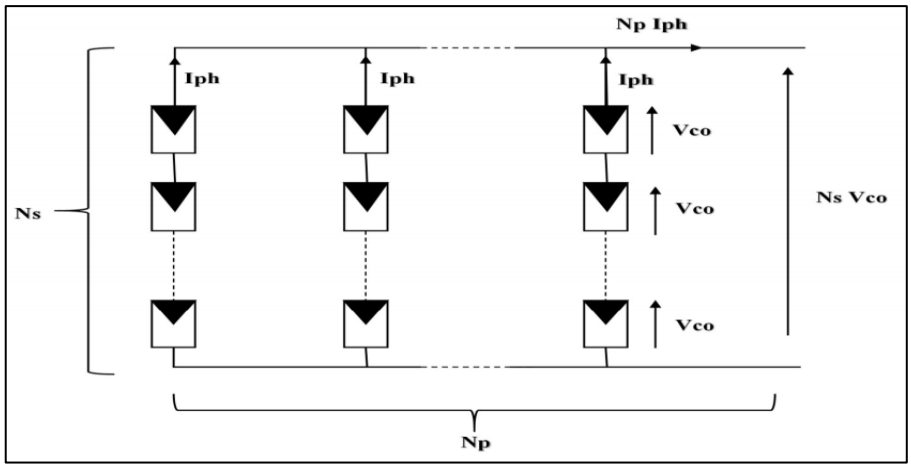


Figure II. 13: Association série-parallèle des cellules PV **[16].**

II.8 Modélisation électrique d'une cellule solaire idéale et réelle (modèle électrique équivalent PV) :

II.8.1 Cas d'une cellule idéale :

Dans le modèle idéal, la cellule solaire à jonction PN, lorsqu'elle est exposée à l'éclairement, est assimilée à une source de courant photo générée montée en parallèle avec une diode. Lorsqu'elle est connectée à une charge externe, ce montage détermine le comportement du courant dans le circuit, où la source lumineuse et la diode contribuent conjointement aux caractéristiques électriques de la cellule. La figure **(II.14)** illustre cette représentation simplifiée correspondant au circuit équivalent d'une cellule solaire idéale **[19].**

La figure suivante représente un schéma équivalent d'une cellule idéale :

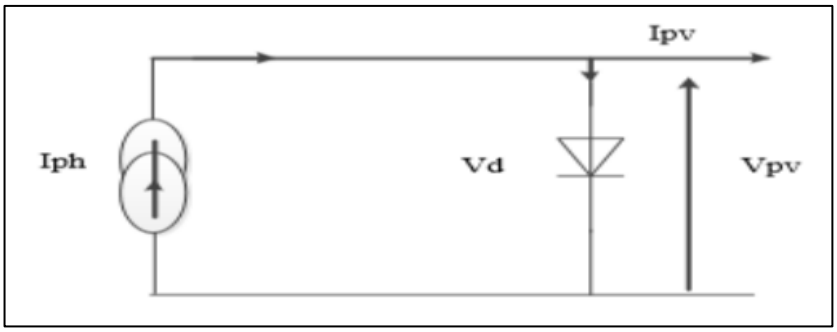


Figure II. 14: Schéma équivalent d'une cellule idéale **[19].**

Les relations mathématiques associées à ce modèle s'écrivent comme suit :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \text{…….. II.11}$$

Le courant photo généré I_{ph} est considéré équivalent au courant de court-circuit I_{CC} lorsque la tension $V_{pv} = 0$, ce qui correspond à une situation où la charge est court-circuitée.

$$\mathbf{I_{ph} = I_{cc} = \frac{E}{E_{ref}}} \text{..... II.12}$$

Avec :

E: L'éclairement absorbé par la cellule.

$\boldsymbol{E_{ref}}$**:** L'éclairement de référence (1000 w/m^2).

$$\mathbf{I_d = I_0 \left(exp\left(\frac{V_d}{V_t}\right) - 1\right)} \text{..... II.13}$$

Avec :

$\mathbf{I_0}$**:** Courant de saturation inverse de la diode.

$\mathbf{V_d}$**:** Tension de la diode.

$$\mathbf{V_t = \frac{N*K*T}{q}} \text{..... II.14}$$

Avec :

$\mathbf{V_t}$: Tension thermique à la température T.

q: Charge de l'électron $(1{,}602 \times 10^{-19}\text{C})$.

K: Constante de Boltzmann.

$\boldsymbol{N}$**:** Facteur d'idéalité de la photopile.

II.8.2 Cas d'une cellule réelle :

Une cellule photovoltaïque peut être assimilée à une diode de grande surface présentant des caractéristiques de fabrication spécifiques. Lorsqu'elle est exposée au rayonnement solaire, elle génère un courant photo-induit noté I_{ph} . Toutefois, une partie de ce courant est perdue au niveau de la jonction en raison du comportement de la diode, ce

qui permet de représenter la cellule par un modèle simplifié constitué d'une source de courant associée à une diode en parallèle.

Dans la pratique, le fonctionnement réel de la cellule ne se limite pas à ce modèle idéal, car plusieurs phénomènes interviennent, tels que les effets résistifs, les recombinaisons des porteurs de charge et les courants de fuite aux bords. Ainsi, le modèle mathématique du générateur photovoltaïque repose sur un circuit équivalent plus complet, comprenant une source de courant (I_{cc}), une diode ainsi qu'une résistance de shunt R_{sh} **[19].** La figure suivante représente un schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque :

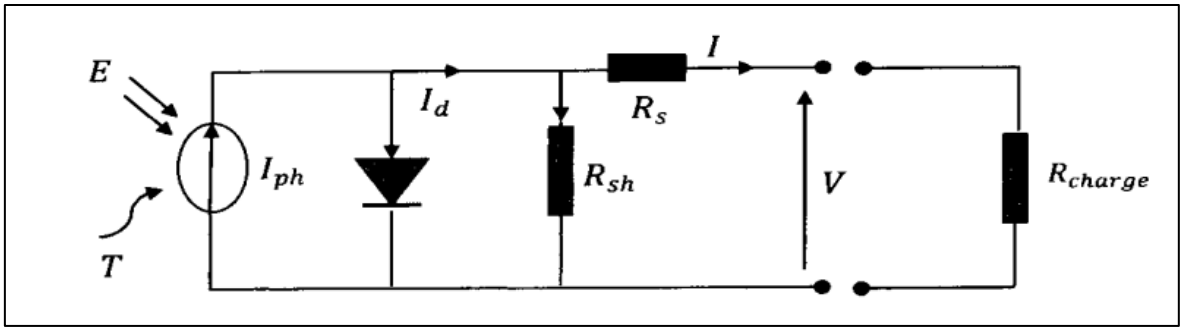


Figure II. 15: Schéma électrique réel d'une cellule photovoltaïque **[19].**

R_s: Représente une résistance série liée à la résistivité interne des matériaux ainsi qu'à l'impédance des électrodes.

R_{sh}: Une résistance shunt associée principalement aux effets de bord et aux phénomènes de recombinaison à l'intérieur de la cellule.

Le photo courant I_{ph} est généré dans la cellule par suite de l'absorption du rayonnement incident, et il est généralement proche du courant de court-circuit.

La loi de Kirchhoff permet d'établir la relation suivante **[21]** :

$$\mathbf{I_{ph} = I_d + I_{sh} + I} \quad \text{..... II.15}$$

D'où l'on déduit :

$$\mathbf{I = I_{ph} - I_d - I_{sh}} \quad \text{..... II.16}$$

Avec :

I_d: courant d'obscurité de la jonction.

I: Le courant produit par la cellule et délivré à la charge.

$\mathbf{I_{sh}}$: Correspond au courant circulant dans les chemins parallèles internes de la cellule.

Après développement et simplification, on obtient l'expression de la caractéristique courant tension (I–V) sous la forme suivante :

$$\mathbf{I = I_{ph} - I_{sat}\left[\exp\left(\frac{V+(I*R_S)}{n*V_t}\right) - 1\right] - \frac{V+(I*R_S)}{R_{sh}}} \text{..... II.17}$$

D'où :

$\mathbf{I_{ph}}$**:** Photo courant produit.

$\mathbf{I_{sat}}$**:** Courant de saturation de la diode

$\mathbf{R_s, R_{sh}}$**:** La résistance série et la résistance parallèle, respectivement.

$\mathbf{V_t = \frac{K*T}{q}}$: Tension thermique à la température T.

q: Charge de l'électron $(1{,}602 \times 10^{-19}\mathrm{C})$.

K: Constante de Boltzmann.

n: Facteur de non-idéalité de la jonction.

T: Température effective de la cellule en degré Kelvin.

II.8.3 Caractéristique électrique d'une cellule solaire :

Après la modélisation, on obtient une équation mathématique qui décrit le comportement électrique d'une cellule solaire. À partir de cette équation, on peut tracer les caractéristiques électriques, notamment la courbe courant–tension (I–V).

La courbe I–V permet de déterminer les points importants du fonctionnement de la cellule solaire, tels que le courant de court-circuit (I_{cc}) et la tension à circuit ouvert (V_{oc}), ainsi que le point de puissance maximale (MPP) **[17]**. La figure suivante représente les caractéristiques I-V d'une cellule :

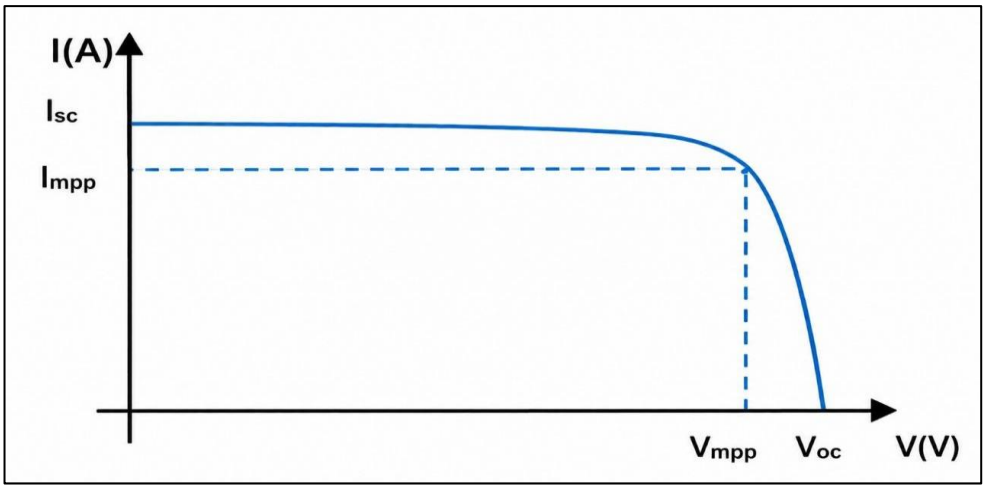


Figure II. 16: Caractéristique I-V d'une cellule **[18].**

Les conditions de test standard (STC) sont adoptées afin d'assurer une comparaison fiable des performances des cellules photovoltaïques dans un environnement contrôlé. Elles se définissent par un éclairement de 1000 W/m², une température de cellule fixée à 25°C, ainsi qu'un spectre solaire de type Air Mass 1.5 (AM1.5). Ce dernier indique que le rayonnement solaire traverse une épaisseur d'atmosphère équivalente à 1,5 fois celle parcourue lorsque le soleil est au zénith, ce qui correspond à une inclinaison d'environ 45°. Ces paramètres normalisés permettent d'obtenir une évaluation précise et cohérente des caractéristiques électriques et du rendement des cellules photovoltaïques **[12]**.

II.8.4 Paramètres électriques d'une cellule photovoltaïque :

Il existe plusieurs paramètres électriques qui caractérisent le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque **[12] :**

a) Puissance de crête (Pc) :

C'est la puissance électrique maximale que le module peut fournir dans des conditions standards, soit une température de 25°C et un éclairement de 1000 W/m².

b) courant-tension (I = f(V)) :

Elle représente la relation entre le courant et la tension aux bornes du module, et permet d'étudier son comportement ainsi que de déterminer son point de fonctionnement.

c) Tension à vide (V_{oc}) :

C'est la tension aux bornes du module lorsqu'aucun courant ne circule (circuit ouvert), sous un éclairement solaire.

d) Courant de court-circuit (I_{sc}) :

C'est le courant maximal fourni par le module lorsque ses bornes sont reliées directement (court-circuit), sous un rayonnement solaire.

e) Point de puissance maximale (P_m) :

C'est le point de fonctionnement optimal où la puissance est maximale. Elle est donnée par la relation :

$$P_m = V_{mpp} \times I_{mpp} \text{..... II.18}$$

Avec :

I_m: courant maximal.

V_m: tension maximale

f) Rendement :

Il correspond au rapport entre la puissance électrique produite et la puissance du rayonnement solaire incident sur le module :

$$\eta = \frac{Pm}{Pi} \text{..... II.19}$$

g) Facteur de forme (FF) :

C'est un paramètre indiquant la qualité du module. Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale et la puissance théorique :

$$FF = \frac{Pm}{Vco \times Icc} \text{..... II.20}$$

II.9 Les avantages et les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

Le système photovoltaïque présente plusieurs avantages, mais il comporte également certains inconvénients à prendre en considération **[19]**.

II.9.1 Les avantage de l'énergie photovoltaïque :

- Le système photovoltaïque est fiable car il utilise le soleil comme source d'énergie permanente, et fonctionne longtemps avec un entretien minimal.
- Il réduit la dépendance au réseau électrique et diminue les factures à long terme.
- Il ne produit ni pollution ni émissions de CO_2.
- Il est possible d'ajouter des panneaux supplémentaires selon les besoins.
- Il peut être utilisé loin du réseau électrique, ce qui le rend adapté aux régions isolées.

II.9.2 Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

- L'installation d'un système photovoltaïque nécessite un investissement initial élevé pour l'achat des panneaux, des batteries et de l'onduleur.
- La production d'électricité diminue les jours nuageux ou la nuit.
- Les panneaux nécessitent un espace suffisant pour générer une puissance adéquate.
- Les batteries sont coûteuses et peuvent nécessiter un entretien régulier.
- La fabrication des modules photovoltaïques est un processus sophistiqué et exige des investissements élevés.
- Les systèmes solaires ne peuvent rivaliser avec les générateurs diesel que dans des situations de faible demande en énergie, notamment dans les zones isolées.

II.10 Conclusion

En conclusion, ce travail a porté sur l'étude de l'énergie photovoltaïque à travers l'analyse des différentes méthodes de développement des cellules afin d'améliorer leur rendement, ainsi que l'identification des types de cellules, leurs caractéristiques et leurs modes de connexion en série et en parallèle, et leur influence sur les performances électriques. L'énergie photovoltaïque est considérée comme une solution prometteuse pour la production d'électricité propre et durable.

Chapitre III

Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome

III.1 Introduction :

Ce chapitre traite du concept de dimensionnement d'un système photovoltaïque comme une étape essentielle de sa conception, consistant à déterminer ses composants en fonction des besoins énergétiques et des conditions du site. Il aborde également les composants du système, tels que les panneaux solaires, le régulateur de charge, les batteries, l'onduleur et les câbles, en expliquant leur rôle dans la production, le stockage et le transport de l'énergie afin d'assurer un fonctionnement efficace et continu.

III.2 Différents types de systèmes photovoltaïques :

III.2.1 Système autonome :

Le système photovoltaïque autonome est utilisé loin du réseau électrique et repose sur l'énergie solaire pour alimenter directement les charges ou à travers un regulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking) afin d'améliorer le rendement ; la figure suivante représente le système autonome **[1]**.

