

République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministère De l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Saad Dahlab Blida-01
Faculté de Technologie
Département d'électronique



Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Master

Option : Instrumentation

Thème :

**Application des outils Python pour le dimensionnement d'un système
Photovoltaïque raccordé au réseau**

Présenté par : - TOUABTI Sidali

- HEDROUG Mohamed Anis

Soutenu le 14/06/2025 devant le jury composé par :

Pr. A. GUESSOUME
Dr. H. KAHLANE
Dr. T. NACER

USDB
USDB
ENSH

Président
Examineur
Promoteur

Année universitaire : 2024/2025

Remerciements

En premier lieu, nous remercions Allah qui nous donne la force, la patience et la capacité d'accomplir ce modeste mémoire.

Ensuite, nous remercions notre promoteur Dr Tarek NACER qui nous a encadré, suivi de près et conseillé.

Nous remercions les jurys qui ont accepté de juger et d'évaluer notre travail.

Un grand merci aussi à nos familles et nos collègues pour leur présence et leur aide tout au long de cette aventure.

Dédicaces

Dans le cadre de l'achèvement de notre projet de fin d'études, je tiens à dédier ce travail :

A Ma famille qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études et qui est la raison pour laquelle je suis à ce stade dans les meilleures conditions possibles.

A Tous mes amis qui m'ont toujours encouragé, et à qui je souhaite plus de succès et de bonheur.

Mr. NACER avec qui nous avons eu la chance de travailler et d'apprendre, merci pour cette grande expérience.

À tous mes amis et toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce à la réussite de ce projet.

Enfin, je dédie mon binôme Anis Hedroug son soutien, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet.

Touabti Sidali

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à plusieurs personnes chères qui ont joué un rôle essentiel tout au long de ce parcours :

À mon binôme, pour son engagement, sa collaboration constante et son esprit d'équipe sans faille durant toutes les étapes de ce travail.

À ma famille, pour leur amour inconditionnel, leurs encouragements permanents et leur soutien dans les moments de doute comme dans les réussites. Vous avez toujours cru en moi, et cela m'a donné la force d'avancer.

À mes amis, pour leur présence, leur bonne humeur, leurs conseils et leurs encouragements sincères. Votre soutien a souvent été un moteur silencieux mais puissant.

À la mémoire de mon grand-père,
parti trop tôt pour voir ce jour arriver.

Ta sagesse, ton courage et tes valeurs continueront de m'accompagner tout au long de ma vie.
Tu as semé en moi l'amour de l'effort, le respect du savoir et le goût du travail bien fait.

Ce mémoire est le fruit de ce que tu m'as transmis,
et je te le dédie avec émotion, gratitude et amour.

Repose en paix.

À toutes ces personnes, merci du fond du cœur.

Hedroug Mohamed Anis

Table des matières

Remerciements.....	2
Dédicaces	3
Dédicaces	4
Table des matières	5
Table des figures	8
Liste des tableaux.....	9
Résumé.....	10
Abstract.....	10
الملخص.....	10
Liste des abréviations.....	11
Introduction Générale	13
Chapitre I : Généralités sur le photovoltaïque	15
1. Introduction.....	15
2. Les cellules photovoltaïques	15
2.1. Définition	15
2.2. Les types cellules photovoltaïque	17
3. Batterie.....	19
3.1. Définition	19
3.2. Les types des batteries	19
4. Onduleur	21
4.1. Définition	21
4.2. Les différents types de l'onduleur.....	22
5. Classification d'un système solaire photovoltaïque (PV).....	22
5.1. Système autonome	22
5.2. Système hybride.....	23
5.3. Système raccordé au réseau	24
6. Conclusion	24
Chapitre II : La consommation énergétique en Algérie	26
1. Introduction.....	26
2. Consommation par secteur.....	26

3.	Vision d'efficacité énergétique	28
3.1.	Introduction.....	28
3.2.	Programme national d'efficacité énergétique	28
4.	Les prix d'électricité par type consommation.....	30
4.1.	Pour les clients Ménages (M)	30
4.2.	Pour les clients Non-Ménages (NM)	31
5.	Conclusion	31
CHAPITRE III: Modélisation d'un système PV.....		33
1.	Introduction.....	33
2.	Modélisation d'un système PV	33
2.1.	Circuit équivalent d'une cellule solaire	33
2.2.	Variation de la puissance avec l'irradiation et la température	35
3.	Système de coordonnées d'un système PV.....	37
3.1.	Coordonnées terrestres.....	37
3.2.	Coordonnées équatoriales	38
3.3.	Coordonnées horizontales.....	39
4.	Modélisation du l'onduleur :.....	40
4.1.	Onduleur autonome.....	40
4.2.	Onduleur triphasé.....	40
5.	Modélisation de la batterie.....	41
6.	Méthodes de dimensionnement.....	43
7.	Outils de dimensionnement :	43
8.	Conclusion :	45
CHAPITRE IV: Dimensionnement du système PV		47
1.	Introduction.....	47
2.	Cas d'étude.....	47
2.1.	Sonelgaz.....	47
2.2.	Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida (SKTM)	48
2.3.	Le stage effectué chez Sonelgaz	48
2.4.	La région de Bordj el Haouas	48
3.	Chargement des données.....	49
3.1.	Importation des bibliothèques PYTHON.....	49
3.2.	La consommation électrique du site	49

3.3.	Les données solaires du site	50
3.4.	Les caractéristiques techniques des composantes du système	52
3.4.1.	Module PV	52
3.4.2.	Onduleur	53
3.4.3.	Batterie	54
3.5	La localisation	54
4.	Dimensionnement et Simulation	55
4.1.	Scénario 1 : Système autonome	55
4.2.	Scénario 2 : système raccordé au réseau	62
4.3.	Scénario 3 : système Hybride	66
5.	Conclusion	69
Conclusion Générale		70
Références bibliographiques		71

Table des figures

FIGURE 1: MODELE D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE	16
FIGURE 2 : STRING PHOTOVOLTAÏQUE	16
FIGURE 3 : MODELE D'UNE CELLULE MONO-CRISTALLINE	17
FIGURE 4 : MODELE D'UNE CELLULE POLY-CRISTALLINE	17
FIGURE 5 : MODELE D'UNE CELLULE CDTE	18
FIGURE 6 : MODELE D'UNE CELLULE CIGS	18
FIGURE 7: LA BATTERIE AU PLOMB-ACIDE	20
FIGURE 8: LA BATTERIE AU CADMIUM – NICKEL	20
FIGURE 9: LA BATTERIE AU NICKEL – ZINC	21
FIGURE 10: LA BATTERIE AU LITHIUM	21
FIGURE 11: SYSTEME AUTONOME	23
FIGURE 12: SYSTEME HYBRIDE	23
FIGURE 13: SYSTEME RACCORDE AU RESEAU	24
FIGURE 14: CONSOMMATION FINALE D'ENERGIE PAR SECTEUR D'ACTIVITE	27
FIGURE 15 : EVOLUTION DE LA CONSOMMATION FINALE PAR PRODUIT	27
FIGURE 16 : EVOLUTION DE LA CONSOMMATION FINALE PAR SECTEUR	28
FIGURE 17: SCHEMA EQUIVALENT D'UNE CELLULE IDEALE	33
FIGURE 18: SCHEMA EQUIVALENT D'UNE CELLULE PHOTOVOLTAÏQUE REELLE	34
FIGURE 19: CARACTERISTIQUE P-V DU MODULE PV SELON L'ECLAIREMENT	36
FIGURE 20: CARACTERISTIQUE I-V DU MODULE PV SELON L'ECLAIREMENT	36
FIGURE 21 : CARACTERISTIQUE P-V DU MODULE PV SELON LA TEMPERATURE	37
FIGURE 22: LA CARACTERISTIQUE I-V DU MODULE PV SELON LA TEMPERATURE	37
FIGURE 23: COORDONNEES TERRESTRES	38
FIGURE 24: COORDONNEES HORIZONTALES	40
FIGURE 25 : LE CIRCUIT DE L'ONDULEUR TRIPHASE	40
FIGURE 26 : LE MODELE R-C D'UNE BATTERIE	42
FIGURE 27: LE SIGNE DE SONELGAZ	47
FIGURE 28: LE SIGNE DE SKTM	48
FIGURE 29 : LES DONNEES REGIONALES DE BORDJ EL HAOUAS	48
FIGURE 30: L'EVOLUTION DES CHARGES EN BORDJ EL HAOUAS A 2022	49
FIGURE 31 : L'EVOLUTION DE LA TEMPERATURE POUR UNE ANNEE TYPIQUE	50
FIGURE 32 : L'EVOLUTION DE GHI EN BORDJ EL HAOUAS POUR UNE ANNEE TYPIQUE	51
FIGURE 33 : LA LOCALISATION DU STATION PV DE BORDJ EL HAOUAS	54
FIGURE 34 : ORGANIGRAMME D'UN SYSTEME AUTONOME	55
FIGURE 35 : ORGANIGRAMME D'UN SYSTEME RACCORDE AU RESEAU	62
FIGURE 36 : LA COMPARAISON ENTRE LA PRODUCTION ET LA CONSOMMATION	66
FIGURE 37: ORGANIGRAMME D'UN SYSTEME HYBRIDE	67
FIGURE 38: BILAN ENERGETIQUE QUOTIDIEN : PV, BATTERIE, DIESEL VS CONSOMMATION	68

Liste des tableaux

TABLEAU 1 : CONSOMMATION FINALE PAR SECTEUR	26
TABLEAU 2 : TARIF POSTE HORAIRE POUR LES CLIENTS MENAGES.....	30
TABLEAU 3 : TARIF PROGRESSIF POUR LES CLIENTS MENAGES	30
TABLEAU 4 : TARIF POSTE HORAIRE POUR LES CLIENTS NON-MENAGES.....	31
TABLEAU 5 : TARIF PROGRESSIF POUR LES CLIENTS NON-MENAGES	31
TABLEAU 6: RESULTATS DU DIMENSIONNEMENT (SYSTEME PV AUTONOME).....	61
TABLEAU 7 : SIMULATION DU SYSTEME PV SUR TOUTE L'ANNEE.....	61
TABLEAU 8: SIMULATION DU SYSTEME PV SUR TOUTE L'ANNEE	65
TABLEAU 9: RESULTATS DU DIMENSIONNEMENT (SYSTEME PV HYBRIDE).....	68
TABLEAU 10: BILAN ENERGETIQUE ANNUEL DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE.....	68

Résumé

Dans un contexte de transition énergétique et de dépendance croissante aux énergies fossiles, l'Algérie, riche en ensoleillement, présente un fort potentiel pour le développement de l'énergie solaire photovoltaïque. Ce mémoire porte sur le dimensionnement du système photovoltaïque, appliqué à la région de Bordj El Haouas. L'étude repose sur des données réelles de consommation énergétique et de conditions climatiques locales. Plusieurs scénarios ont été simulés, incluant des systèmes autonomes, hybrides et connectés au réseau. L'analyse a permis de déterminer les caractéristiques optimales des composants (modules PV, onduleurs, batteries) afin de garantir une production fiable et adaptée à la demande.

Mots-clés : Énergie solaire, photovoltaïque, dimensionnement, énergie renouvelable, Algérie, raccordement au réseau.

Abstract

In the context of energy transition and growing dependence on fossil fuels, Algeria, rich in sunshine, offers strong potential for the development of solar photovoltaic energy. This thesis focuses on the sizing of a photovoltaic system, applied to the Bordj El Haouas region. The study is based on real-world energy consumption data and local climatic conditions. Several scenarios were simulated, including stand-alone, hybrid, and grid-connected systems. The analysis determined the optimal characteristics of the components (panels, inverters, batteries) to ensure reliable production adapted to demand.

Keywords: Solar Energy, photovoltaic, sizing, Renewable Energy, Algeria, grid connexion.

الملخص

في ظل التحول الطاقوي والاعتماد المتزايد على مصادر الطاقة الأحفورية، تتمتع الجزائر، الغنية بأشعة الشمس، بإمكانات كبيرة لتطوير الطاقة الشمسية الكهروضوئية. يهدف هذا البحث إلى دراسة عملية تصميم نظام شمسي كهروضوئي، وذلك بتطبيقه على منطقة برج الحواس. تعتمد الدراسة على بيانات حقيقية لاستهلاك الطاقة والظروف المناخية المحلية. تم اختبار عدة سيناريوهات، من بينها الأنظمة المستقلة، والأنظمة الهجينة، والأنظمة المرتبطة بالشبكة. وقد سمحت التحاليل بتحديد الخصائص المثلى للمكونات (الألواح الشمسية، المحولات، البطاريات) لضمان إنتاج موثوق ومتوافق مع الطلب.

الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية، الكهروضوئية، التصميم، الطاقة المتجددة، الجزائر، الربط بالشبكة.

Liste des abréviations

PV	Photovoltaïque
a-Si ou a-Si:H	Silicium amorphe ou Silicium amorphe hydrogéné
μc-Si	Microcristallin Silicium
CdTe	Tellure de Cadmium
CIS	Cuivre Indium Sélénium
CIGS	Cuivre Indium Gallium Sélénium
V	Volt (unité de tension électrique)
Ah	Ampère-heure (unité de capacité d'une batterie)
Ni-Cd	Nickel-Cadmium (batterie au Cadmium-Nickel)
Ni-Zn	Nickel-Zinc
Li-ion	Batterie au Lithium
DC	Direct Current (Courant continu)
AC	Alternating Current (Courant alternatif)
TEP	Tonne équivalent pétrole
BTP	Bâtiment et Travaux Publics
GPLc	Gaz de Pétrole Liquéfié carburant
GNC	Gaz Naturel Comprimé
CF	Consommation Finale
W	Watt
Wh	Wattheure
K	Constante de Boltzmann
Q	Charge élémentaire de l'électron
I-V / P-V	Courbe Intensité-Tension / Puissance-Tension
φ (phi)	Latitude
L	Longitude
δ (delta)	Déclinaison solaire
ω (omega)	Angle horaire
H	Hauteur du Soleil
TSV	Temps solaire vrai
A	Azimuth du Soleil
R-C	Modèle Résistance – Capacité utilisé pour la modélisation des
SKTM	Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida
SER	Sonelgaz Energie Renouvelables
TMY	Typical meteorological year. Année météorologique typique.
GHI	Global Horizontal Irradiance (Irradiation globale horizontale)
STC	Standard Test Conditions (1000 W/m², 25°C)
I_{sc}	Courant de court-circuit à STC

V_{oc}	Tension en circuit ouvert à STC
I_{mp}	Courant au point de puissance maximale
V_{mp}	Tension au point de puissance maximale
NOCT	Température nominale de fonctionnement
Vac	Tension alternative en sortie de l'onduleur
Paco	Puissance AC nominale de sortie
Pdco	Puissance DC maximale que l'onduleur peut convertir
Vdcmax	Tension DC maximale admissible par l'onduleur
Idcmax	Courant DC maximum admissible
MPPT	Maximum Power Point Tracking
Mppt_low	Tension DC minimale pour le suivi MPPT
Mppt_high	Tension DC maximale pour le suivi MPPT
LiFePO4	Lithium Fer Phosphate
SOC	State of Charge (État de charge de la batterie)
LPSP	Loss of Power Supply Probability
SAPM	Sandia Array Performance Model

Introduction Générale

Dans un monde confronté à des défis majeurs tels que l'épuisement des ressources fossiles, le réchauffement climatique et la pression croissante sur les ressources énergétiques, le recours aux énergies renouvelables n'est plus une option, mais une nécessité. Parmi ces énergies, l'énergie solaire occupe une place stratégique, notamment dans les pays à fort ensoleillement comme l'Algérie, qui bénéficie de plus de 3 000 heures d'ensoleillement par an dans certaines régions du sud.