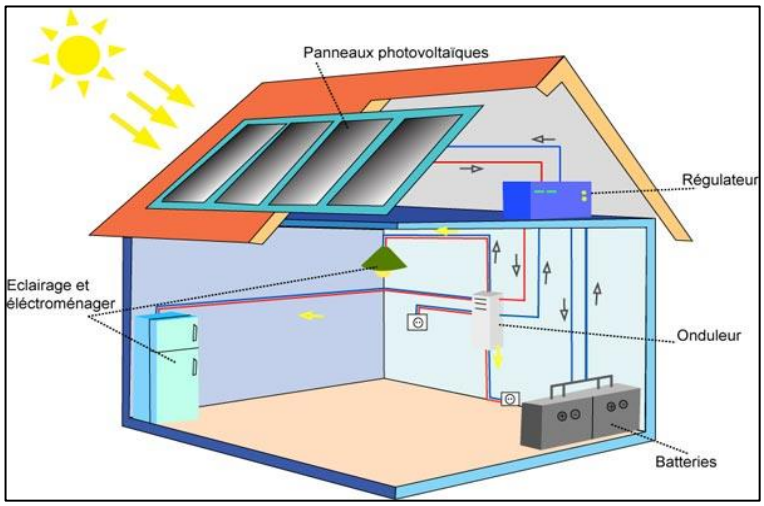


Figure III.1: Système autonome **[2].**

III.2.2 Système hybride :

Les systèmes hybrides reposent sur la combinaison de sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie solaire et éolienne, avec la possibilité d'ajouter des sources conventionnelles comme les groupes électrogènes diesel afin d'assurer une production électrique stable et continue, notamment dans les zones isolées. Ils se divisent

en deux types : les systèmes à bus continu (DC Bus) et les systèmes à bus alternatif (AC Bus). La figure suivante représente un système hybride **[1]**.

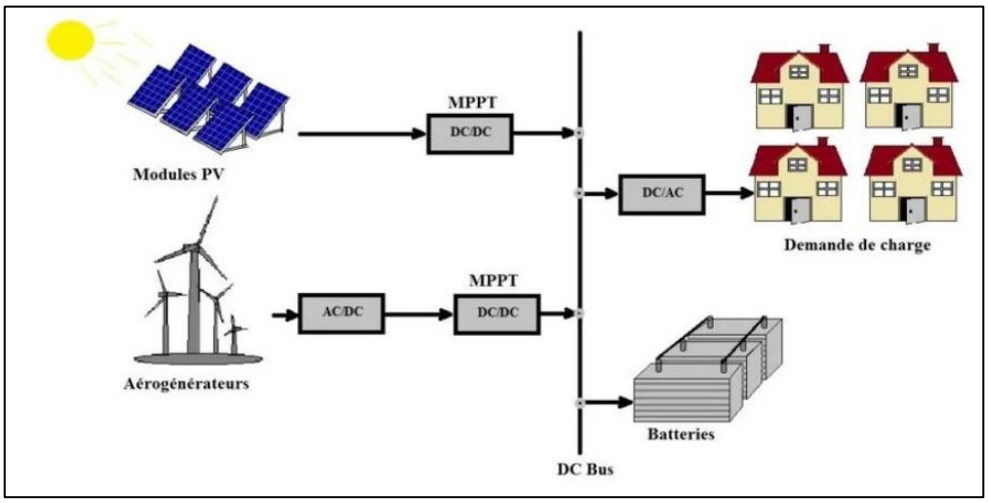


Figure III. 2: Système hybride **[3].**

III.2.3 Systèmes connectés au réseau :

Les systèmes photovoltaïques connectés au réseau produisent l'électricité localement et permettent un échange d'énergie avec le réseau (injection de l'excédent ou prélèvement en cas de besoin), ce qui réduit les coûts et améliore la stabilité ainsi que la fiabilité de l'alimentation électrique. La figure suivante représente un système connecté au réseau **[1]**.

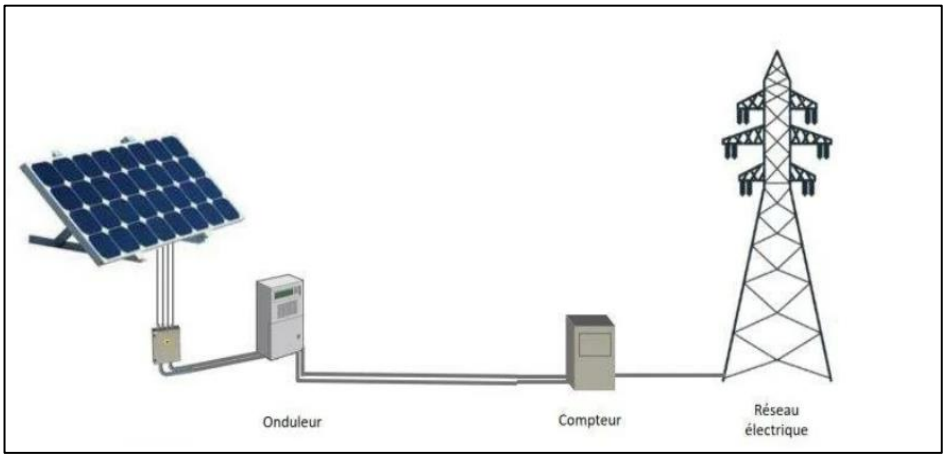


Figure III.3: Systèmes connectés au réseau **[3].**

III.3 Les composants d'un système photovoltaïque :

Le système photovoltaïque est composé de plusieurs éléments qui travaillent ensemble pour transformer l'énergie solaire en électricité utilisable, puis la distribuer ou la stocker selon les besoins.

III.3.1 Les panneau solaires :

Le panneau solaire est un ensemble de cellules photovoltaïques interconnectées entre elles, et plusieurs panneaux solaires forment une unité photovoltaïque. Les cellules peuvent être connectées de différentes manières : elles sont reliées en parallèle pour augmenter l'intensité du courant, et il est possible de combiner les deux types de connexions afin d'obtenir des valeurs électriques adaptées aux besoins **[4]**. La figure suivante représente le mode de connexion des panneaux solaires.

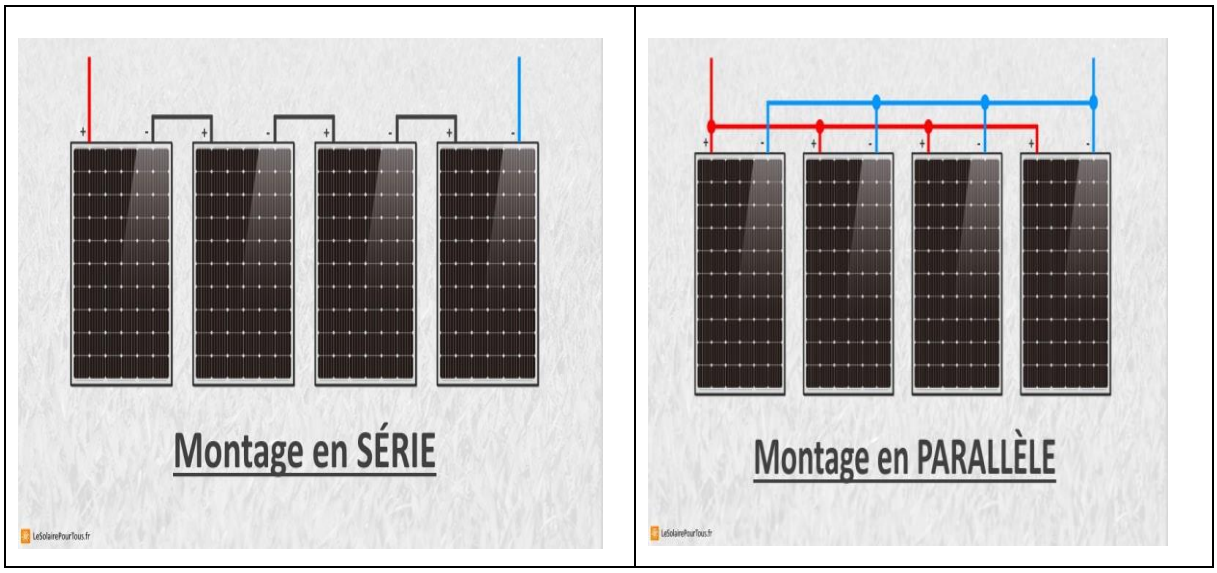


Figure III.4: Le mode de connexion des panneaux solaires **[5]**.

III.3.2 Convertisseur DC/AC :

L'onduleur est un dispositif de conversion statique qui transforme le courant continu (DC) en courant alternatif (AC) à l'aide de composants électroniques de puissance. Il permet d'obtenir une tension alternative dont la fréquence et la valeur efficace peuvent être ajustées selon les besoins de l'application. La figure suivante représente le symbole de l'onduleur **[6]**.

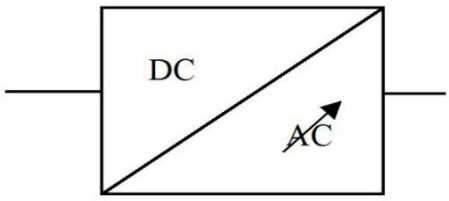


Figure III.5: Symbole d'un onduleur **[7]**.

III.3.2.1 Caractéristique des onduleurs :

Les principales caractéristiques des onduleurs peuvent être présentées comme suit :

- Le rendement : c'est le critère principal ; on privilégie un onduleur ayant un rendement élevé sur une large plage de puissances.
- La tension d'entrée : elle doit correspondre à la tension du système installé.
- La puissance nominale : c'est la puissance que l'onduleur peut délivrer en fonctionnement permanent et continu.
- La forme d'onde : elle doit être compatible avec les appareils alimentés, en tenant compte des tolérances de tension et de fréquence propres à chaque appareil.
- La distorsion harmonique (THD) : elle doit être la plus faible possible afin d'éviter tout dysfonctionnement des appareils connectés **[8]**.

La figure suivante représente la caractéristique des onduleurs :



Figure III.6: Caractéristique des onduleurs **[9]**.

III.3.3 Batterie :

La batterie est un dispositif qui transforme l'énergie chimique en énergie électrique. Elle peut être rechargeable ou non rechargeable. Elle est composée de cellules contenant deux électrodes et un électrolyte permettant le passage des ions. À l'intérieur, des réactions d'oxydoréduction produisent un courant électrique lorsqu'elle est reliée à un circuit électrique externe.

Cette opération est représentée par l'équation suivante :

$$\textbf{L'énergie chimique} \xrightarrow{\text{décharge}} \textbf{énergie électrique} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{III.1}$$

$$\textbf{L'énergie électrique} \xrightarrow{\text{charge}} \textbf{énergie chimique} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{III.2}$$

III.3.3.1 Composition des batteries :

Un accumulateur électrochimique est composé de deux électrodes (anode et cathode) immergées dans un électrolyte permettant le déplacement des ions, tandis que les électrons circulent dans le circuit externe. Grâce aux réactions électrochimiques entre les électrodes et l'électrolyte, l'énergie chimique est convertie en énergie électrique utilisable **[11]**.

La figure suivante représente un accumulateur électrochimique :

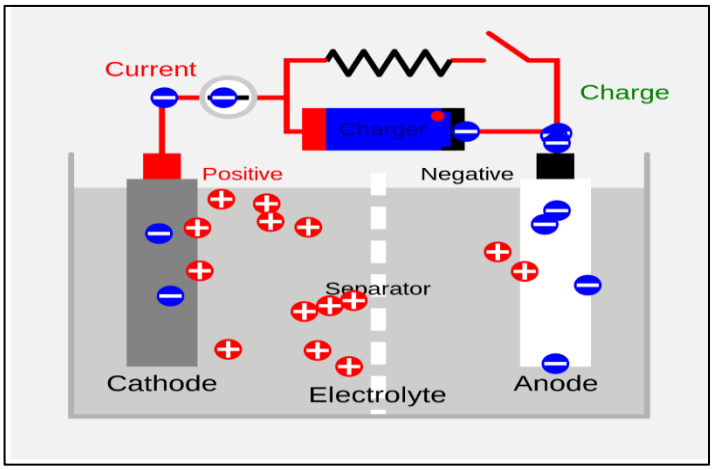


Figure III. 7 : Un accumulateur électrochimique **[11]**.

III.3.3.2 Caractéristiques de la batterie :

La batterie se caractérise par plusieurs propriétés essentielles qui déterminent ses performances et son comportement dans un système énergétique.

a) Tension (voltage) :

C'est la tension de fonctionnement du système. Une batterie est constituée de plusieurs éléments, chacun ayant une tension d'environ 2 volts, variable selon l'état de charge et les conditions d'utilisation. Par exemple, une batterie de 12 volts est composée de 6 éléments. Dans les systèmes solaires, les tensions les plus utilisées sont 12 V, 24 V et 48 V **[8]**.

b) Capacité :

La capacité d'une batterie représente la quantité d'énergie qu'elle peut stocker et fournir avant décharge complète. Elle s'exprime en ampères-heures (Ah). Par exemple, une batterie de 100 Ah peut fournir 1 A pendant 100 heures ou 2 A pendant 50 heures. L'énergie stockée peut être calculée par **[12]** :

$$E\,(Wh) = C\,(Ah) \times T\,(V) \quad \text{..... III.3}$$

c) Charge et décharge :

Lors de la charge, la batterie reçoit de l'énergie et la tension augmente progressivement jusqu'à environ 2,6 – 2,7 V par élément en charge cyclique. Lors de la décharge, la tension reste stable au début puis chute rapidement jusqu'à environ 1,8 V, nécessitant une recharge pour maintenir les performances **[8]**.

d) Rendement :

Le rendement d'une batterie est le rapport entre l'énergie restituée et l'énergie fournie lors de la charge **[13]**.

e) Taux d'autodécharge :

Il s'agit de la perte progressive de charge lorsque la batterie n'est pas utilisée. Ce phénomène augmente avec la température, le vieillissement, un mauvais entretien ou une décharge profonde **[12]**.

f) Surcharge :

La surcharge correspond à un excès de charge pouvant endommager la batterie et réduire sa durée de vie. Une décharge profonde prolongée peut également entraîner une perte de capacité permanente **[12]**.

g) État de charge (State of Charge) :

Le SOC indique la quantité d'énergie restante dans la batterie par rapport à sa capacité totale. Il permet d'éviter les surcharges et les décharges profondes susceptibles d'endommager la batterie **[12]**.

h) Profondeur de décharge (Depth of Discharge) :

La DoD représente le pourcentage d'énergie utilisée par rapport à la capacité totale. Plus la profondeur de décharge est élevée, plus la durée de vie de la batterie diminue **[12]**.

i) Durée de vie :

La durée de vie d'une batterie correspond au nombre de cycles charge/décharge qu'elle peut supporter avant que sa capacité ne tombe à environ 80 % de sa valeur initiale. Elle dépend principalement de la température et de la profondeur de décharge, des conditions modérées augmentent sa longévité **[12]**.

III.3.3.3 Les type de batteries :

Il existe plusieurs types de batteries utilisées dans les systèmes photovoltaïques, parmi lesquelles **[6]** :

- Les batteries au plomb-acide.
- Les batteries au lithium.
- Les batteries au nickel.

a- L'Acide-Plomb :

Les batteries au plomb-acide constituent l'un des moyens de stockage d'énergie les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques, en raison de leur faible coût, de leur facilité d'utilisation et de leur fiabilité acceptable **[6]**.

La batterie au plomb fonctionne en convertissant l'énergie chimique en énergie électrique lors de la décharge, et l'inverse lors de la charge. Elle est constituée d'une électrode positive en dioxyde de plomb, d'une électrode négative en plomb, ainsi que d'un électrolyte à base d'acide sulfurique. Pendant la décharge, du sulfate de plomb et de l'eau se forment, tandis que lors de la charge la réaction inverse se produit afin de régénérer les matériaux actifs **[16]**.