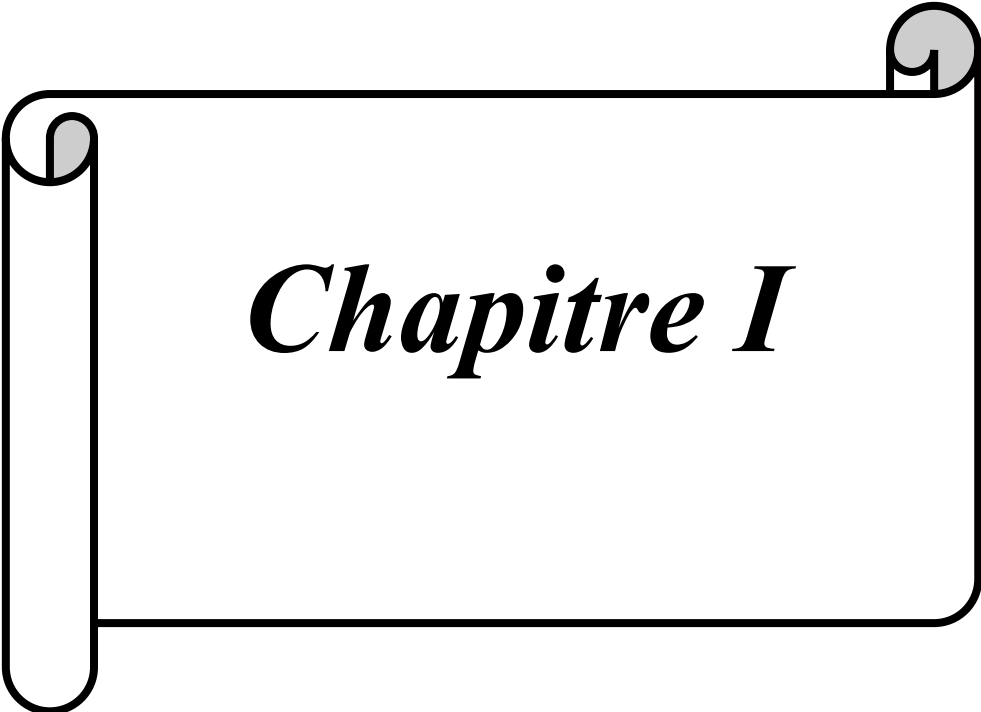
L'énergie solaire photovoltaïque, qui consiste à convertir directement la lumière du soleil en électricité, s'impose comme une solution technologique prometteuse, capable de répondre à la fois aux exigences de durabilité, d'indépendance énergétique et de développement local. Elle permet non seulement de réduire les émissions de gaz à effet de serre, mais aussi de renforcer l'autonomie énergétique des zones isolées, souvent mal desservies par les infrastructures classiques.

Dans ce contexte, le présent travail s'intéresse au dimensionnement d'un système photovoltaïque, à partir d'un cas concret situé à Bordj El Haouas, une région du sud-est algérien. Le choix de cette localité ne relève pas du hasard : Elle montre bien les défis pour fournir de l'électricité dans les régions isolées où le soleil est très présent.

Dans le cadre de cette étude, un stage a été effectué au sein de l'entreprise Sonelgaz, acteur majeur du secteur énergétique en Algérie. De plus, l'entreprise nous a fourni des données spécifiques sur la région de Bordj El Haouas, telles que les profils de consommation, les besoins énergétiques locaux, données essentielles à la réalisation du dimensionnement du système photovoltaïque étudié dans ce mémoire.

Ce mémoire vise donc à étudier, à travers une approche technique bien définie, les conditions optimales d'installation d'un système photovoltaïque capable de satisfaire la demande locale en électricité. L'étude comprend une analyse des caractéristiques climatiques de la région, de la consommation énergétique du site, ainsi qu'une évaluation des performances attendues selon différents scénarios (système autonome, hybride ou raccordé au réseau).

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres, organisés de manière logique et progressive. Le premier chapitre présente une vue d'ensemble des systèmes photovoltaïques, leur fonctionnement, leurs composants. Le deuxième chapitre se concentre sur la consommation énergétique en Algérie, avec un focus sur les disparités régionales et les perspectives d'évolution. Le troisième chapitre est dédié à la modélisation d'un système photovoltaïque, et enfin, le quatrième chapitre, qui constitue le cœur de ce travail, présente le dimensionnement détaillé d'un système photovoltaïque adapté au site de Bordj El Haouas. L'objectif principal est de proposer une solution fiable et techniquement adaptée, s'inscrivant dans une perspective de développement durable et de transition énergétique nationale.



Chapitre I

Chapitre I : Généralités sur le photovoltaïque

1. Introduction

Le système photovoltaïque est une technologie clé dans la production d'énergie renouvelable. Il repose sur la conversion de l'énergie solaire en électricité à l'aide de cellules photovoltaïques.

Ce système est constitué de plusieurs composants essentiels :

- Des cellules photovoltaïques qui transforment l'énergie solaire en électricité sous forme de courant continu.
- Un onduleur, qui sert à convertir le courant continu généré par les panneaux solaires en courant alternatif.
- Des batteries qui sont installées dans le système pour stocker de l'énergie électrique produite par les panneaux solaires afin de la restituer lorsque la production est insuffisante

Dans ce chapitre, nous allons étudier les différents composants d'un système photovoltaïque.

2. Les cellules photovoltaïques

2.1.Définition

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de générer l'électricité grâce à la lumière du soleil. Elle se compose d'un matériau semi-conducteur. Quand la lumière touche ce matériau, la cellule crée de l'électricité.

Une fine grille métallique est placée sur le dessus de la cellule pour collecter le courant.

La forme et la taille de la cellule sont étudiées pour recevoir un maximum de lumière et réduire les pertes d'énergie.[1]

La structure physique d'une cellule PV est illustrée à la Fig 1.

Plusieurs cellules forment un module photovoltaïque, et plusieurs panneaux forment un String photovoltaïque (Fig 2).

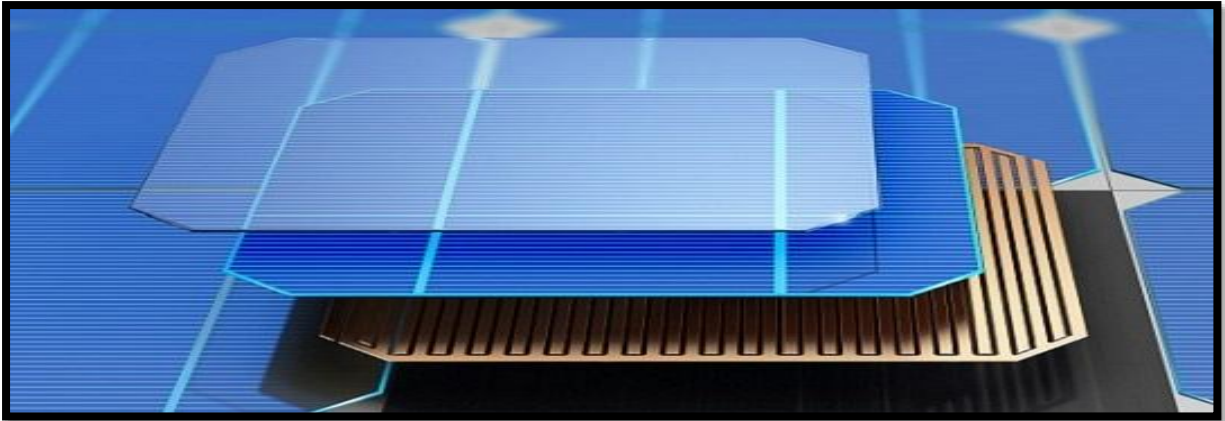


Figure 1: Modèle d'une cellule photovoltaïque [2]



Figure 2 : String photovoltaïque

2.2. Les types cellules photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques est classifies en trois générations :

2.2.1. Cellules de première génération à base de silicium cristallin :

2.2.1.1. Cellules Monocristallines

Les cellules monocristallines sont composées d'un seul cristal de silicium structuré en deux couches. Cette conception donne un rendement énergétique élevé 15% - 25%, les rendant particulièrement performantes pour la conversion de l'énergie solaire en électricité.[3]



Figure 3 : Modèle d'une cellule Mono-Cristalline [4]

2.2.1.2. Cellules Poly-cristallines :

Les cellules polycristallines sont faites en découpant des blocs de silicium, qui ont été fondus et versés dans un moule. Cela leur donne une structure mélangée. Même si elles produisent moins d'énergie que les cellules monocristallines, elles sont moins chères et très utilisées.[3]



Figure 4 : Modèle d'une cellule Poly-Cristalline [4]

2.2.2. Cellules de deuxième génération (couche minces)

2.2.2.1. Cellules au silicium amorphe :

Le silicium amorphe est un matériau qui laisse bien passer la lumière, mais il ne conduit pas très bien l'électricité. Cela fait que les panneaux qui l'utilisent ont un rendement assez bas, entre 6 et 8 % (le record en laboratoire est de 13,4 %). Par contre, sa fabrication ne coûte pas très cher.[3]

2.2.2.2. Les cellules à base de tellure de Cadmium (CdTe) :

La cellule au CdTe (Tellure de Cadmium) est aujourd'hui l'une des plus prometteuses pour la production d'électricité solaire. Elle capte très bien la lumière grâce à une bande interdite directe de 1,45 eV, bien adaptée au spectre solaire. De plus, elle absorbe presque toute la lumière sur seulement 2 micromètres de profondeur. Cependant, l'utilisation du cadmium, un élément toxique, pose des problèmes environnementaux qui ont freiné son développement. [3]

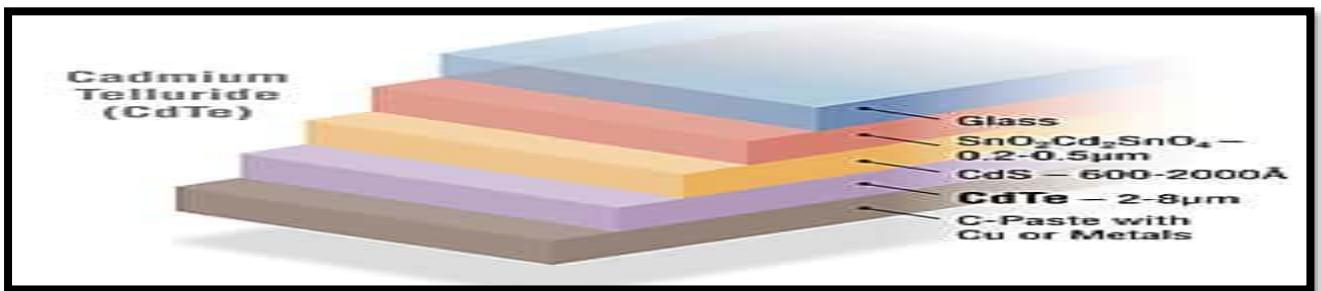


Figure 5 : Modèle d'une cellule CdTe [5]

2.2.2.3. Les cellules à base de Cuivre indium sélénium (CIS) / Cuivre indium Gallium sélénium (CIGS) :

Ce type de cellule a un fort potentiel pour se développer dans le futur, avec des rendements qui dépassent 20 % en laboratoire. Mais les matériaux utilisés pour la fabriquer sont rares et difficiles à trouver en grande quantité. [3]

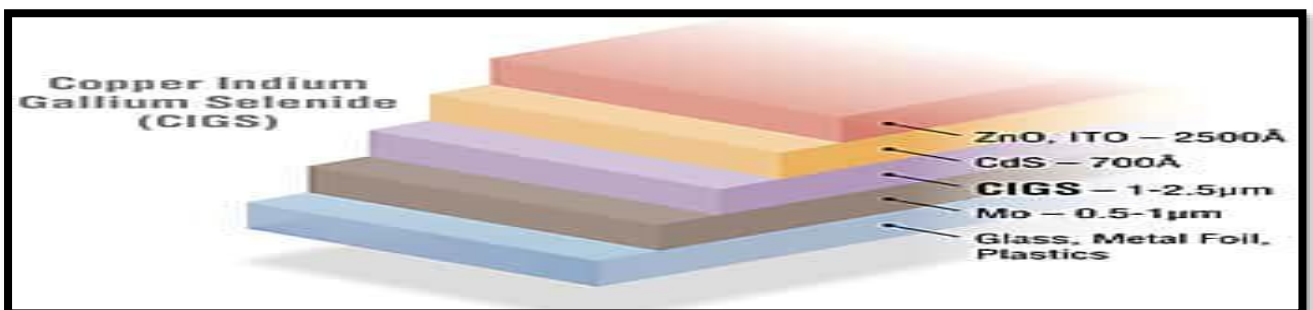


Figure 6 : Modèle d'une cellule CIGS [6]

2.2.3. Cellules de troisième génération :

La troisième génération de cellules solaires est encore en phase de recherche. Pourtant, leur développement avance rapidement, surtout pour des usages dans l'espace. Ces cellules cherchent à atteindre des rendements très élevés tout en réduisant les problèmes des anciennes générations, comme le coût de fabrication, la rareté ou la toxicité des matériaux. Grâce à leurs grandes promesses, elles pourraient bien apporter des solutions à ces difficultés dans un avenir proche. [3]

2.2.3.1. La filière des cellules organiques :

On a observé l'effet photovoltaïque dans les matériaux organiques depuis plus de 40 ans. Depuis, ce type de cellule a connu la plus forte croissance parmi toutes les technologies solaires ces 12 dernières années. Grâce aux progrès récents, les rendements ont atteint 13,2 %. Mais leur développement à grande échelle reste limité à cause de la faible mobilité des charges électriques dans le matériau, ce qui réduit le rendement, et de la courte durée de vie des cellules. [3]

2.2.3.2. La filière des pérovskites

C'est un nouveau type de cellule photovoltaïque encore en phase de recherche. Cette technologie est vue comme l'une des plus prometteuses parmi les systèmes solaires récents. Les cellules à pérovskite offrent aujourd'hui une alternative intéressante aux cellules en silicium, qui dominent actuellement le marché.[3]

3. Batterie

3.1.Définition

La Batterie stocke l'énergie générée par les cellules photovoltaïques pour l'utiliser plus tard. C'est ce que nous appelons un système autonome.

On utilise des batteries pour stocker l'énergie PV quand elle n'est pas disponible (Pendant la nuit ou le mauvais météo).

La tension des batteries est entre 2, 6 et 12 Volts, et leur capacité ampère-heure varie également.[7]

3.2.Les types des batteries

Il existe plusieurs types des batteries utilisées dans les systèmes PV :

3.2.1. La batterie au Plomb-Acide (Pb-Acide) :

Une batterie plomb-acide est l'ensembles d'éléments de 2 Volts connectés en série pour obtenir la tension souhaitée. Elle consiste des plaque positives en bioxydes est autres plaques négatives en plomb spongieux, ces électrodes sont plongées dans une solution d'acide sulfurique.

La tension de ce type est entre 1,7 et 2,4 Volts, et il a un rendement énergétique de 70 à 85 %.[7]



Figure 7: La batterie au Plomb-Acide [8]

3.2.2. La batterie au Cadmium - Nickel (Ni-Cd) :

La tension de cette batterie est entre 1,15 et 1,45 Volts par élément, et elle a un rendement énergétique d'environ 70 %.

Malgré elle couts chers, mais il a des plusieurs avantages comme :

- Une grande solidité.
- Supporte les fortes décharges.
- Une bonne résistance au froid.
- Elle a aucune émission toxique de l'électrode. [7]



Figure 8: La batterie au Cadmium – Nickel [9]

3.2.3. La batterie au Nickel – Zinc (Ni-Zn) :

Elle est encore dans le domaine de la recherche mais elle est l'intérêt d'utiliser des matériaux moins chers et moins toxiques.

La tension de cette batterie est entre 1,6 et 1,8 Volts.

L'inconvénient principale de cette batterie est sa durée de vie qui reste limitée par un nombre de cycle.



Figure 9: La batterie au Nickel – Zinc [10]

3.2.4. La batterie au Lithium (Li-ion) :

Elle utilise un électrolyte liquide organique.

Elle est intéressante car :

- Elle a une grande capacité par rapport à leur poids.
- Elle résiste les fuites.
- Elle a une grande stabilité face à la température.

Leur développement dépend de l'augmentation du nombre de cycles qu'elles peuvent supporter.



Figure 10: La batterie au Lithium[11]

4. Onduleur

4.1.Définition

L'onduleur transforme le courant continu du générateur solaire en courant alternatif monophasé ou triphasé.

Il fonctionne dans une plage limitée et marche très bien avec des valeurs d'entrée et sorties fixes.[12]

4.2. Les différents types de l'onduleur

4.2.1. Petit onduleur

Un petit onduleur peut être branché sur la prise d'un véhicule pour convertir l'énergie DC de 12 volts provenant de la batterie du véhicule en énergie AC de 120 volts, permettant ainsi d'alimenter un ordinateur portable.[12]

4.2.2. Onduleur de plus grande capacité

Des onduleurs de plus grande capacité sont disponibles pour des charges plus importantes. Par exemple, un onduleur de 4000 watts peut être connecté à une batterie de 12 volts afin d'alimenter de petits appareils en courant alternatif.[12]

4.2.3. Onduleur en série :

Un onduleur en série (string inverter) est utilisé pour convertir l'énergie DC provenant d'un panneau solaire en énergie AC et peut être raccordé à un panneau de distribution électrique dans une résidence ou un bâtiment. Ces onduleurs existent en différentes puissances, en fonction des besoins en courant alternatif[12]

5. Classification d'un système solaire photovoltaïque (PV)

Les systèmes solaires photovoltaïque sont classés en trois catégories principales à base des nécessité énergétiques et des conditions d'installation :

5.1. Système autonome

L'objectif des systèmes autonomes est l'alimentation d'un ou des plusieurs appareils situés dans une zone isolée d'un réseau électrique.