La figure suivante représente la composition de la batterie acide-plomb :

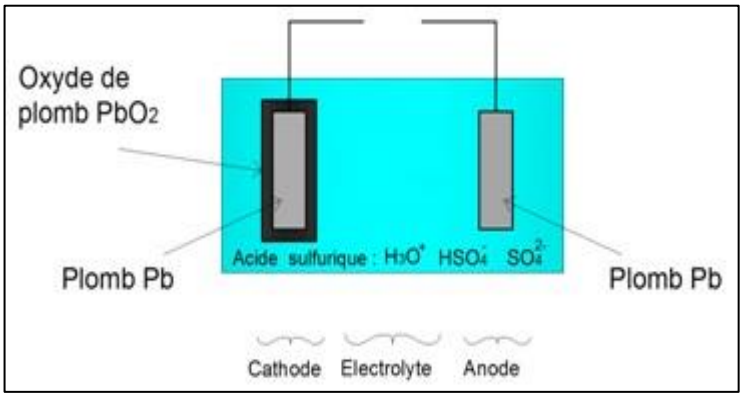


Figure III. 8 : Composition de la batterie acide-plomb **[10]**.

b- Réactions chimiques dans une batterie Plomb acide :

1) Réaction chimique en décharge :

Lors de la décharge de la batterie au plomb, les matériaux des électrodes sont consommés et du sulfate de plomb ($PbSO_4$) se forme à leur surface **[8]**.

A l'anode $Pb \rightarrow Pb^{+2} + 2e^-$ (Oxidation) **..... III.4**

A la cathode $PbO_2 + 4H^+ + 2e^- \rightarrow Pb^{+2} + 2H_2O$ (Reduction) **..... III.5**

$$Pb + PbO_2 + 4H^+ + 2SO_4 \rightarrow 2PbSO_4 + 2H_2 \text{..... III.6}$$

2) Réaction chimique en charge :

Lors de la charge d'une batterie au plomb, le sulfate de plomb ($PbSO_4$) présent sur les électrodes disparaît et les électrodes retrouvent leur état initial **[8].**

A l'anode $Pb^{+2} + 2H_2O \rightarrow PbO_2 + 4H^+ + 2e^-$ (Oxidation) **..... III.7**

A la cathode $Pb^{+2} + 2e^- \rightarrow Pb$ (Reduction) **..... III.8**

$$2PbSO_4 + 2H_2O \rightarrow Pb + PbO_2 + H_2SO_4 \text{..... III.9}$$

Parmi les types de batteries au plomb-acide, on trouve les batteries au gel, qui sont des batteries étanches ne nécessitant pas d'entretien. Dans ce type de batterie, l'électrolyte se présente sous forme de gel, ce qui réduit la perte d'eau et limite l'autodécharge. Elles offrent également de bonnes performances dans différentes conditions d'utilisation **[11]**.

La figure suivante représente la composition batterie plomb au gel :

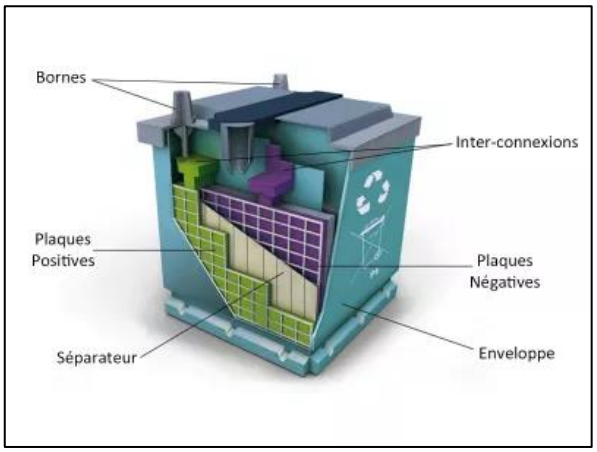


Figure III.9: Composition d'une batterie plomb-gel **[11].**

III.3.4 Régulateur :

Le régulateur de charge est un dispositif du système solaire qui surveille la tension de la batterie et contrôle la charge provenant des panneaux photovoltaïques. Il protège la batterie contre la surcharge et la décharge profonde, prolonge sa durée de vie, coupe automatiquement le courant lorsque les valeurs deviennent dangereuses et évite les dommages causés par un courant trop élevé. La figure suivante représente in régulateur solaire :



Figure III. 10 : Régulateur solaire **[14]**.

III.3.4.1 Types de régulateurs :

On trouve trois types de régulateurs de charge : le régulateur « tout ou rien », le régulateur PWM et le régulateur MPPT **[11]**.

- **Régulateur Tout ou rien** : il fonctionne comme un interrupteur, il connecte les panneaux à la batterie ou les déconnecte lorsque la tension maximale est atteinte. Il est simple mais moins efficace.
- **Régulateur PWM** : il contrôle la charge par la modulation des impulsions, ce qui permet une meilleure charge de la batterie et d'atteindre un état de charge complet.
- **Régulateur MPPT :** il recherche le point de puissance maximale des panneaux et adapte la tension et le courant à la batterie. Il est le plus efficace mais plus coûteux.

III.3.5 Les charges :

Les systèmes photovoltaïques alimentent des appareils fonctionnant en courant continu et d'autres en courant alternatif, ces derniers nécessitant un onduleur. Cependant, la conversion du courant entraîne des pertes d'énergie et une augmentation du coût du système. Il est donc préférable d'utiliser, dans la mesure du possible, des appareils fonctionnant directement en courant continu afin d'améliorer l'efficacité du système et de mieux exploiter l'énergie produite **[15]**.

III.3.6 Câblage :

Le câblage d'un système photovoltaïque consiste à relier électriquement les différents équipements du système selon un schéma précis garantissant le bon fonctionnement, la sécurité et l'efficacité de l'installation photovoltaïque **[11]**.

La figure suivante représente un schéma de câblage d'un système photovoltaïque autonome :

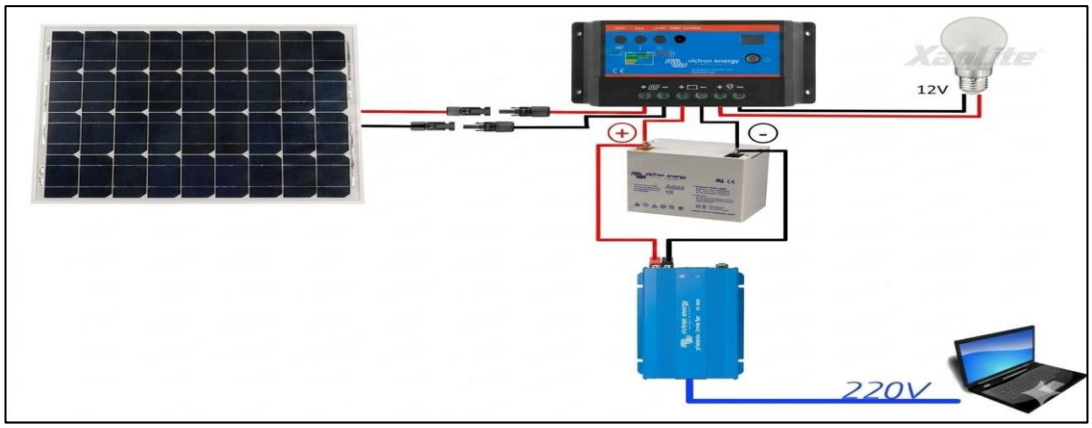


Figure III. 11 : Schéma de câblage d'un système photovoltaïque autonome **[21]**.

III.3.7 Dispositifs de protection d'un système photovoltaïque :

a) Protections en DC :

Entre les modules photovoltaïques, les strings et l'entrée de l'onduleur, il est nécessaire d'assurer le sectionnement en charge ainsi que la limitation des courants de retour et des surtensions afin de garantir la sécurité et la protection des différents équipements du système photovoltaïque. Pour cela, plusieurs dispositifs de protection sont utilisés, notamment **[22]** :

- Interrupteur-sectionneur DC.
- Fusibles gPV par string.
- SPD Type 2 DC (dispositif de protection contre les surtensions en courant continu de type 2).

b) Protections en AC :

De l'onduleur jusqu'au tableau principal, il est nécessaire de protéger les circuits, les personnes ainsi que les équipements contre les surintensités et les surtensions afin d'assurer le bon fonctionnement et la sécurité de l'installation photovoltaïque :

- Disjoncteur modulaire (MCB).
- Différentiel (DDR).

- SPD Type 2 AC (dispositif de protection contre les surtensions en courant alternatif de type2) ou dispositifs combinés.

III.4 Dimensionnement :

Le dimensionnement d'un système photovoltaïque consiste à choisir ses composants en fonction de l'ensoleillement et des besoins énergétiques. Il vise à équilibrer production et stockage afin d'assurer une alimentation fiable tout en réduisant les coûts et en améliorant les performances **[17]**.

III.4.1 Les méthodes de dimensionnement d'un système PV :

Il existe plusieurs méthodes de dimensionnement d'un système photovoltaïque :

a) Méthode de probabilité d'erreur sur la consommation (L.L.P) :

Cette méthode permet d'optimiser le dimensionnement d'un système dans des conditions complexes (fluctuation saisonnière de l'irradiation, ciel couvert (nuageux), etc.) grâce à un logiciel adapter. L'inconvénient de cette méthode est qu'il faut connaître les radiations pour un nombre d'années très grand (10 ans minimum) [18]. et cela est exprimé par une relation mathématique **[6]** :

$$\mathbf{LPP = \frac{E_{Df}}{E_{Dm}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ III.10}$$

Avec :

$\mathbf{E_{Df}}$: Energie déficitaire.

$\mathbf{E_{Dm}}$: Energie demandée.

b) Méthode de la moyenne annuelle :

C'est une méthode qui consiste à estimer l'énergie récupérable sur une période critique d'un mois, appelée le mois le plus défavorable, et qui repose sur l'irradiation solaire journalière (kWh/m²/jour). Ce mois représente la période pendant laquelle la valeur moyenne mensuelle de l'irradiation solaire est la plus faible au cours de l'année **[18]**.

c) Méthode LPSP (Loss of Power Supply Probability) :

La méthode LPSP est une approche probabiliste utilisée pour dimensionner les systèmes photovoltaïques autonomes. Elle évalue la probabilité que le système ne puisse pas satisfaire la demande en énergie. Elle représente le rapport entre le déficit d'énergie et l'énergie demandée, en tenant compte des variations de l'irradiation solaire et de la demande électrique **[18]**.

Elle peut être exprimée en fonction du niveau de charge de la batterie comme suit **[20] :**

$$\mathbf{E_{bat} = E_{bat}(t-1)(1-\sigma) + \left[\frac{EL(t)}{\eta ond} - E_s(t)\right]} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{III.11}$$

Avec :

$\mathbf{E_{bat}}$: Energie stockée dans la batterie à une heure.

$\mathbf{E_{bat}(t-1)}$: Energie stockée dans la batterie à l'heure précédente.

$\boldsymbol{\sigma}$**:** Taux horaire d'autodécharge.

$\mathbf{EL(t)}$: Energie demandée par la charge à une date t (Wh).

$\boldsymbol{\eta ond}$**:** Rendement de l'onduleur.

$\mathbf{E_s(t)}$: Energie produite par la source (Wh).

d) Méthode des heures équivalentes :

Cette méthode repose sur le principe selon lequel la puissance d'un module photovoltaïque est proportionnelle à l'intensité du rayonnement solaire. Le dimensionnement du système est réalisé en se basant sur le mois le plus défavorable sur le plan climatique au cours de l'année, afin de garantir un fonctionnement fiable même dans les conditions les plus sévères. Ainsi, cette approche permet d'estimer le courant produit par le champ photovoltaïque en tenant compte de l'influence de la température, qui est exprimée par la relation suivante **[18]** :

$$\mathbf{Tj = Tu + 25} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{III.12}$$

Avec :

Tu: Température diurne.

L'énergie fournie par un module photovoltaïque ou une série de modules suivant la tension du système est donnée par l'expression suivante :

$$\mathbf{E = IV\left(\frac{G}{B}\right)\mu \times S} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{III.13}$$

Avec :

G : Energie incidente reçue sur le plan des modules.

V : Tension du générateur PV.

B : Eclairement de référence.

μ : Coefficient d'intégration.

S : Coefficient de sécurité.

e) Méthode itérative :

La méthode dite « ampère-heure » consiste à déterminer le nombre de panneaux photovoltaïques nécessaires pour couvrir la demande énergétique, puis à ajuster progressivement ce nombre tout en calculant la part des besoins énergétiques annuels assurée par le générateur photovoltaïque. Le reste est ensuite complété par une source d'énergie supplémentaire **[17]**.

- **Estimation de la production d'énergie :**

On calcule l'énergie quotidienne moyenne nécessaire à produire E_p afin de déterminer les besoins mensuels. Cette énergie, exprimée en Wh, est égale à l'énergie consommée par la charge $\mathbf{E_C}$, corrigée par un coefficient **K** afin d'assurer une bonne couverture des besoins du logement.

$$\mathbf{E_p = \frac{E_C}{K}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{III.14}$$

Le coefficient k tient compte des facteurs suivants :

- Le rendement du convertisseur.

- Le rendement des cycles de charge et de décharge de la batterie.
- Les pertes dans les câbles et connexions.

- **Détermination de la capacité de stockage des batteries**

La capacité des batteries est donnée par la formule suivante **[18]** :

$$\mathbf{C = \frac{Ep \times N}{U \times DOD \times ft}} \text{..... III.15}$$

Avec :

U : Tension du système.

C : Capacité nominale de la batterie en Ampère-heure.

Ep : Energie à produire par jour.

N : Nombre de jours d'autonomie.

DOD : Profondeur de décharge maximale admissible par les batteries (70% pour les batteries au plomb).

ft : Facteur de réduction de température.

$$\mathbf{ft = \frac{C}{Co} = 0.01035 \times T + 0.724} \text{..... III.16}$$

Avec :

C : Capacité de la batterie ;

T : Température (en °C).

Co : Capacité de la batterie évaluée à 27°C.

- **Puissance crête du générateur photovoltaïque [6]**

$$\mathbf{Pc = \frac{Ep}{\eta_{pc} \times T_{sun}}} \text{..... III.17}$$

Avec :

Ep : Énergie produite par jour.

$\mathbf{T_{sun}}$**:** Temps équivalent avec pleine irradiation (heure par jour).

$\boldsymbol{\eta_{pc}}$**:** Facteur de dégradation.

- **Nombre de panneaux photovoltaïques [6]**

$$\mathbf{N_m = \frac{P_C}{P_u}} \text{..... III.18}$$

Avec :

$\mathbf{P_C}$**:** Puissance crête du générateur photovoltaïque.

$\mathbf{P_u}$**:** Puissance crête unitaire.

f) Méthode utilisabilité solaire :

La méthode d'utilisabilité solaire est une méthode efficace pour le dimensionnement des systèmes photovoltaïques, car elle repose sur l'évaluation de la part exploitable du rayonnement solaire incident sur les panneaux.

Le calcul de l'utilisabilité solaire nécessite, en premier lieu, la définition d'un ensemble de paramètres essentiels **[18]** :

- **Rendement moyen**

Le rendement moyen du module PV est fonction de la température moyenne du module TC :

$$\boldsymbol{\eta_p = \eta_r[1 - \beta_p(T_c - T_r)]} \text{..... III.19}$$

$\boldsymbol{\eta_r}$**:** Rendement du module à la température de référence Tr (25°C).

$\boldsymbol{\beta_p}$**:** Coefficient de température pour le rendement du module.

$\mathbf{T_c}$**:** Est reliée à la température ambiante du mois Ta par la formule d'Evans :

$$\mathbf{T_C - T_a = (219 + 832 \times K_t)\frac{NOCT-20}{800}} \text{..... III.20}$$

Avec :

NOCT : (Nominal Operating Cell Température) Température nominale des cellules en opération KT.

$\mathbf{K_t}$**:** Indice de clarté mensuelle.

- **Énergie électrique produite par les panneaux PV**

L'énergie produite par les panneaux PV durant une heure t de la journée, est donné par la relation suivante :

$$\mathbf{E_p(t) = S \times \eta_p \times I_t} \quad \text{..... III.21}$$

Avec :

S : Surface de ces panneaux.

$\boldsymbol{\eta_p}$**:** Rendement moyen des cellules PV.

$\mathbf{I_t}$**:** Irradiation horaire incidente sur la surface inclinée des panneaux.

Cette énergie doit être réduite par les pertes diverses du champ PV et les autres pertes du conditionnement de l'énergie.

$$\mathbf{E_a(t) = E_p(t)(1 - \lambda_P)(1 - \lambda_c)} \quad \text{..... III.22}$$

Avec :

$\mathbf{E_a(t)}$**:** Énergie disponible pour la charge électrique et l'accumulateur durant l'heure t.

j) Méthode du mois le plus défavorable

Cette méthode consiste à étudier le mois le moins ensoleillé et à déterminer le nombre de jours d'autonomie afin d'assurer un fonctionnement fiable du système photovoltaïque tout au long de l'année. **[6]**.

III.4.2 Les étapes du dimensionnement :

III.4.2.1 Évaluation de la consommation :

Il est essentiel d'évaluer la puissance électrique des applications à alimenter pour un système bien adapté. L'énergie nécessaire s'exprime par **[11]** :

$$\mathbf{E_c = p \times t} \text{..... III.23}$$

Avec :

$\mathbf{E_c}$**:** Énergie consommée.

p: Puissance de fonctionnement de l'appareillage.

t: Temps d'utilisation.

Étant donné que ces systèmes doivent assurer une alimentation continue en énergie, une période de 24 heures est prise comme référence. L'énergie journalière E correspond à la somme de l'énergie consommée par tous les équipements durant cette période, exprimée en Wh/j, et appelée consommation énergétique journalière.

Cette relation s'exprime comme suit **[11]** :

$$\mathbf{E_{ct} = \sum E_{ci}} \text{..... III.24}$$

III.4.2.2 Détermination et importance de l'orientation et d'inclinaison des panneaux

Afin d'optimiser la production d'énergie d'un système photovoltaïque, l'inclinaison et l'orientation des panneaux solaires constituent des paramètres essentiels influençant leurs performances. Pour obtenir un rendement optimal, deux critères principaux sont pris en compte **[19]** :

a) L'inclinaison :

L'énergie produite par les panneaux photovoltaïques dépend de l'intensité du rayonnement solaire. Il est donc nécessaire de choisir un emplacement adéquat et d'ajuster l'orientation ainsi que l'inclinaison des panneaux afin d'optimiser leurs performances. Une surface inclinée se caractérise par un angle d'inclinaison α par rapport à l'horizontale et par un angle d'azimut a par rapport au sud **[11]**. La figure suivante représente les angles sur un plan incliné :

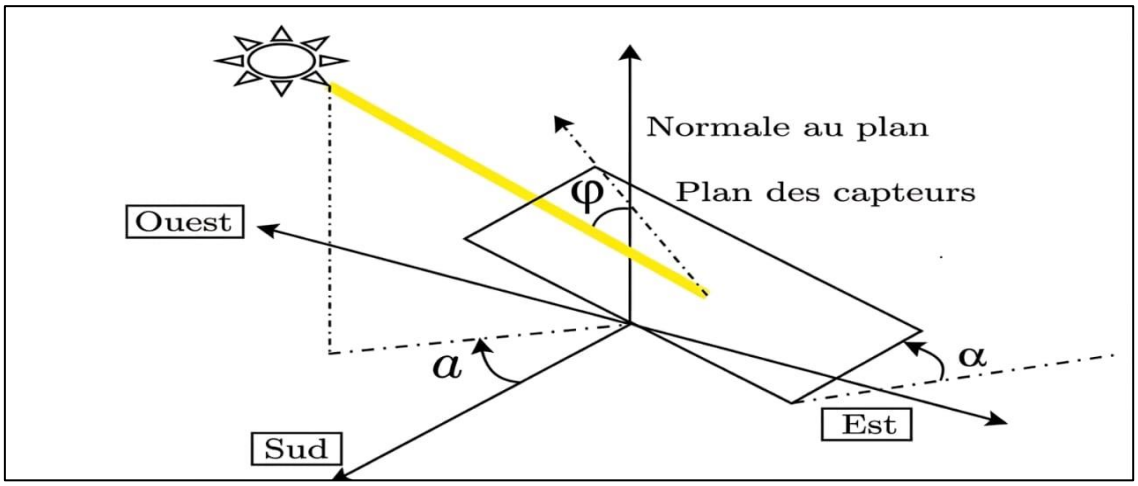


Figure III. 12 : Les angles sur un plan incliné **[11]**.

La méthode de choix de l'inclinaison est d'utilisé le tableau ci- dessous, qui indique la relation entre la latitude et l'inclinaison des panneaux solaires **[17]**.

Tableau III. 1 : Relation entre la latitude du site et l'angle d'inclinaison optimal des panneaux photovoltaïques.

Latitude (φ)	Inclinaison (α)
$\varphi < 10^{\circ}$	$\alpha = 10^{\circ}$
$10^{\circ} < \varphi < 30^{\circ}$	$\alpha = \varphi$
$30^{\circ} < \varphi < 40^{\circ}$	$\alpha = \varphi + 10^{\circ}$
$\varphi > 40^{\circ}$	$\alpha = \varphi + 15^{\circ}$

b) L'orientation :

On appelle orientation le point cardinal vers lequel est tournée la face active du panneau (Sud, nord,). Les panneaux sont toujours orientés vers l'équateur **[17]** :

- Orientation vers le sud dans l'hémisphère Nord.
- Orientation vers le nord dans l'hémisphère Sud.

III.4.2.3 Ombrage ou repérage des masques :

L'ombrage affecte les performances des modules photovoltaïques et réduit la production d'énergie, c'est pourquoi il est nécessaire de choisir un site sans ombrage afin d'assurer une meilleure efficacité et de protéger le système **[11]**.

III.4.2.4 Données météorologiques :

La conception du système photovoltaïque repose sur l'étude du rayonnement solaire à l'aide de données météorologiques à long terme afin de déterminer le nombre de panneaux et de garantir l'efficacité et la fiabilité du système **[11]**.

III.4.2.5 Détermination de la puissance crête des panneaux :

La puissance d'un panneau solaire s'exprime en watt-crête (Wc) ou kilowatt-crête (kWc). Elle représente la puissance électrique maximale qu'il peut produire, obtenue dans des conditions standards **[20]**.

Ces conditions sont les suivantes : un ensoleillement de 1000 W/m², une température de 25 °C, ainsi qu'une bonne orientation des panneaux avec une absence totale d'ombrage.

a) Calcul pratique de la puissance photovoltaïque

La puissance crête correspond à la puissance maximale des panneaux solaires nécessaire pour produire l'énergie requise et varie selon le niveau d'irradiation solaire de la région **[20]**.

$$\mathbf{P_c = \frac{E_C}{k.Ir}} \text{..... III.25}$$

Avec :

E_c: L'énergie consommée quotidiennement.

k: Le coefficient de pertes.

Ir : Irradiation généralement calculé par le moyen journalier d'irradiation du 21 décembre (le jour le plus court).

Le coefficient k représente l'ensemble des pertes du système photovoltaïque, et sa valeur est généralement comprise entre 0,55 et 0,65 **[20]**.

III.4.2.6 Tension de fonctionnement du champ photovoltaïque :

Le choix de la tension nominale d'un système photovoltaïque est déterminé en fonction de la puissance crête du champ photovoltaïque **[11]**.

Le tableau ci-dessous présente les valeurs de tension les plus couramment utilisées, en fonction des différentes puissances du champ photovoltaïque **[11]**.

Tableau III. 2: Tension recommandée pour les systèmes photovoltaïques.

Puissance crête	<500 Wc	500Wc - 2KWc	2KWc - 10KWc	>10KWc
Tension de système	12v	24v	48v	96v

III.4.2.7 Calcul du nombre de panneaux

Le nombre de module pour fournir la puissance de l'installation est déterminé par l'équation suivante **[19] :**

$$N_p = \frac{P_c}{P_p} \text{..... III.26}$$

Avec :

N_p**:** Nombre de panneau solaire.

P_p: Puissance de panneau.

- **Le nombre de modules connectés en série**

$$N_{pS} = \frac{V_{sys}}{V_{pv}} \text{..... III.27}$$

Avec :

V_{PV}**:** Tension du système.

V_U**:** Tension nominale unitaire.

- **Le nombre des modules connectés en parallèle**

$$N_{Pp} = \frac{N_m}{N_S} \text{..... III.28}$$

Avec :

N_m**:** Nombre de module.

N_S**:** Nombre des modules connectés en série.

III.4.2.8 Dimensionnement de système de stockage (batteries) :

Le choix des accumulateurs en gel se résume à travers les avantages suivants **[11] :**

- Entretien réduit.
- Durée de vie prolongée.
- Bonne tenue aux températures externes.
- Performance en décharge profonde.

a) Détermination de la capacité de stockage :

La capacité de stockage en (Ah) est donnée par **[11] :**

$$C_{ch} = \frac{E_c \times N}{D \times U} \text{..... III.29}$$

Avec :

C_{ch}**:** capacité nominale de stockage (Ah).

N: nombre de jours d'autonomie (jour).

E_c**:** énergie consommée par jour (Wh/j).

U : système de tension (V).

D: profondeur de décharge (compris entre 0 et 1).

b) Détermination du nombre d'élément batterie en parallèle :

Le calcul du nombre de batteries nécessaires est donné par la relation suivante **[17]** :

$$N_{bp} = \frac{C_{ch}}{C_b} \text{..... III.30}$$

Avec :

C_{ch}**:** capacité nominale de stockage (Ah).

C_b**:** capacité d'une batterie.

c) Détermination du nombre d'élément batterie en série :

On donne le nombre d'élément batterie en série par la relation **[17]** :

$$N_{bs} = \frac{V_{sys}}{V_b} \text{..... III.31}$$

Avec :

V_{ch}**:** tension du champ.

V_b**:** la tension de la batterie.

d) Calcul de nombre de batterie :

Le calcul du nombre de batteries nécessaires est donné par la relation suivante **[17] :**

$$Np = N_{bp} \times N_{bs} \text{..... III.32}$$

Avec :

N_{bp}:Nombre de batteries en parallèle.

N_{bs}**:** Nombre de batteries en série.

III.4.2.9 Dimensionnement du régulateur :

Le choix du régulateur de charge dépend des paramètres suivants **[6]** :

a) Tension maximale :

La tension maximale du régulateur est déterminée par la relation suivante :

$$\mathbf{V_{reg} = 1.25 \times Vco \times Ns} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{III.33}$$

Avec :

Vco: La tension de circuit ouvert.

Ns: Nombre des modules connectés en série.

1.25: le coefficient de sécurité.

b) Courant maximale :

Courant maximale du régulateur est déterminée par la relation suivante :

$$\mathbf{I_{reg} = 1.25 \times Icc \times Np} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{III.34}$$

Avec :

Vcc: Courant de court-circuit.

Np: Nombre des modules connectés en parallèle.

1.25: le coefficient de sécurité.

c) Puissance nominale :

La puissance nominale du régulateur est déterminée par la relation suivante :

$$\mathbf{P_{reg} = Pc \times Nm} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \textbf{III.35}$$

Avec :

Nm: Nombre de modules à installer.

Pc: Puissance crête.

III.4.2.10 Dimensionnement de l'onduleur :

Le dimensionnement de l'onduleur repose sur plusieurs paramètres essentiels, notamment le rendement estimé à environ 0,8, les pertes de consommation à vide qui doivent être réduites afin d'améliorer le stockage de l'énergie, ainsi qu'une fréquence de

fonctionnement de 50 Hz et une tension d'entrée égale à celle de la batterie **[18]**. La puissance nominale est donnée par la relation suivante **[4] :**

$$\mathbf{P_{ond} = \frac{P_c}{0.8} = 1,25 \times P_c} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{III.36}$$

a) Tension maximale :

La tension maximale de l'onduleur est déterminée par la relation suivante **[17] :**

$$\mathbf{V_{ond} = 1.25 \times Vco \times Ns} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{III.37}$$

Avec :

Vco: La tension de circuit ouvert.

Ns: Nombre des modules connectés en série.

1.25: Le coefficient de sécurité.

b) Courant maximale :

Courant maximale de l'onduleur est déterminée par la relation suivante :

$$\mathbf{I_{ond} = 1.25 \times Icc \times Np} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \mathbf{III.38}$$

Avec :

Vcc: Courant de court-circuit.

Np: Nombre des modules connectés en parallèle.

1.25: Le coefficient de sécurité.

III.4.2.11 Dimensionnement des câbles :

Il faut choisir un câble approprié pour le transport de l'énergie des panneaux vers le régulateur de charge afin d'assurer l'efficacité et la longévité du système. **[11]**.

a) Résistance d'un câble électrique :

La résistance du câble dépend de la résistivité du matériau utilisé. Le cuivre est le conducteur le plus utilisé, avec une résistivité d'environ 16×10^{-9} Ω·m à 0°C et 17×10^{-9} Ω·m à 25°C. D'autres matériaux peuvent également être utilisés, comme l'argent ou le fer.

La résistance du câble dépend aussi de la longueur du câble, de la section de son conducteur et de la température.

La relation suivante permet de la calculer **[11]** :

$$\mathbf{R = \frac{\rho \times L}{s}} \quad \text{..... III.39}$$

Avec :

R: la résistance en (Ω).

ρ: la résistivité en (Ω.m).

L: la longueur du câble en (m).

s: la section du câble s en (mm^2).

b) Choix des sections de câble :

Dans la pratique, la longueur des câbles est connue, on calcule alors la section de ces câbles sous la contrainte d'une chute de tension maximale de 3 %. Ainsi, la section des câbles se calcule par la formule suivante :

$$\mathbf{S = \frac{\rho \times L \times I}{\varepsilon \times V_A}} \quad \text{..... III.40}$$

Avec :

S : la section du conducteur (mm^2).

ρ: la résistivité du matériau conducteur, conducteurs en cuivre ($\rho = 1{,}7 \times 10^{-8}\Omega.m$).

L : la longueur totale (aller-retour) en (m).

I : le courant.

***ε*:** chute de tension.

La figure suivante illustre le choix de la section des câbles en fonction du courant et de la longueur dans un système photovoltaïque 12V **:**

Tension : 12V	Longueur des câbles en mètres									
Intensité max (A)	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
0,5	0,02	0,05	0,07	0,10	0,12	0,14	0,17	0,19	0,21	0,24
1	0,05	0,10	0,14	0,19	0,24	0,29	0,33	0,38	0,43	0,48
1,5	0,07	0,14	0,21	0,29	0,36	0,43	0,50	0,57	0,64	0,71
2	0,10	0,19	0,29	0,38	0,48	0,57	0,67	0,76	0,86	0,95
2,5	0,12	0,24	0,36	0,48	0,59	0,71	0,83	0,95	1,07	1,19
3	0,14	0,29	0,43	0,57	0,71	0,86	1,00	1,14	1,28	1,43
3,5	0,17	0,33	0,50	0,67	0,83	1,00	1,16	1,33	1,50	1,66
4	0,19	0,38	0,57	0,76	0,95	1,14	1,33	1,52	1,71	1,90
4,5	0,21	0,43	0,64	0,86	1,07	1,28	1,50	1,71	1,92	2,14
5	0,24	0,48	0,71	0,95	1,19	1,43	1,66	1,90	2,14	2,38
6	0,29	0,57	0,86	1,14	1,43	1,71	2,00	2,28	2,57	2,85
7	0,33	0,67	1,00	1,33	1,66	2,00	2,33	2,66	2,99	3,33
8	0,38	0,76	1,14	1,52	1,90	2,28	2,66	3,04	3,42	3,80
9	0,43	0,86	1,28	1,71	2,14	2,57	2,99	3,42	3,85	4,28
10	0,48	0,95	1,43	1,90	2,38	2,85	3,33	3,80	4,28	4,75
11	0,52	1,05	1,57	2,09	2,61	3,14	3,66	4,18	4,70	5,23
12	0,57	1,14	1,71	2,28	2,85	3,42	3,99	4,56	5,13	5,70
13	0,62	1,24	1,85	2,47	3,09	3,71	4,32	4,94	5,56	6,18
14	0,67	1,33	2,00	2,66	3,33	3,99	4,66	5,32	5,99	6,65
15	0,71	1,43	2,14	2,85	3,56	4,28	4,99	5,70	6,41	7,13
16	0,76	1,52	2,28	3,04	3,80	4,56	5,32	6,08	6,84	7,60
17	0,81	1,62	2,42	3,23	4,04	4,85	5,65	6,46	7,27	8,08
18	0,86	1,71	2,57	3,42	4,28	5,13	5,99	6,84	7,70	8,55
19	0,90	1,81	2,71	3,61	4,51	5,42	6,32	7,22	8,12	9,03
20	0,95	1,90	2,85	3,80	4,75	5,70	6,65	7,60	8,55	9,50

Figure III. 13 : Choix des sections des câbles pour un système 12 V **[23]**.