Par exemple, sur l'image ci-dessous, on voit un système PV autonome pour garantir l'alimentation dans chaque moment et pendant plusieurs jours malgré si la production n'est pas continue.[13]

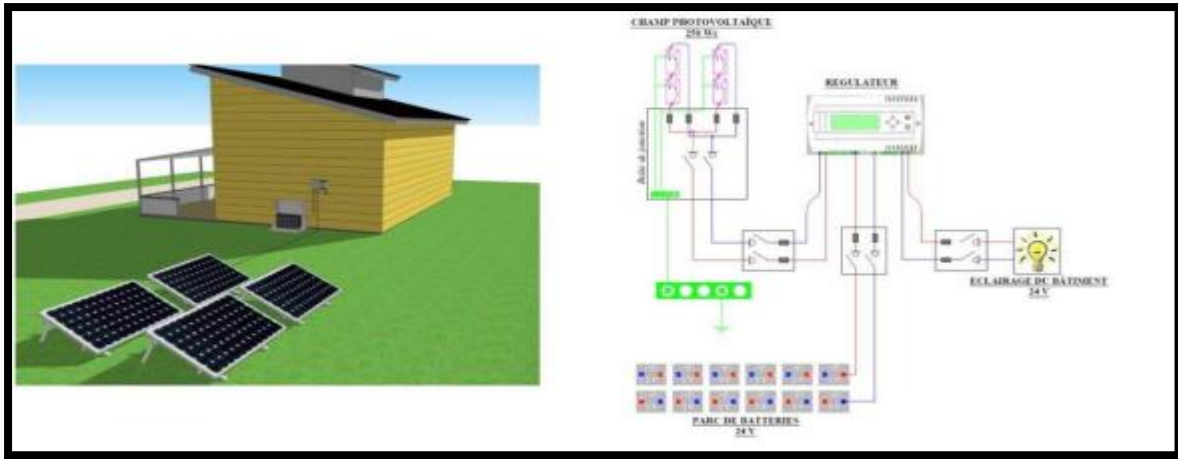


Figure 11: Système autonome[13]

5.2.Système hybride

Les systèmes hybrides obtiennent leur production électrique à partir de plusieurs sources différentes, qui ne sont pas reliés aux réseaux de distribution d'électricité.

En pratique, le système hybride est composé d'un générateur PV et d'une éolienne ou d'un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des batteries pour le stockage de l'énergie.

Ce système est un bon choix pour les applications qui demandent une alimentation continue d'une puissance assez élevée.[13]

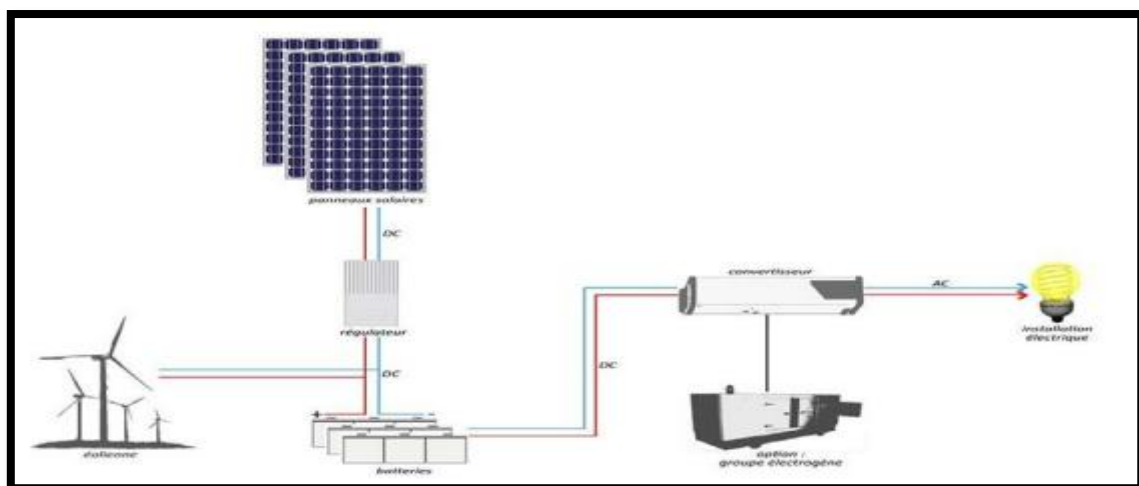


Figure 12: Système hybride[13]

5.3. Système raccordé au réseau

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec un réseau d'électricité. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des groupes qu'ils sont appelés « Strings », qu'ils sont reliés à un onduleur.

L'onduleur transforme le courant continu (DC) produit par les panneaux en courant alternatif (AC). Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut gérer un ou plusieurs strings.

Lorsque la consommation locale dépasse la production de l'installation PV, le manque sera complété par le réseau.[13]

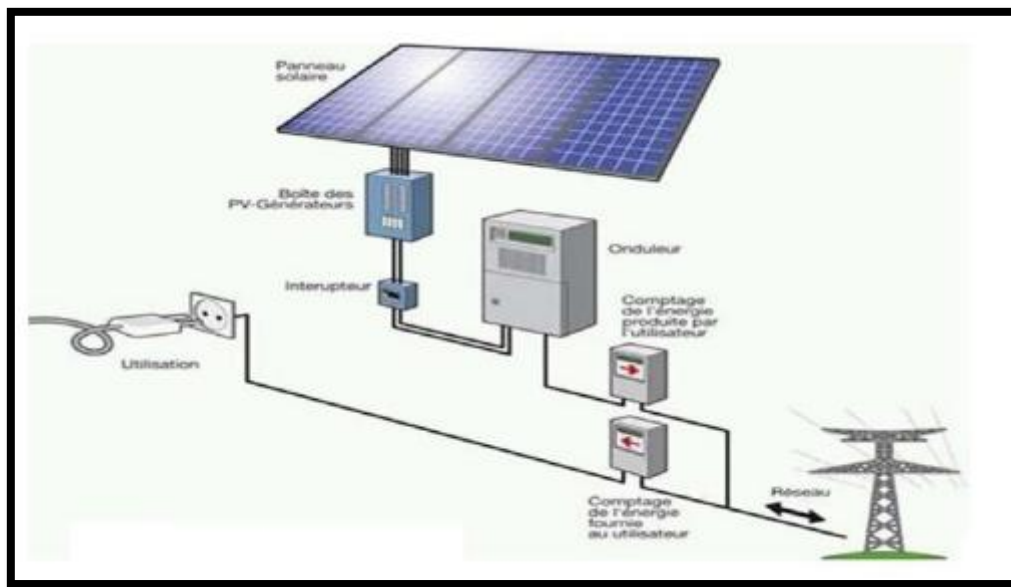


Figure 13: Système raccordé au réseau[13]

6. Conclusion

Le système photovoltaïque constitue une technologie clé dans la production d'énergie renouvelable, reposant sur la conversion directe de l'énergie solaire en électricité grâce aux cellules photovoltaïques. Ces systèmes sont classés en trois catégories principales : les systèmes autonomes, hybrides et raccordés au réseau, chacun répondant à des besoins spécifiques en fonction des conditions d'installation et des exigences énergétiques.

Les composants essentiels d'un système photovoltaïque, tels que les cellules solaires, les onduleurs et les batteries, jouent un rôle fondamental dans l'efficacité et la stabilité de l'alimentation électrique.



Chapitre II

Chapitre II : La consommation énergétique en Algérie

1. Introduction

Avant de proposer des solutions pour mieux utiliser l'énergie, il faut d'abord comprendre comment elle est consommée aujourd'hui. Ce chapitre fait un point sur la consommation d'énergie en Algérie par secteur, les changements récents, les objectifs fixés pour les années à venir, et les efforts mis en place pour encourager une utilisation plus responsable de l'électricité.

2. Consommation par secteur

En 2023, la consommation finale est spécifiée selon les secteurs d'activité.

- Le secteur des « Ménages et autres » est diminué par 1.9%, de 25.2 à 24.7 millions de tonnes équivalent pétrole (M Tep). Cette baisse est surtout du secteur résidentiel, qui consomme 3 % de moins.
- Le secteur des « transports » continue à augmenter avec une hausse de 5.1%. Il passe de 15.3 à 16.1 M Tep, surtout à cause de l'augmentation de l'usage des carburants pour les véhicules.
- Le secteur de l'industrie et du BTP est aussi augmenté avec une hausse de 6.3%, atteignant 13,4 M Tep. Cela est lié à la reprise de l'activité économique, surtout dans les industries de matériaux de construction et les petites industries .[14]

Les chiffres détaillés de la consommation par secteur sont présentés par :

Unité : KTep	2022	2023	Evolution	
			Quantité	(%)
Industrie et BTP, dont :	12596	13 394	799	6,3
Matériaux de construction	5113	5458	345	6,8
ISMME	2842	3067	224	7,9
BTP	620	610	-10	-1,7
Industries Manufacturières, dont :	1357	1460	103	7,6
Industries Agroalimentaires	1213	1343	130	10,7
Chimie	709	729	21	2,9
Autres industries	1955	2071	116	5,9
Transport, dont :	15297	16083	787	5,1
Routier	14313	14884	571	4,0
Aérien	262	527	265	101,4
Ménages et autres, dont :	25214	24726	-488	-1,9
Résidentiel	19219	18668	-551	-2,9
Agriculture	799	787	-12	-1.5
Tertiaires et autres	5195	5271	76	1.5
TOTAL	53106	54204	1098	2.1

Tableau 1 : Consommation finale par secteur

En 2023, le secteur des ménages et autres consomme la plus grande partie de l'énergie, avec 46 %. Ensuite, le secteur des transports avec 30 %, puis le secteur de l'industrie et du BTP avec 25 %.[14]

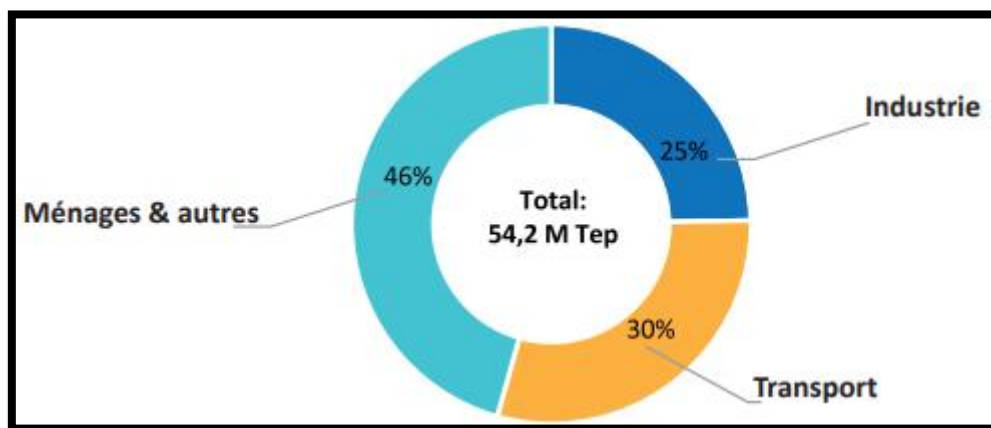


Figure 14: Structure de la consommation finale d'énergie par Secteur d'activité[14]

Pour résumer :

Entre 2022 et 2023, la consommation d'énergie dans les secteurs des transports et de l'industrie a été augmentée. En revanche, elle a diminué dans les secteurs résidentiels et agricoles.

Dans les deux graphiques suivants, on peut voir la demande pour les principaux types de combustibles qui a suivi la même tendance [14]

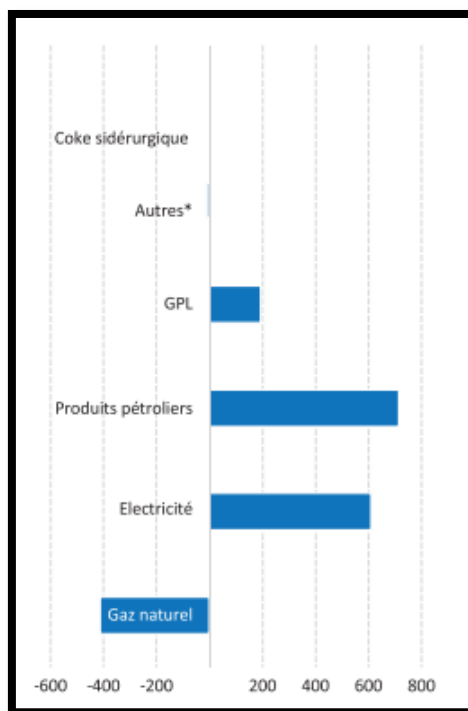


Figure 15 : Evolution de la consommation finale par produit

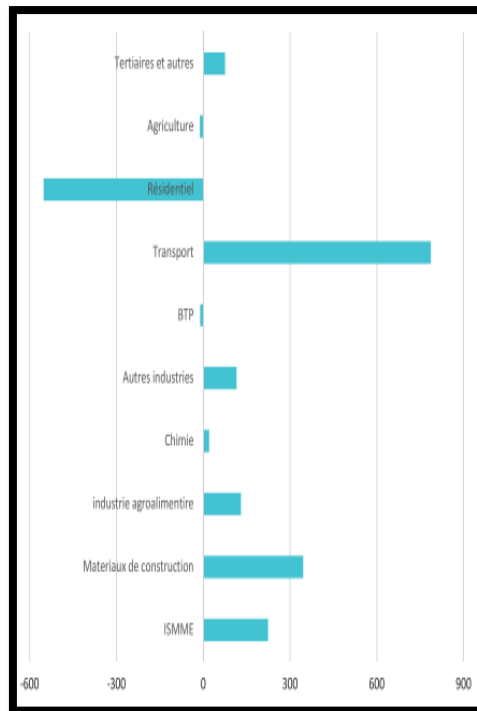


Figure 16 : Evolution de la consommation finale par secteur

3. Vision d'efficacité énergétique

3.1.Introduction

Le programme prévoit d'installer 22 000 mégawatts (MW) d'énergie renouvelable d'ici 2030 pour couvrir les besoins du pays. Il garde aussi l'option d'exporter de l'électricité vers d'autres pays, si les conditions du marché le permettent.

Le programme d'économie d'énergie vise à économiser 63 millions de tonnes équivalent pétrole (TEP) d'ici 2030, pour l'ensemble des secteurs (bâtiment et éclairage public, transport, industrie) et ce, en introduisant l'éclairage performant, l'isolation thermique et les chauffe-eaux solaires, les carburants propres (GPLc et GNc), et les équipements industriels performants.

GPLc : c'est le Gaz de Pétrole Liquéfié carburant. C'est un carburant propre utilisé dans certaines voitures à la place de l'essence ou du diesel. Il pollue moins et coûte moins cher.

GNc : c'est le Gaz Naturel Comprimé. C'est aussi un carburant propre, utilisé dans certains véhicules, surtout les bus ou les camions. Il est bon pour l'environnement car il produit moins de gaz polluants. [15]

3.2.Programme national d'efficacité énergétique

Le programme d'efficacité énergétique reflète la volonté de l'Algérie d'utiliser l'énergie de manière plus responsable. Il vise à protéger les ressources naturelles et à encourager une consommation utile, intelligente et bien organisée.

L'objectif de l'efficacité énergétique consiste à produire les mêmes biens ou services, mais en utilisant le moins d'énergie possible. Ce programme prévoit des actions qui encouragent l'usage des sources d'énergie les plus adaptées à chaque situation. Il demande aussi de changer certaines habitudes et d'améliorer les appareils et les équipements pour consommer moins.

Ce programme prévoit l'introduction des mesures d'efficacité énergétique dans les trois secteurs du bâtiment, de transport et de l'industrie et aussi l'encouragement de la création d'une industrie locale de fabrication des lampes performantes, des chauffe-eau solaires, des isolants thermiques par l'encouragement de l'investissement local ou étranger.

Plan d'Action en Matière d'Efficacité Energétique

L'efficacité énergétique joue un rôle important en Algérie, surtout avec la hausse de la consommation d'énergie due à la construction de logements, aux projets publics et à la relance de l'industrie.

Ce programme, à travers plusieurs actions et projets, vise à créer un marché durable de l'efficacité énergétique.