III.5 Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a abordé la conception et le dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome à travers l'étude de ses composants, le calcul des besoins énergétiques et le choix des équipements appropriés, afin d'assurer un fonctionnement sûr et efficace et de garantir un équilibre entre la production et le stockage de l'énergie.

Chapitre IV

Simulation d'un système photovoltaïque autonome à l'aide du logiciel PVsyst

IV.1 Introduction :

Une simulation du système photovoltaïque installé sera présentée à l'aide du logiciel PVsyst, afin d'évaluer les performances du système et de vérifier l'efficacité de la conception avant la réalisation. L'algorithme utilisé pour la modélisation et l'étude du système sera également présenté, suivi de l'analyse des résultats obtenus à partir de la simulation. Enfin, le rendement et l'efficacité du système photovoltaïque étudié seront évalués.

IV.2 Algorithme :

L'algorithme est un ensemble d'étapes logiques et séquentielles permettant de résoudre un problème ou d'exécuter une tâche donnée. Dans notre étude d'un immeuble collectif, pour la conception d'un système photovoltaïque à Bordj Bou Arreridj, ces étapes doivent être suivies de manière organisée afin d'obtenir la meilleure conception possible et sans erreurs techniques ou de calcul. Les étapes suivantes sont donc appliquées :

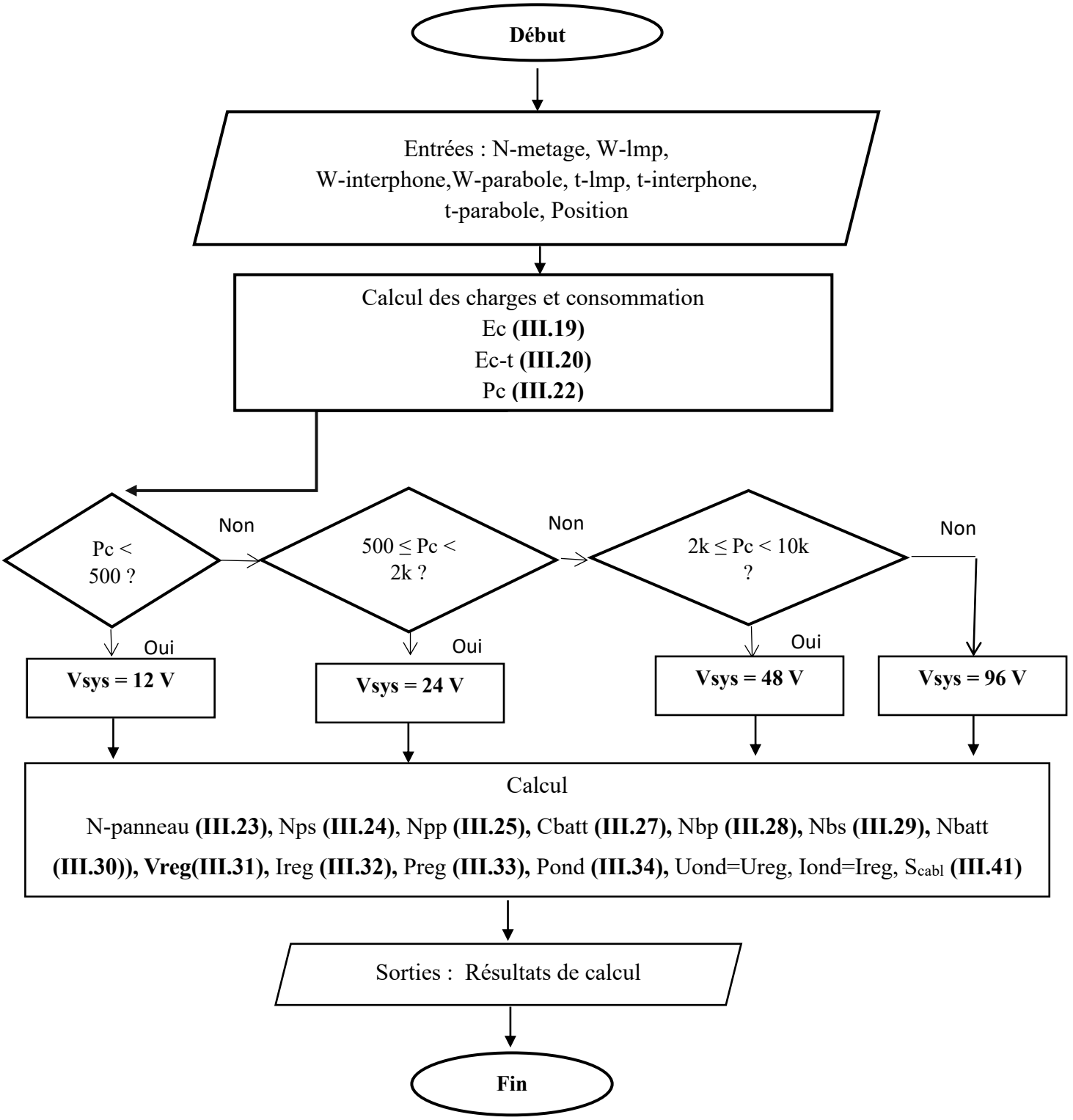


Figure IV. 1: Schéma de l'algorithme adopté pour le dimensionnement du système photovoltaïque.

IV.3 Application numérique du dimensionnement PV :

Pour dimensionner de manière optimale un système photovoltaïque, une étude est réalisée en plusieurs étapes et appliquée à un immeuble résidentiel afin de déterminer les composants du système et de choisir leurs dimensions en fonction des besoins énergétiques requis.

IV.3.1 Consommation énergétique (étape I) :

Tableau IV. 2: La consommation énergétique des équipements communs d'un bâtiment.

Appareil électrique	Nombre de charges	Puissance nominale (W)	Durée d'utilisation journalière (h/j)	Consommation d'énergie journalière (Wh)
Lampe	5	12	3	180
Interphone	1	40	2	80
Parabole	1	20	24	480
Totale		120		740

- La puissance totale de Bâtiment résidentiel collectif est de 72W.
- La consommation énergétique journalière est de 740Wh

IV.3.2 Localisation du site (étape II):

Wilaya **:** Bordj Bou Arreridj.

Latitude **:** 36.073 N.

Longitude **:** 4.761 E.

Altitude **:** 920 m.

D'après le tableau **(III. 2)** on prend l'Inclinaison comme suit :

$\beta\,(°) = \alpha + 10°$

Ce qui donne :

$\beta\,(°) = 36.073^{0} + 10° = 46.073^{0}$

IV.3.3 Données météorologiques (étape III):

En Algérie :

- La durée d'ensoleillement journalière minimale est de : 5 h/jour.
- La durée d'ensoleillement journalière maximale est de :8h/jour.
- En général on prend la minimale de : 5 h/jour.

IV.3.4 Dimensionnement du générateur photovoltaïque (étape IV) :

En appliquant l'équation **(III.22)** on va calculer la puissance crête pour l'installation.

- **La puissance crête de l'installation :**

L'estimation de la puissance maximale du générateur photovoltaïque repose sur l'évaluation des besoins énergétiques des différents appareils électriques, comme indiqué ci-dessous.

$$\boldsymbol{Pc = \frac{740}{0.65 \times 5} = 228\ Wc}$$

IV.3.5 Calcul du nombre de panneaux à utiliser pour l'installation (étape V) :

D'après les équations (**III.23**), le calcul du nombre de panneaux photovoltaïques montés en série et en parallèle s'effectue comme suit :

- **Nombre de panneaux total à utiliser :**

Ce qui donne :

$$\mathbf{N_m = \frac{228}{150} = 1.52 = 2}$$

Dans un système de 12 V, les deux panneaux photovoltaïques sont connectés en parallèle afin d'augmenter le courant produit tout en maintenant la tension constante à 12 V.

IV.3.6 Dimensionnement du système de stockage (étape VI) :

En se basant sur les équations (III.22, III.23), le nombre total de batteries montées en série et en parallèle est calculé. Pour assurer une autonomie de quatre jours (N = 4), la capacité nécessaire des batteries est évaluée à partir des besoins énergétiques du système.

Pour la batterie en gel : U= 12V ; Cb= 160Ah ; D = 80%

- **Calcule C_{ch} :**

$$\mathbf{C_{ch} = \frac{740 \times 4}{0.8 \times 12} = 308.33 Ah}$$

- **Calcul de nombre de batterie :**

$$\mathbf{Nbt = \frac{308.33}{160} = 1.927 = 2}$$

Donc on utilise 2 batteries en parallèles de tension 12V et de capacité 160 Ah

IV.3.7 Choix du régulateur de charge et de l'onduleur (étape VII) :

- Régulateur : MPPT 100/20 compatible 12 V, avec un courant de charge maximal de 20 A (supérieur à 16 A), assurant un fonctionnement sûr et optimal du système.
- Onduleur : sinusoïdal pur 12 V / 220 V, assurant la conversion DC/AC pour les charges domestiques**.**

IV.3.8 Choix de la section des câbles (étape VIII) :

À travers la figure III.13, on présente le tableau de choix de la section du câble selon la longueur et le courant. Pour un système 12 V et 16 A, la section est choisie afin de limiter la chute de tension. Les valeurs obtenues sont théoriques, donc on retient la section commerciale immédiatement supérieure pour garantir un fonctionnement fiable.

Exemple :

- Longueur 1 m ⟵ valeur 1.52 mm² ⟶ on choisit 2.5 mm²
- Longueur 2 m ⟵ valeur 3.04 mm² ⟶ on choisit 4 mm²
- Longueur 3 m ⟵ valeur 4.56 mm² ⟶ on choisit 6 mm²

IV.4 Application du logiciel PVsyst :

IV.4.1 Définition :

PVsyst V8.1.2 est un logiciel utilisé pour l'étude, le dimensionnement et l'analyse des performances des systèmes photovoltaïques de différents types, qu'ils soient raccordés au réseau ou autonomes. Il intègre des bases de données de composants et de données météorologiques et est utilisé par les ingénieurs et les chercheurs pour la conception et l'évaluation des projets d'énergie solaire à différentes étapes de leur réalisation.

IV.4.2. Les étapes de dimensionnement avec logiciel PVsyst :

IV.4.2.1. Démarrage PVsyst :

Dans ce dimensionnement nous sommes intéressés par une conception « isolé avec batterie ».

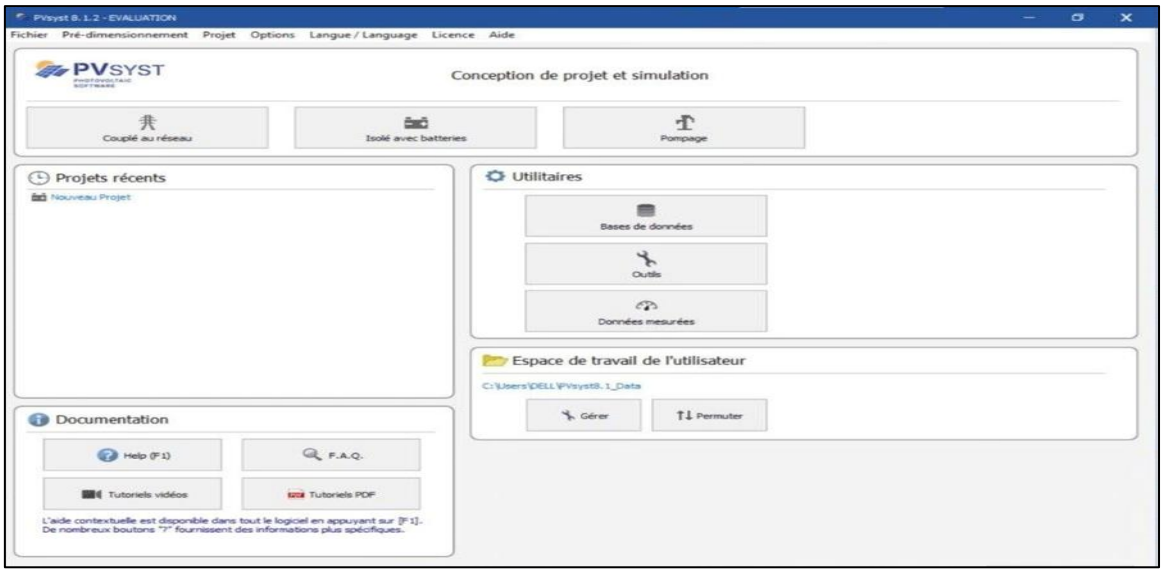


Figure IV. 2: Démarrage de PVsyst.

IV.4.2.2. Désignation du projet :

Dans notre projet, nous présentons les moyens communs d'un bâtiment. Le site étudié est situé dans la wilaya de Bordj Bou Arreridj. Ses coordonnées géographiques sont : latitude 36.0731° Nord, longitude 4.7613° Est, et une altitude de 928 mètres, avec un fuseau horaire (GMT+1). Cela représente la figure **(IV.3)** suivante illustrant la configuration du site géographique.