Il apporte beaucoup d'avantages économiques et sociaux (meilleur confort pour les citoyens, économie d'énergie, création d'emplois et de richesse, et protection de l'environnement).

Le programme se concentre surtout sur les secteurs qui consomment le plus : le bâtiment, le transport et l'industrie.[15]

3.2.1. Pour le secteur des bâtiments :

Le programme veut encourager l'utilisation de nouvelles pratiques et technologies, surtout pour isoler les bâtiments (anciens et nouveaux). Il prévoit aussi des mesures de la phase de conception des logements.

L'objectif est aussi de Développer l'utilisation d'équipements économiques, comme les chauffe-eaux solaires et les lampes à basse consommation, pour améliorer le confort tout en consommant moins d'énergie.

Le programme veut aussi développer une industrie locale pour fabriquer ces équipements pour aider à renforcer l'efficacité énergétique dans le bâtiment.

D'ici 2030, on prévoit d'économiser plus de 30 millions de TEP, répartis comme suit :

- 1- Isolation thermique : plus de 7 millions de TEP économisés.
- 2- Chauffe-eau solaire : plus de 7 millions de TEP économisés.
- 3- Lampes avec une basse consommation : près de 20 millions de TEP économisés.
- 4- Eclairage public : environ 1 million de TEP économisés, ce qui réduire la facture des collectivités.[15]

3.2.2. Pour le secteur des transports :

Le programme veut encourager l'utilisation de carburants plus propres et faciles à trouver, comme le GPLc et le GNc.

L'objectif est de varier les types de carburants disponibles et de réduire l'usage du gasoil, ce qui aura aussi des effets positifs sur la santé et l'environnement.

Grâce à ces efforts, on prévoit d'économiser plus de 16 millions de TEP d'ici 2030.[15]

3.2.3. Pour le secteur de l'industrie :

Le programme veut encourager les industriels à consommer moins d'énergie.

L'industrie est un secteur important, car sa consommation d'énergie va augmenter avec le retour de l'activité.

L'objectif est de faire des économies de plus de 30 millions de TEP d'ici 2030.

Pour atteindre cet objectif, le programme détermine :

- . Faire des contrôles (audits) dans les usines pour trouver où l'on peut économiser de l'énergie et proposer des solutions pour corriger cela.
- . Aider les entreprises à réduire leur consommation trop élevée, en finançant une partie des travaux grâce à l'état.[15]

4. Les prix d'électricité par type consommation

4.1. Pour les clients Ménages (M)

Types de tarif	Code tarif	Redevance fixe DA/mois	Prix de la puissance mise à disposition DA/KW/mois	Prix de l'énergie active cDA / KWh				
				Pointe	Pleine	Nuit	Hors pointe	Jour
Tarifs postes horaires	51 M	286,44	29,85	811,47	216,45	120,50	-	-
	52 M	66,40	29,85	811,47	-	-	178,07	-
	53 M	66,40	14,81	-	-	120,50	-	486,98

Tableau 2 : tarif poste horaire pour les clients ménages

Types de tarif	Code tarif	Redevance fixe DA/mois	Prix de la puissance mise à disposition DA/KW/mois	Prix de l'énergie active cDA / KWh			
				Tranche 1	Tranche 2	Tranche 3	Tranche 4
Tarif progressif	54 M	-	4,37	177,87	417,89	481,20	547,96

Tableau 3 : Tarif progressif pour les clients ménages

Chapitre II : La consommation énergétique en Algérie

La tranche 1 : si la consommation est inférieure ou égale à 41,67 KW/mois (500 KW/année).

La tranche 2 : si la consommation est entre 41,67 et 83,33 KW/mois (entre 501 et 1 000 KW/année).

La tranche 3 : si la consommation est entre 83,33 et 333,33 KW/mois (entre 1 001 et 4 000 KW/année).

La tranche 4 : si la consommation est supérieure à 333,33 KW/mois (plus de 4000 KW/année).

4.2. Pour les clients Non-Ménages (NM)

Types de tarif	Code tarif	Redevance fixe DA/mois	Prix de la puissance mise à disposition DA/KW/mois	Prix de l'énergie active cDA / KWh				
				Pointe	Pleine	Nuit	Hors pointe	Jour
Tarifs postes horaires	51 NM	286,44	29,85	811,47	216,45	120,50	-	-
	52 NM	66,40	29,85	811,47	-	-	178,07	-
	53 NM	66,40	14,81	-	-	120,50	-	486,98

Tableau 4 : Tarif poste horaire pour les clients non-ménages

Types de tarif	Code tarif	Redevance fixe DA/mois	Prix de la puissance mise à disposition DA/KW/mois	Prix de l'énergie active cDA / KWh		
				Tranche 1	Tranche 2	Tranche 3
Tarif progressif	54 M	-	4,37	417,89	481,20	547,96

Tableau 5 : Tarif progressif pour les clients non-ménages

La tranche 1 : si la consommation est inférieure ou égale à 83,33 KW/mois (1000 KW/année).

La tranche 2 : si la consommation est entre 83,33 et 333,33 KW/mois (entre 1 001 et 4 000 KW/année).

La tranche 3 : si la consommation est supérieure à 333,33 KW/mois (plus de 4000 KW/année).

5. Conclusion

Nous remarquons que la consommation de certains secteurs est plus importante que d'autres, en particulier, les secteurs de transport et d'industrie. L'état a pris des mesures pour réduire cette consommation et mieux gérer les ressources disponibles. Ces efforts ouvrent la voie à l'intégration des énergies renouvelables, dont le solaire, pour construire un avenir plus durable.



Chapitre III

CHAPITRE III : Modélisation d'un système PV

CHAPITRE III : Modélisation d'un système PV

1. Introduction

Installer un système solaire ne se fait pas au hasard. Il faut d'abord bien connaître les besoins en électricité, puis choisir les bons équipements. Ce chapitre explique comment calculer et modéliser un système photovoltaïque, en prenant en compte les panneaux, les batteries, l'onduleur, et les outils utilisés pour faire les bons choix.

2. Modélisation d'un système PV

2.1. Circuit équivalent d'une cellule solaire

2.1.1. Cas d'une cellule idéale

Dans le cas idéal, une cellule solaire avec une jonction PN exposée à la lumière et connectée à un appareil électrique (une charge) peut être représentée par un schéma simple. Ce schéma comprend un générateur de courant placé en parallèle avec une diode.[16]

Le générateur produit un courant appelé I_{ph} (courant photo-généré), comme on peut le voir sur la figure (2.1), qui montre le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale.

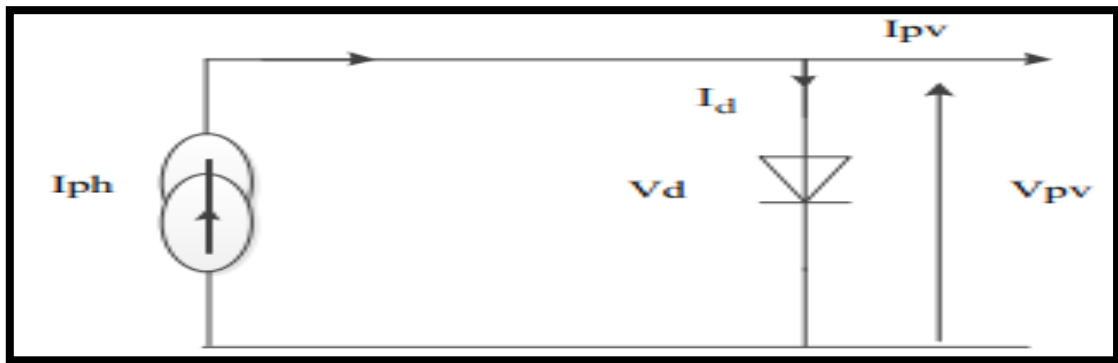


Figure 17: Schéma équivalent d'une cellule idéale[16]

Les équations retenues de ce modèle sont :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (1)$$

Dans le cas où la tension $V_{pv} = 0 V$, le courant I_{ph} égale au courant de court-circuit I_{cc} , c'est-à-dire lorsque la cellule est en **court-circuit**.

$$I_{ph} = I_{cc} = \frac{E}{E_{ref}} \quad (2)$$

E : L'éclairement absorbé par la cellule

E_{ref} : L'éclairement de référence ($1000 W/m^2$)

CHAPITRE III : Modélisation d'un système PV

$$I_d = I_0 * (e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1) \quad (3)$$

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode

$$V_t = \frac{NKT}{q} \quad (4)$$

V_t : Tension thermique.