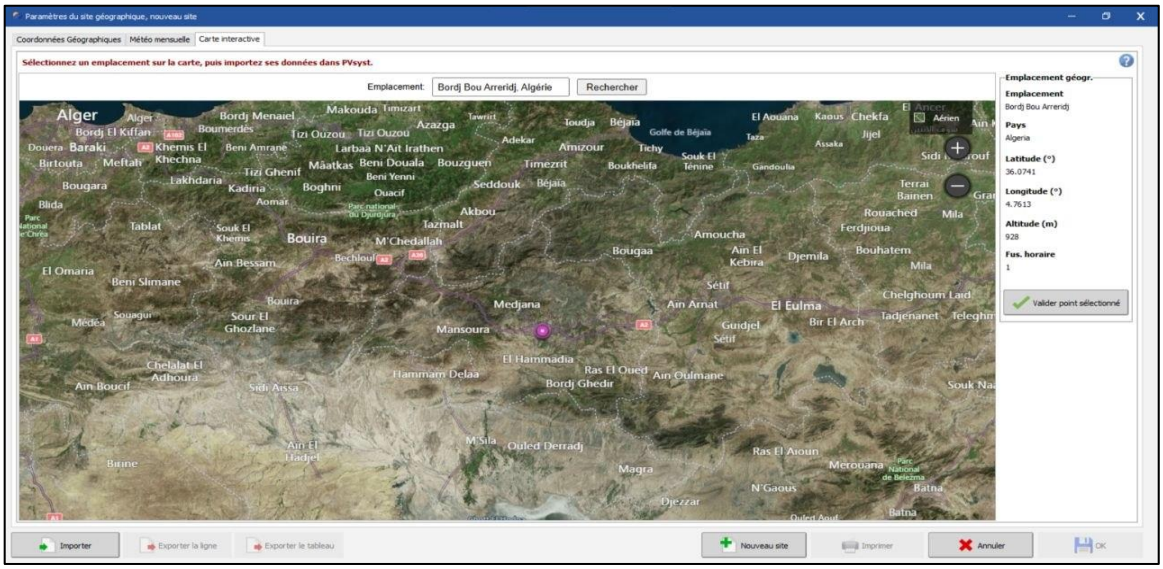
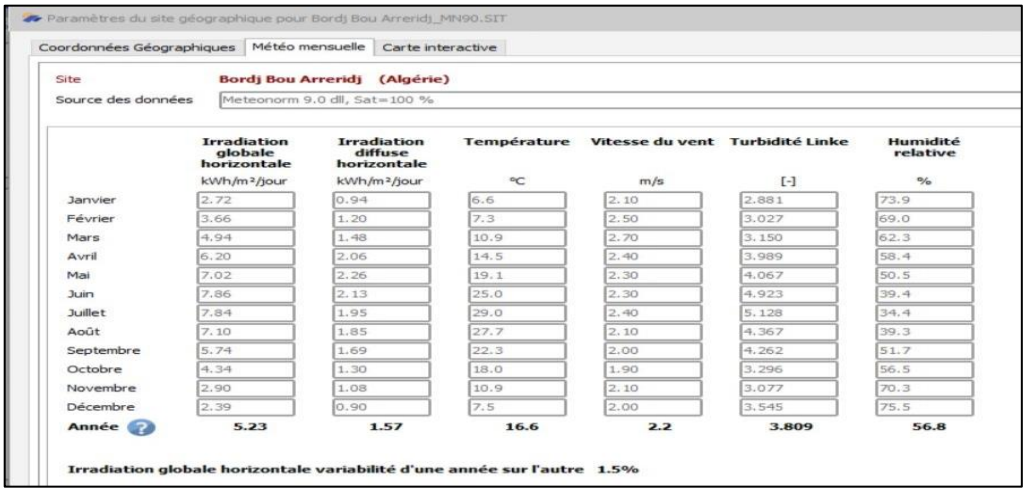


Figure IV. 3 : Paramètres du site géographique.

IV.4.2.3Paramètres climatiques du site :

Les données du site contiennent un ensemble d'informations climatiques essentielles, notamment le nom de la région, la source des données, ainsi que l'irradiation solaire

globale horizontale (Global Horizontal Irradiation) et la température mensuelle. Ces données sont utilisées dans les études énergétiques afin d'évaluer le potentiel solaire et d'analyser les conditions climatiques du site étudié.



	Irradiation globale horizontale kWh/m²/jour	Irradiation diffuse horizontale kWh/m²/jour	Température °C	Vitesse du vent m/s	Turbidité Linke [-]	Humidité relative %
Janvier	2.72	0.94	6.6	2.10	2.881	73.9
Février	3.66	1.20	7.3	2.50	3.027	69.0
Mars	4.94	1.48	10.9	2.70	3.150	62.3
Avril	6.20	2.06	14.5	2.40	3.989	58.4
Mai	7.02	2.26	19.1	2.30	4.067	50.5
Juin	7.86	2.13	25.0	2.30	4.923	39.4
Juillet	7.84	1.95	29.0	2.40	5.128	34.4
Août	7.10	1.85	27.7	2.10	4.367	39.3
Septembre	5.74	1.69	22.3	2.00	4.262	51.7
Octobre	4.34	1.30	18.0	1.90	3.296	56.5
Novembre	2.90	1.08	10.9	2.10	3.077	70.3
Décembre	2.39	0.90	7.5	2.00	3.545	75.5
Année	5.23	1.57	16.6	2.2	3.809	56.8

Irradiation globale horizontale variabilité d'une année sur l'autre 1.5%

Figure IV. 4 : Paramètres climatiques de BBA.

IV.4.2.4 Détermination de l'orientation :

L'orientation du champ photovoltaïque est déterminée afin de choisir la configuration la plus adaptée au système étudié. Après le choix d'un système fixe incliné, les paramètres du champ, notamment l'angle d'inclinaison et l'azimut, sont ajustés afin d'obtenir une irradiation solaire optimale avec un minimum de pertes. L'optimisation de l'orientation peut être observée à travers les graphes de l'option « Voire optimisation ». Les résultats obtenus indiquent un azimut de 0° et une inclinaison de 33,1° pour le système étudié.

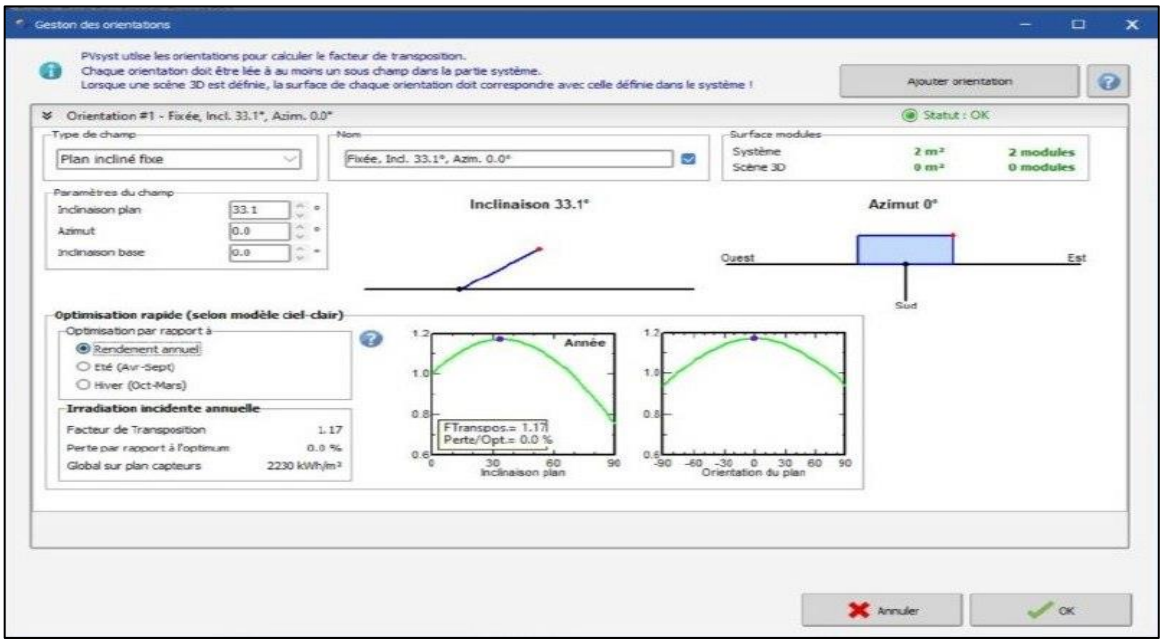


Figure IV.5: Boîte de dialogue d'orientation.

IV.4.2.5 Détermination des besoins électriques :

Dans le mode de fonctionnement autonome, le logiciel PVsyst met à disposition une interface dédiée à l'estimation de la consommation électrique, où les différentes charges électriques ainsi que leurs durées de fonctionnement sont définies afin de déterminer l'énergie consommée. Le logiciel permet également d'évaluer automatiquement la consommation moyenne journalière et mensuelle en énergie électrique. En se basant sur les données introduites et la figure présentée, les résultats suivants ont été obtenus :

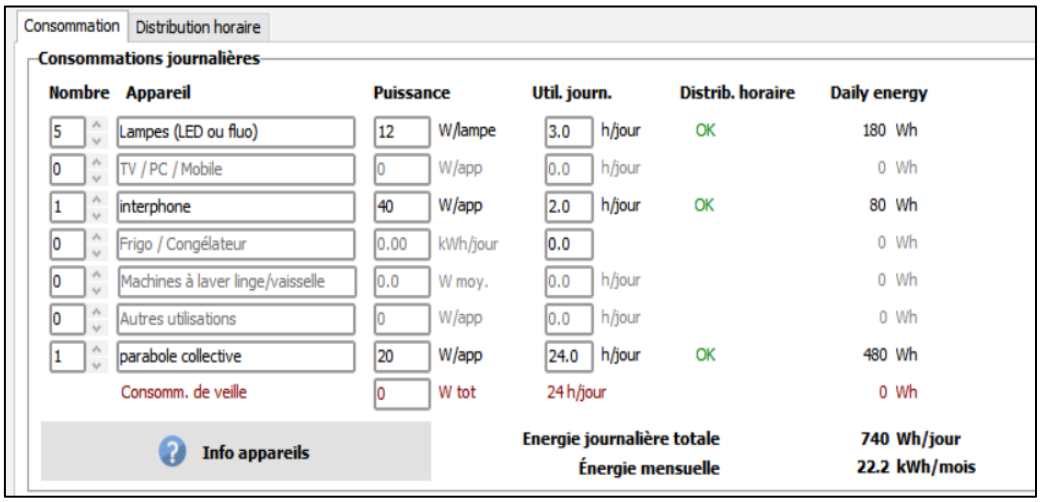


Figure IV.6: Les besoins électriques du système.

IV.4.2.6 Distribution horaire de la charge :

Les usages domestiques quotidiens pour l'année ont été définis.

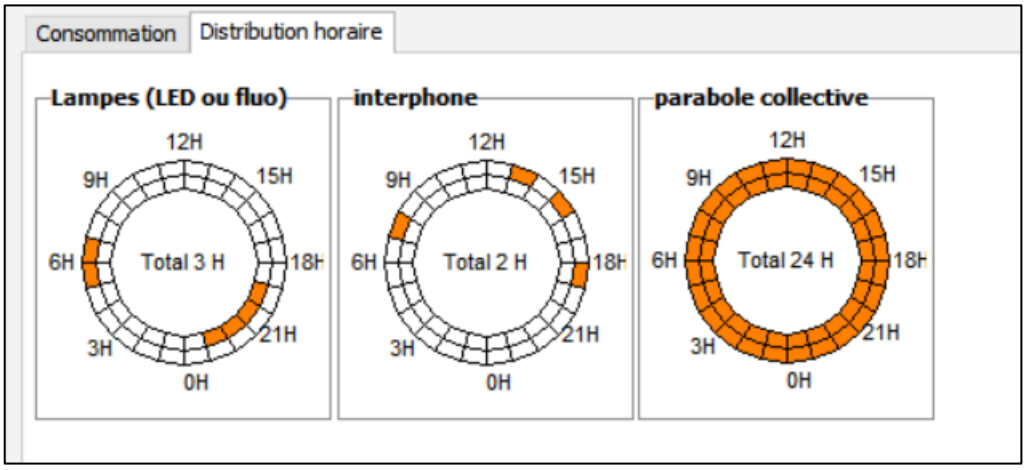


Figure IV.7: Distribution horaire de la charge.

IV.4.2.7 Dimensionnement du parc de batteries :

Le système de stockage est constitué de deux batteries au gel (plomb-acide) de 12 V connectées en parallèle, offrant une autonomie de 4 jours et une capacité de 160 Ah. La figure **(IV.8)** suivante représente le dimensionnement du parc de batteries.

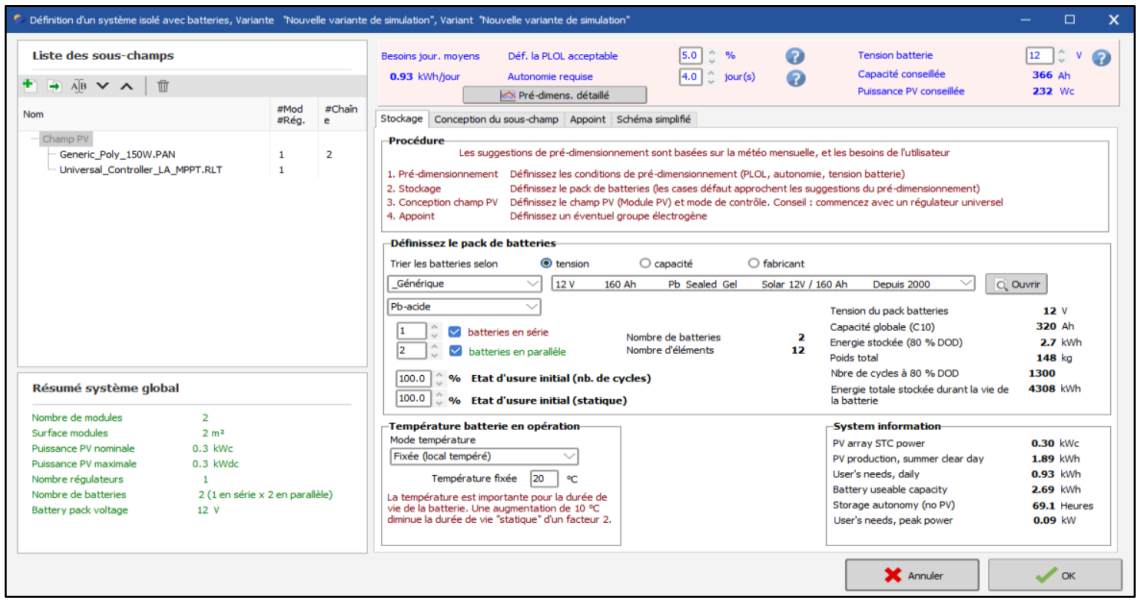


Figure IV.8: Dimensionnement du parc de batteries.

IV.4.2.8 Dimensionnement du champ PV :

Le module photovoltaïque choisi est de type polycristallin, d'une puissance de 150 W et d'une tension de 15 V, composé de 36 cellules. Le champ photovoltaïque est constitué de deux modules connectés en parallèle, avec une surface totale de 2 m². La figure **(IV.9)** suivante représente le dimensionnement du champ photovoltaïque.

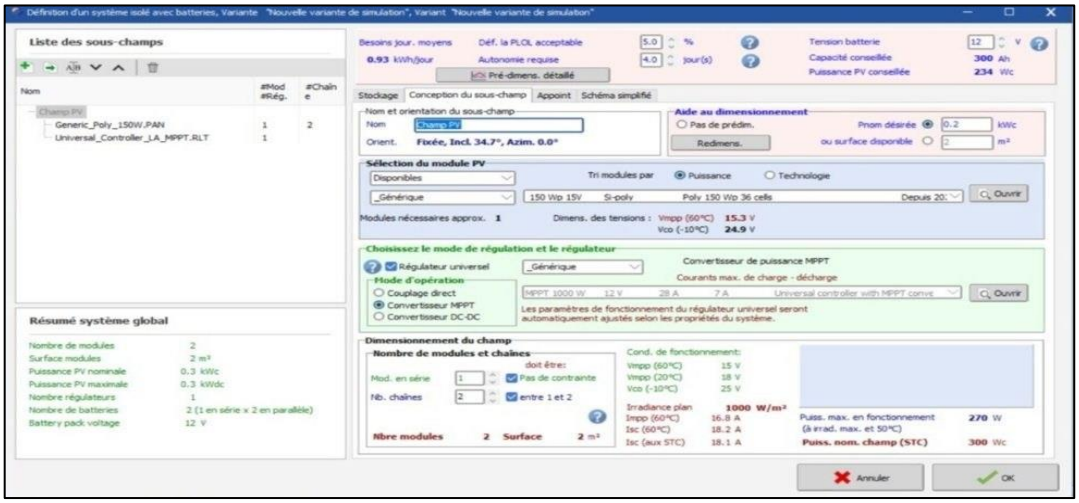
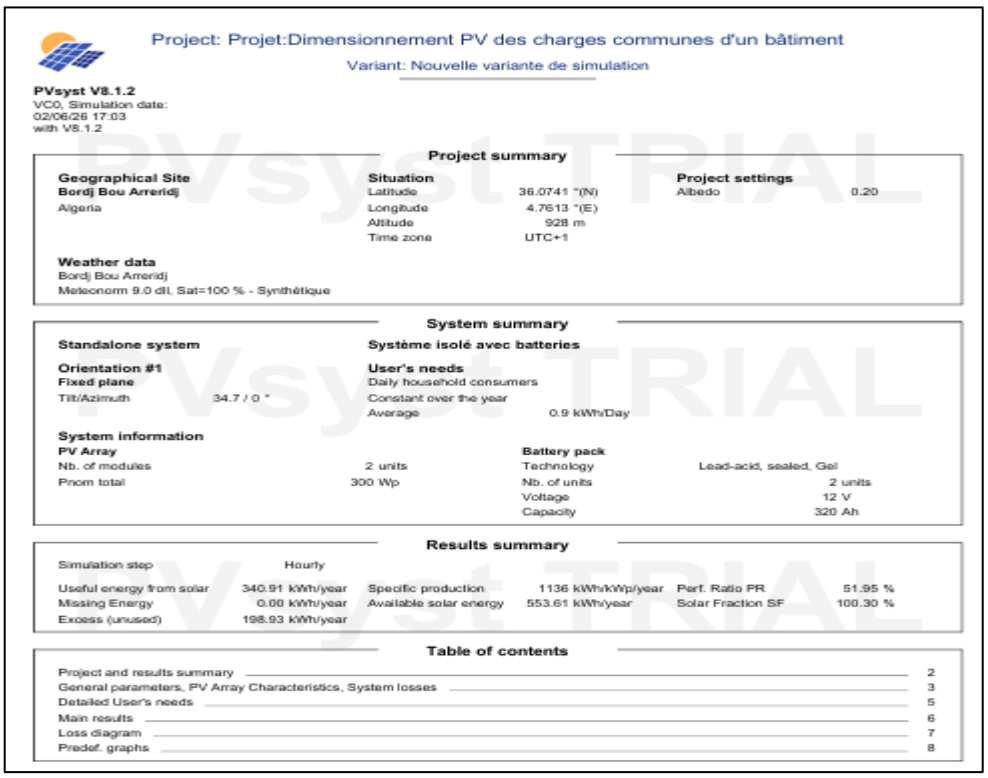


Figure IV.9: Dimensionnement du champ PV.

IV.4.2.9 Rapport de simulation :

En fin nous avons lancé la simulation pour avoir le rapport des résultats.



Project: Projet:Dimensionnement PV des charges communes d'un bâtiment

Variant: Nouvelle variante de simulation

PVsyst V8.1.2
VC0, Simulation date:
02/06/26 17:03
with V8.1.2

Project summary

Geographical Site	Situation		Project settings	
Bordj Bou Arreridj	Latitude	36.0741 °(N)	Albedo	0.20
Algeria	Longitude	4.7613 °(E)		
	Altitude	928 m		
	Time zone	UTC+1		

Weather data
Bordj Bou Arreridj
Meteonorm 9.0 dll, Sat=100 % - Synthétique

System summary

Standalone system	Système isolé avec batteries		
Orientation #1	**User's needs**		
Fixed plane	Daily household consumers		
Tilt/Azimuth 34.7 / 0 °	Constant over the year		
	Average 0.9 kWh/Day		
System information			
PV Array		**Battery pack**	
Nb. of modules	2 units	Technology	Lead-acid, sealed, Gel
Pnom total	300 Wp	Nb. of units	2 units
		Voltage	12 V
		Capacity	320 Ah

Results summary

Simulation step	Hourly				
Useful energy from solar	340.91 kWh/year	Specific production	1136 kWh/kWp/year	Perf. Ratio PR	51.95 %
Missing Energy	0.00 kWh/year	Available solar energy	553.61 kWh/year	Solar Fraction SF	100.30 %
Excess (unused)	198.93 kWh/year				

Table of contents

Project and results summary 2
General parameters, PV Array Characteristics, System losses 3
Detailed User's needs 5
Main results 6
Loss diagram 7
Predef. graphs 8

Figure IV.10: Caractéristiques du système photovoltaïque autonome (BBA).

La figure **(IV.10)** présente la simulation d'un système photovoltaïque autonome équipé de batteries de stockage, conçu pour la région de Bordj Bou Arreridj (Algérie), afin de satisfaire les besoins des moyens communs d'un bâtiment estimés à 0,9 kWh par jour. Le champ photovoltaïque est composé de deux panneaux solaires d'une puissance nominale totale de 300 Wc, inclinés avec un angle de 34,7°. Le système de stockage repose sur deux batteries de type Gel d'une capacité de 160 Ah chacune, avec une tension nominale de 12 V. Ces paramètres constituent la base technique de la conception du système et permettent d'évaluer sa capacité à couvrir la demande énergétique tout au long de l'année.

General parameters

Standalone system — **Système isolé avec batteries**

Simulation step
Hourly

Orientation #1
Fixed plane
Tilt/Azimuth 34.7 / 0 °

Models used
Transposition Perez
Diffuse Perez, Meteonorm
Circumsolar separate

User's needs
Daily household consumers
Constant over the year
Average 0.9 kWh/Day

PV Array Characteristics

PV module
Manufacturer Generic
Model Poly 150 Wp 36 cells
(Original PVsyst database)
Unit Nom. Power 150 Wp
Number of PV modules 2 units
Nominal (STC) 300 Wp
Modules 2 string x 1 In series
At operating cond. (50°C)
Pmpp 270 Wp
U mpp 16 V
I mpp 17 A

Total PV power
Nominal (STC) 0.300 kWp
Total 2 modules
Module area 2.0 m²
Cell area 1.8 m²

Controller
Universal controller
Technology MPPT converter
Temp coeff. -5.0 mV/°C/Elem.
Converter
Maxi and EURO efficiencies 98.0 / 96.5 %
Battery Management control
Threshold commands as SOC calculation
Charging SOC = 0.90 / 0.75
approx. 13.1 / 12.4 V
Discharging SOC = 0.20 / 0.45
approx. 11.6 / 12.1 V

Battery Storage

Battery
Manufacturer Generic
Model Solar 12V / 160 Ah
Technology Lead-acid, sealed, Gel
Nb. of units 2 in parallel
Discharging min. SOC 20.0 %
Stored energy 3.1 kWh
Battery Pack Characteristics
Voltage 12 V
Nominal Capacity 320 Ah (C10)
Temperature Fixed 20 °C

Array losses

Thermal Loss factor
Module temperature according to irradiance
Uc (const) 20.0 W/m²K
Uv (wind) 0.0 W/m²K/m/s

DC wiring losses
Global array res. 16 mΩ
Loss Fraction 1.50 % at STC

Module Quality Loss
Loss Fraction -0.75 %

Module mismatch losses
Loss Fraction 0.00 % at MPP

Strings Mismatch loss
Loss Fraction 0.05 %

Array losses

IAM loss factor
Incidence effect (IAM): Fresnel smooth glass, n = 1.526

0°	30°	50°	60°	70°	75°	80°	85°	90°
1.000	0.998	0.981	0.948	0.862	0.776	0.636	0.402	0.000

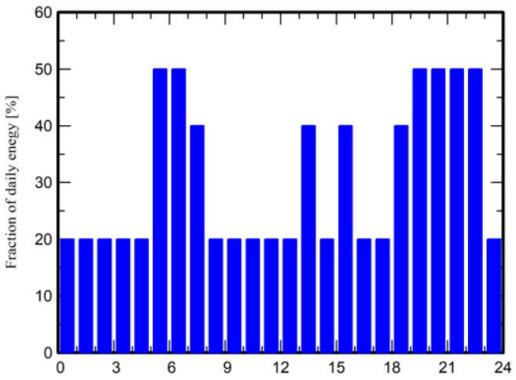
Detailed User's needs

Daily household consumers, Constant over the year, average = 0.7 kWh/day

Annual values

	Nb.	Power	Use	Energy
		W	Hour/day	Wh/day
Lampes (LED ou fluo)	5	12/lamp	3.0	180
interphone	1	40/app	2.0	80
parabole collective	1	20 tot	24.0	480
Total daily energy				740

Hourly distribution



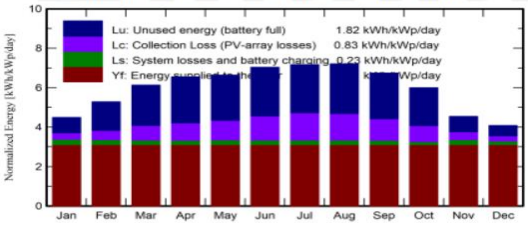
Main results

Simulation step
Hourly

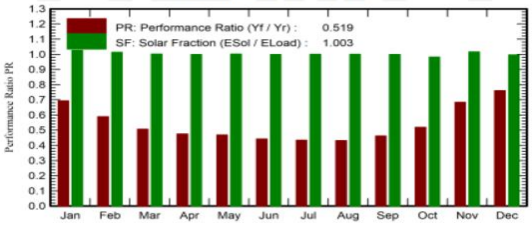
System Production

Useful energy from solar	340.91 kWh/year	Perf. Ratio PR	51.95 %
Available solar energy	553.62 kWh/year	Solar Fraction SF	100.30 %
Excess (unused)	198.93 kWh/year		
Loss of Load		**Battery ageing (State of Wear)**	
Time Fraction	0.0 %	Cycles SOW	96.4 %
Missing Energy	0.00 kWh/year	Static SOW	90.0 %
		Battery lifetime	10.0 years

Normalized productions (per installed kWp)



Performance Ratio PR



Balances and main results

	GlobHor kWh/m²	GlobEff kWh/m²	E_Avail kWh	EUnused kWh	E_Miss kWh	E_User kWh	E_Load kWh	SolFrac ratio
January	84.3	136.5	37.76	7.19	0.000	28.95	28.95	1.026
February	102.5	145.1	39.61	12.12	0.000	26.15	26.15	1.014
March	153.2	185.8	49.06	18.94	0.000	28.95	28.95	1.002
April	186.1	190.7	50.03	20.92	0.000	28.02	28.02	0.999
May	217.6	199.7	51.46	21.30	0.000	28.95	28.95	1.002
June	235.8	204.2	51.22	22.10	0.000	28.02	28.02	1.000
July	243.1	214.9	52.75	22.62	0.000	28.95	28.95	1.000
August	220.2	217.0	53.50	23.39	0.000	28.95	28.95	1.000
September	172.3	197.1	49.92	20.77	0.000	28.02	28.02	1.000
October	134.7	181.6	47.25	17.75	0.000	28.95	28.95	0.982
November	86.9	133.9	36.43	6.98	0.000	28.02	28.02	1.017
December	74.0	124.5	34.63	4.84	0.000	28.95	28.95	0.997
Year	1910.6	2131.0	553.62	198.93	0.000	340.91	340.91	1.003

Legends

GlobHor	Global horizontal irradiation
GlobEff	Effective Global, corr. for IAM and shadings
E_Avail	Available Solar Energy
EUnused	Unused energy (battery full)
E_Miss	Missing energy
E_User	Energy supplied to the user
E_Load	Energy need of the user (Load)
SolFrac	Solar fraction (EUsed / ELoad)

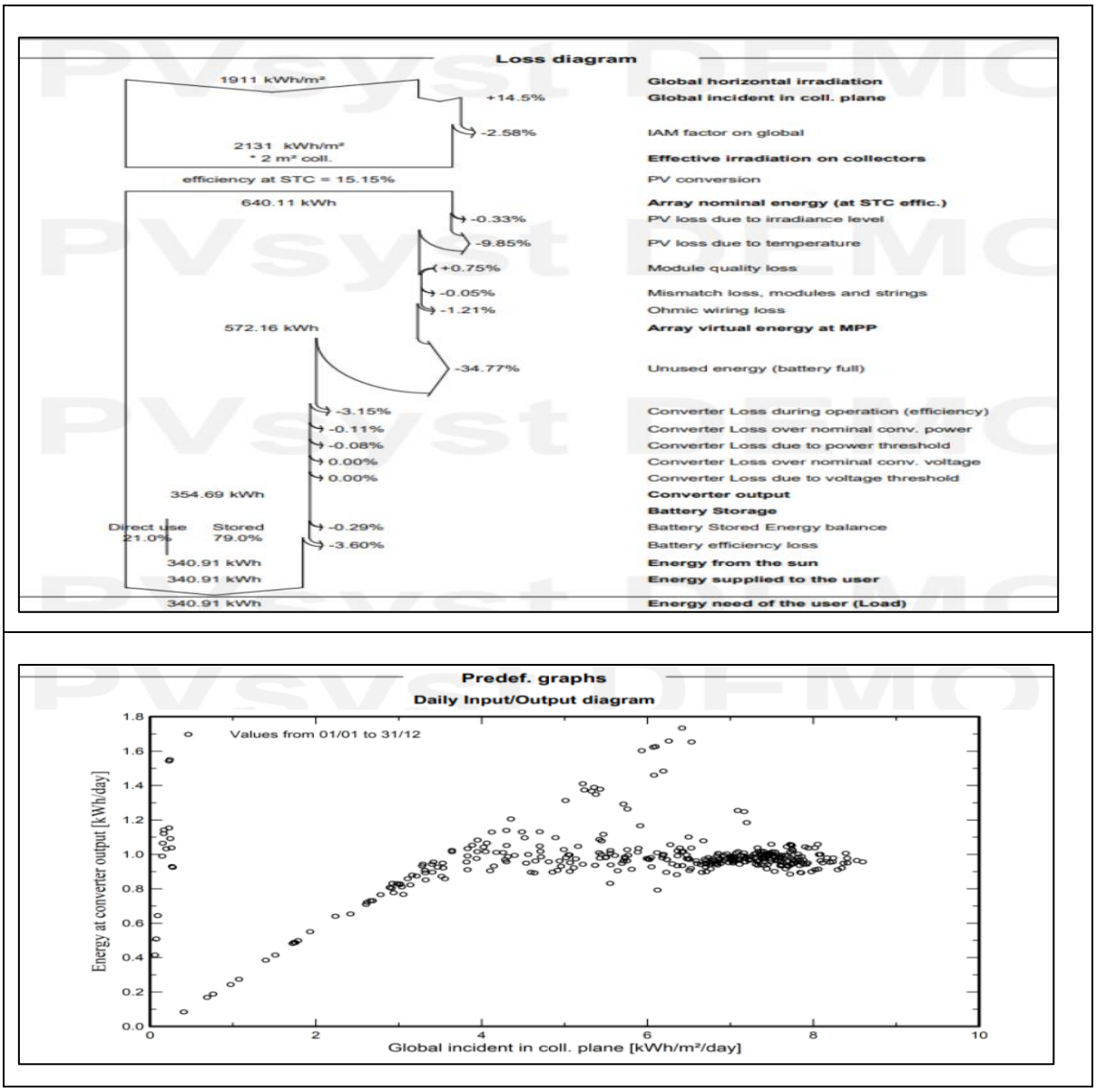


Figure IV. 11 : Rapport des résultats de simulation du système photovoltaïque.

IV.4.2.10 Analyse :

Les résultats ont été analysés et discutés à travers la figure **(IV. 11)** :

- Les données techniques issues du logiciel PVsyst montrent que le système photovoltaïque autonome est composé de deux panneaux solaires d'une puissance totale de 300 Wc, d'un régulateur de charge MPPT et de batteries au gel destinées au stockage. La simulation prend également en compte les différentes pertes électriques et thermiques afin d'obtenir une évaluation réaliste des performances du système et d'assurer une alimentation continue en énergie tout au long de l'année.

- Les besoins en énergie électrique de l'utilisateur sont déterminés en recensant les appareils utilisés dans le bâtiment et en calculant la consommation de chaque appareil en fonction de sa puissance et de son temps d'utilisation quotidien, puis en les additionnant afin d'obtenir la consommation totale. Le schéma montre également la répartition de cette consommation au cours de la journée, ce qui permet d'identifier les périodes de pointe et de faible demande en électricité.
- Les résultats montrent la performance d'un système photovoltaïque avec batterie sur une année, en déterminant l'énergie produite, consommée et excédentaire tout en assurant une couverture totale de la charge. Le taux de performance (PR) indique l'efficacité du système, et les graphiques présentent l'évolution de la production et du rendement (Normalized Production et PR) afin d'évaluer la stabilité et l'efficacité du système après prise en compte des pertes.
- Plus l'angle d'incidence des rayons solaires sur le panneau augmente (c'est-à-dire lorsque les rayons deviennent moins perpendiculaires), plus le facteur IAM diminue, ce qui entraîne une augmentation des pertes (IAM loss factor) et donc une réduction de l'énergie effectivement exploitée par le panneau photovoltaïque.
- Les besoins en énergie électrique de l'utilisateur sont déterminés en recensant les appareils utilisés dans le bâtiment et en calculant la consommation de chaque appareil en fonction de sa puissance et de son temps d'utilisation quotidien, puis en les additionnant afin d'obtenir la consommation totale. Le schéma montre également la répartition de cette consommation au cours de la journée, ce qui permet d'identifier les périodes de pointe et de faible demande en électricité.
- Le tableau « Balances and main results » présente les principaux indicateurs de performance du système photovoltaïque autonome sur une base mensuelle et annuelle. Il fournit les valeurs de l'irradiation solaire, de l'énergie disponible, de l'énergie fournie à la charge, ainsi que de l'énergie non utilisée et du taux de couverture solaire. Ces données permettent d'évaluer le bilan énergétique du système et sa capacité à satisfaire les besoins de la charge électrique tout au long de l'année.
- Le diagramme des pertes (Loss Diagram) constitue une représentation schématique qui permet de visualiser où l'énergie est perdue au sein du système photovoltaïque, depuis le rayonnement solaire incident jusqu'à l'électricité effectivement fournie à l'utilisateur final.

- Le diagramme Daily Input/Output illustre la relation entre l'irradiation solaire incidente et l'énergie électrique délivrée par le système photovoltaïque. Il permet d'apprécier le comportement global du système et son aptitude à satisfaire les besoins énergétiques de la charge au cours de l'année.

IV.5 Conclusion :

Une simulation du système photovoltaïque a été réalisée à l'aide du logiciel PVsyst selon une méthodologie basée sur une modélisation précise des différents composants du système. Les résultats obtenus ont ensuite été analysés afin d'évaluer la performance globale de l'installation. Cette étude a permis de déterminer l'efficacité de la conception ainsi que la performance du système photovoltaïque étudié.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus importantes, ayant suscité un intérêt croissant ces dernières années grâce à sa capacité à fournir une énergie propre, durable et respectueuse de l'environnement. Avec l'augmentation continue de la demande en énergie et les préoccupations liées à la pollution et à l'épuisement des ressources fossiles, les systèmes photovoltaïques autonomes sont devenus une solution efficace pour répondre aux besoins énergétiques, notamment dans les régions isolées difficiles à raccorder au réseau électrique.

Ce mémoire a traité différents aspects liés aux systèmes photovoltaïques autonomes, en commençant par l'étude du gisement solaire et l'évaluation du potentiel solaire disponible, puis en abordant le principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques et les différents composants du système, jusqu'aux étapes de conception, de calcul et de choix des équipements adaptés aux besoins de consommation.

L'étude a également mis en évidence l'importance de ces systèmes dans la fourniture d'une source fiable d'énergie électrique et dans la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles, contribuant ainsi aux objectifs du développement durable et à la protection de l'environnement. Les connaissances théoriques ont été complétées par une étude de cas pratique, permettant d'évaluer les performances techniques et économiques du système proposé, dont les résultats ont montré la rentabilité et les avantages des systèmes photovoltaïques autonomes à long terme.

En conclusion, le développement continu des technologies solaires et la baisse du coût des équipements ouvrent de larges perspectives pour leur utilisation future dans divers domaines. Ainsi, l'investissement dans l'énergie solaire et la promotion de la recherche scientifique dans ce domaine constituent des étapes essentielles vers un avenir énergétique durable et plus respectueux de l'environnement. Nous espérons que ce mémoire a contribué à mettre en évidence l'importance des systèmes photovoltaïques autonomes et leur rôle dans la réponse aux défis énergétiques actuels et futurs.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Chapitre I : Gisement solaire

[1] K. Bedda, R. Bakka. Conception d'une centrale photovoltaïque pour alimenter un site connecté au réseau électrique. Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah - Ouargla, Algérie, 2023.

[2] Star Walk, Quel type d'étoile est le Soleil ? .[Consulté le 23 avril 2026]. Disponible sur : https://starwalk.space/fr/news/what-type-of-star-is-the-sun.

[3] Hachem. « Le gisement solaire ». UMI e-Learning, Université Moulay Ismaïl, Meknès, Maroc. Disponible sur : https://fad.umi.ac.ma.[Consulté le 16 juin 2026].

[4] Techno-Science.net. Chaîne proton-proton - Définition, [Consulté le 30 avril 2026]. Disponible sur : : https://www.techno-science.net/definition/6656.html

[5] Laughton, Chris. Eau chaude solaire : Conception et installation des chauffe-eau solaires. Paris : Dunod, 2010.

[6] Belghachi,A. Géométrie & Gisement Solaires. Office des Publications Universitaires (OPU), Algérie, 2010.

[7] Amiri, B. Estimation Temporelle du Rayonnement Solaire au Nord et au Sahara Algérien à Partir de Données de Mesures Sélectionnées. ResearchGate, 2021. Disponible sur : [https://www.researchgate.net/publication/358676241]

[8] Billard, T. Radioprotection et rayonnements ionisants. Document PDF, Société Française de Radioprotection (SFRP), 2017.

[9] Alain Ricaud, Gisement solaire et transferts énergétiques, Université de CERGYPONTOISE. Jan-2011.doc.

[10] Laouicha ,D. Optimisation du rayonnement solaire sur quelques sites algériens. Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi- Bordj Bou Arreridj, Algérie, 2024.

[11] NASA. Facts About Earth. NASA Science. [Consulté le : 8 avril 2026]. Disponible sur : NASA Science – Facts About Earth

[12] Silve, H. Le rayonnement solaire et les installations solaires. Apprendre le génie climatique. Disponible sur : https://apalis.fr/herve.silve/solaire.htm.

[13] Kaekoda . BUP **:** Bulletin de l'Union des Physiciens (Physique - Chimie). [Consulté le :3 mai 2026]. Disponible sur : http://kaekoda.free.fr/bup/bup1_html/bup1_htmlse2.html.

[14] Hamimid, S. Gisement solaire. Mémoire de Master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, Algérie, 2022/2023.

[15] CEA. "Soleil - Chapitre 1 ".Paris, France. [Consulté le : 3 mai 2026]. Disponible sur: cea.fr/comprendre/Pages/matiere-univers/soleil.aspx?Type=Chapitre&numero=1.

[16] Université de Genève. "T1 constante de stefan boltzman." Section de physique, Faculté des sciences, Genève, Suisse. [Consulté le : 25 avril 2026]. Disponible sur : https://www.unige.ch/sciences/physique/tp/tpe/PDF/T1.pdf.

[17] SAOULI. S.Étude des caractéristiques courant tension d'une cellule de silicium. Mémoire de Master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, Algérie, 2018.

Chapitre II : Energie solaire photovoltaïque :

[1] Guerchaoui.W, Remak.M, Dimensionnement d'une installation solaire photovoltaïque.Mémoire de Master, Université de Boumerdès, Algérie, 2020.

[2] SolarPower Europe, Global Market Outlook for Solar Power 2025–2029, Disponible sur: https://www.solarpowereurope.org, 2025.

[3] PERRIN, Jean-François. Énergie des photons U.V. et visibles et transitions énergétiques. Cours de Bioanalyses, Disponible sur : http://www.perrin33.com/biochanalys/photons/absfluo-uvvisible-1.php

[4] Bernard, J.-L., Énergie solaire : les bases théoriques pour la comprendre, Encyclopédie de l'Énergie.

[5] Guenineche. L, Cours d'électronique fondamentale 1: Chapitre 3 : Les diodes à jonction et ses applications, Centre Universitaire de Maghnia, Faculté de Technologie, Algérie, 2023.

[6] Khalil, Kassem Najm, Fabrication et technologies des cellules photovoltaïques, 2023.

[7] MCours, Support de cours en ligne, Disponible sur : https://www.mcours.net/cours/pdf/kha/khacoursclic1331.pdf.

[8] Timo. C'est quoi, un semi-conducteur ? Couleur Science, Disponible sur : https://couleur-science.eu/?d=10d2d2--cest-quoi-un-semi-conducteur

[9] Lalam.D, Étude et optimisation des cellules solaires en couches minces CdTe/CdS. Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2016.

[10] Bounadja.Y,Mehtougui.B, Méthodologie d'évaluation des systèmes photovoltaïques. Mémoire de Master, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran (USTO-MB), Algérie, 2013.

[11] Ghouali, S. Jonction PN à l'équilibre [Graphique]. ResearchGate, 2021. Disponible sur:https://www.researchgate.net/figure/Jonction-PN-a-lequilibre-Apres-voisinage-de-la-jonction-les-electrons-libres-de-la_fig24_351779366.

[12] Belaidi, S. Étude et optimisation d'une installation photovoltaïque autonome, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie ,2016.

[13] Benmeddour,M. Étude et modélisation des performances des systèmes photovoltaïques, ResearchGate (Figure scientifique), 2023.

[14] Malki.Y, Tababouchet.A, Étude de dimensionnement d'un système photovoltaïque pour l'alimentation électrique du CEM Al-Eidani Ibrahim (BBA), Mémoire de Master, Université de Bordj Bou Arreridj, Algérie, 2022.

[15] 1st Sunflower Renewable Energy. Quelle est la différence entre polycrystallin monocristallin et amorphe cellule solaire à couche mince ? Sunflower Solar. [Consulté le :

17 juin 2026], Disponible sur:http://sunflowersolar.com/index_fr.php?act=content&scheduler_id=362

[16] Yahiouche.S, Laidani, C. E., Commande avancée d'un système photovoltaïque, Mémoire de Master, Université de Bordj Bou Arreridj, Algérie, 2021.

[17] National Renewable Energy Laboratory (NREL), Photovoltaic (PV) I–V Curve and Performance Characteristics, USA, [Consulté le : 17 juin 2026]. Disponible sur : https://pvpmc.sandia.gov/

[18] BBS Slama. Calcul de productible photovoltaïque dans ClimaWin – Module PV-Prod. Article technique, 10 juin 2019.

[19] Ben Zaouche.N, Ouldkadi. A, Modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude d'un système à base d'un CVS Boost, Mémoire de Master, Université Belhadj Bouchaib - Ain Témouchent, Algérie, 2021.

[20] Halouane, A. Modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque, Mémoire de Master, Université M'Hamed Bougara de Boumerdès, Algérie,2017.

[21] Aouidad, H., & Ighobriouen, S., Caractérisation du refroidissement d'un panneau photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2018.

[22] Civisol, Le panneau solaire photovoltaïque : fonctionnement et composition, Guide technique.

Chapitre III Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome

[1] ZERROUKI.Z,BEREKSI REGUIG.R, Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome. Mémoire de Master, Université Abou-Bekr Belkaid - Tlemcen, Algérie, 2017.

[2] SOMABE. "Photovoltaïque pour site isolé «, Disponible sur : https://somabe.com.tn/nos-services/photovoltaique-pour-site-isole.

[3] ResearchGate. "Schémas synoptiques des systèmes photovoltaïques (Hybrides et Connectés au réseau)", Extraits de la plateforme scientifique ResearchGate, 2024.

[4] Aouidad. H, Ighobriouen. S, Caractérisation du refroidissement d'un panneau Photovoltaïque. Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie ,2018.

[5] Le Solaire Pour Tous. Panneaux solaires photovoltaïques: branchement série ou parallèle, Disponible sur : https://www.lesolairepourtous.fr/branchement-serie-ou-parallele/

[6] ACHOUR. A, KAIDARI. R, DJEBLI. F, Dimensionnement d'une installation PV. Application : La bibliothèque et la serre du centre universitaire Salhi Ahmed – Naâma. Mémoire de Master, Centre Universitaire Salhi Ahmed – Naâma , Algérie, 2023.

[7] LEFRANÇOIS, J.J. L'onduleur (Activité interactif). Cours de BTS Électrotechnique : Modulateurs d'énergie. Disponible sur : https://lefrancoisjj.fr/BTS_ET/Modulateurs_d_energie/activite_html/Londuleur.html.

[8] HENNOUS. C, AIT-ALLALA.K, Dimensionnement et installation d'un système photovoltaïque Application à la F.G.E.I, Mémoire de fin d'études d'Ingénieur d'État, Faculté de Génie Électrique et de l'Informatique, Département d'Électronique, Algérie, 2009.

[9] Batterie-Solaire. Onduleur/Chargeur MultiPlus 12/1200/50-16 Victron. Disponible sur le site Batterie-Solaire

[10] GuidEnR Photovoltaïque. La décharge d'une batterie acide-plomb. Guide des énergies renouvelables : Informations techniques. Disponible sur : http://www.photovoltaique.guidenr.fr/informations_techniques/batteries-acide-plomb/decharge-batterie-acide-plomb.php.

[11] DEHIMI. N, BOUBIR. A. E, Conception d'une centrale photovoltaïque en milieu isolé. Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar – Annaba, Algérie ,2024.

[12] Hankins.M, Installations solaires photovoltaïques autonomes : Conception et installation d'unités non raccordées au réseau, 2012.

[13] Belaiche. H, Nanouche. Y, Étude d'une installation en énergie photovoltaïque intégrée au bâtiment : cas d'un laboratoire au CDER. Faculté du Génie de la Construction

Département de Génie Mécanique Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Algérie, 2014.

[14] ASE Energy, Régulateur solaire MPPT 100A 12V/24V/48V VE.Can Victron SmartSolar 250/100 MC4, Disponible sur : https://www.du.edu/.

[15] OUADAHI. M & ABDI. Kh, Préfaisabilité et dimensionnement d'une centrale PV reliée au réseau pour l'alimentation de l'Hôpital Youcef Demerdji de Tiaret. Mémoire de Fin d'Études pour l'obtention du diplôme de Master en Électrotechnique, Option : Commande Électrique, Université de Tiaret, Algérie, 2020.

[16] Poinot Chazel, Pierre-Jacques. "La chimie des AQ au plomb". Le monde des accumulateurs et batteries rechargeables. Disponible sur : http://www.ni-cd.net.

[17] Chikhaoui. A, Marouf. S, Kacemi.L, Les méthodes de dimensionnement d'un système photovoltaïque application à la région de Naâma. Mémoire de Master, Centre Universitaire Salhi Ahmed - Naâma, Algérie, 2023.

[18] DJILAT. Z, BOURAS.S, Méthodes de dimensionnement d'un système photovoltaïque application à la région de M'sila. Mémoire de Master Académique, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, Algérie, 2019.

[19] DAHHANE. M, BENDEBICHE.A, MANSOUR.I, Étude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque au lycée des frères Barrani Mecheria wilaya de Naâma. Mémoire de Master en Électrotechnique, Option : Énergies Renouvelables, Centre Universitaire Salhi Ahmed – Naâma, Algérie, 2021.

[20] SAAD Saoud. Cours de Dimensionnement des systèmes photovoltaïques,Chapitre 06 : Le besoin énergétique, Master 1 (MI ER), Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, Algérie, 2024.

[21] MyShop Solaire, Guide de montage : Kit solaire autonome 12V (20W - 30W) + Convertisseur 230V, Disponible sur : https://www.myshop-solaire.com/guide-de-montage-kit-solaire-autonome-12v-20w-30w-convertisseur-230v-_r_79_a_240.html

[22] SOLERA, Protections DC vs AC photovoltaïque : guide pratique , 2025 , Disponible sur :https://www.psolera.com/fr/nouvelles/protections-dc-ac-photovoltaique-quand-utiliser

[23] Myshop Solaire. Quelle section de câble prendre pour mon installation 12V. Disponible sur [https://myshop-solaire.com/quelle-section-de-cable-prendre-pour-mon-installation-12v-_r_a_1111.html]