N : Facteur d'idéalité de la cellule.

K : Constant de Boltzmann ($1,38 * 10^{-23}$ J/K).

q : Charge de l'électron ($1,6 * 10^{-19}$ C). [16]

2.1.2. Cas d'une cellule réelle :

Le schéma de la cellule solaire réelle prend en compte les résistances parasites dues à la fabrication, comme montré sur la figure (2.2). Ce schéma est composé de plusieurs éléments :

- . Une diode (d) qui représente la jonction de la cellule,
- . Une source de courant (I_{ph}) qui représente le courant généré par la lumière,
- . Une résistance série (R_s) qui modélise les pertes dues à l'effet Joule,
- . Une résistance de shunt (R_{sh}) qui représente un courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière de la cellule. Cette résistance est généralement beaucoup plus grande que la résistance série R_s . [16]

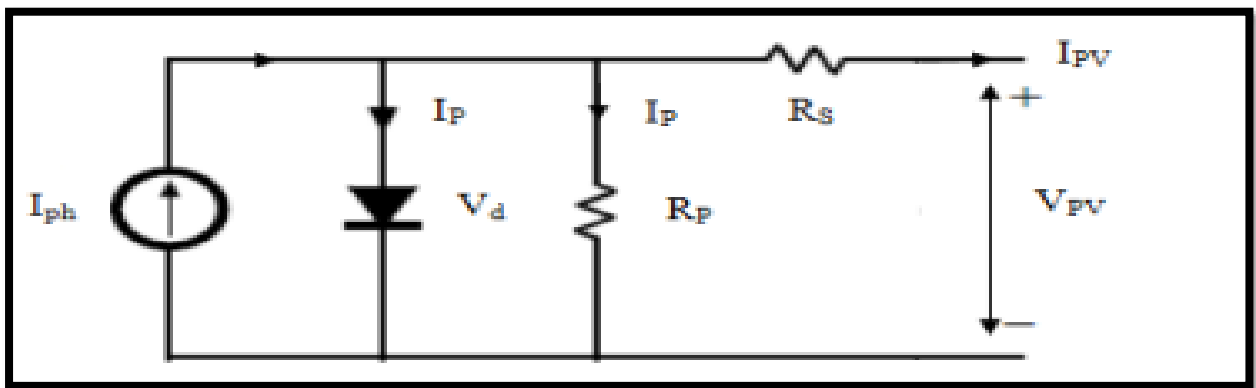


Figure 18: Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle [16]

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (5)$$

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque.

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule.

I_d : Le courant circulant dans la diode.

CHAPITRE III : Modélisation d'un système PV

$$I_d = I_0 * (e^{\frac{V_d}{V_t}} - 1) \quad (6)$$

$$I_0 = I_{cc} * \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 * \left(e^{\left[\frac{E_g}{BK} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right]}\right) \quad (7)$$

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode.

I_{cc} : est le courant de court circuit de la cellule à la température de référence T_n et l'éclairement de référence $E_{réf}$.

T : Température de la jonction des cellules PV [K°].

T_n : Température de référence des cellules PV [K°].

B : facteur d'idéalité de la jonction.

E_g : Énergie de gap [ev].

$$V_d = V_{pv} + R_s * I_{pv} \quad (8)$$

R_s : Résistance série symbolise la résistance de masse du matériau semi-conducteur, ainsi les résistances ohmiques et de contact au niveau des connexions des cellules.

V_{pv} : La tension de sortie.

I_p : Le courant circulant dans la résistance R_p .

R_p : Résistance shunt représente les fuites autour de la jonction p-n dues aux impuretés et sur les coins de la cellule. [16]

$$\text{Donc : } I_{pv} = I_{ph} - \left[I_0 * \left(e^{\frac{V_d = V_{pv} + R_s * I_{pv}}{V_t}} - 1 \right) \right] - I_p \quad (9)$$

2.2.Variation de la puissance avec l'irradiation et la température

2.2.1. Influence de l'éclairement

On peut obtenir une courbe de variation du courant I_{pv} avec la tension V_{pv} , pour les irradiations entre 200 W/m² et 1000 W/m² .[16]

CHAPITRE III : Modélisation d'un système PV

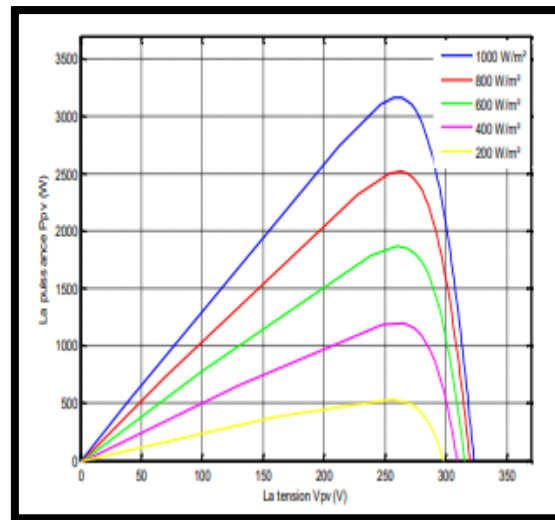


Figure 19: Caractéristique P-V du module PV selon l'éclairement[16]

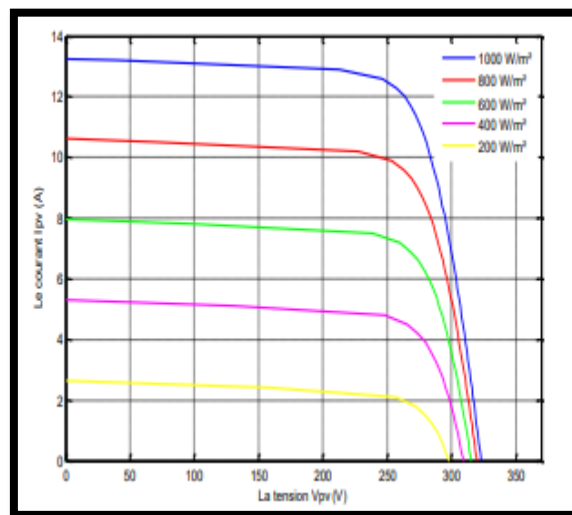


Figure 20: Caractéristique I-V du module PV selon l'éclairement[16]

La valeur de courant I_{pv} est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement.

La tension V_{pv} ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste presque la même, même à faible éclairement.

La norme internationale pour tester les panneaux photovoltaïques est un éclairement de 1000 W/m² et une température de 25 °C.[16]

2.2.2. Influence de la température

La courbe qui relie le courant I_{pv} avec la tension V_{pv} , en variant la température entre 25°C et 50°C.

CHAPITRE III : Modélisation d'un système PV

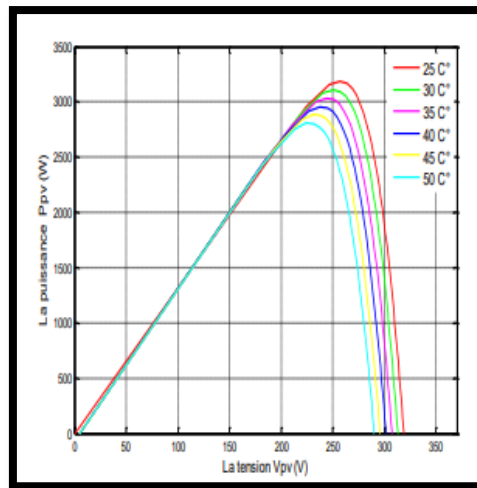


Figure 21 : Caractéristique P-V du module PV selon la température.[16]

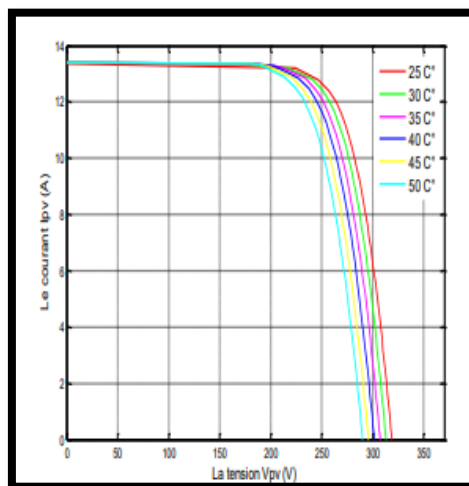


Figure 22: La caractéristique I-V du module PV selon la température.[16]

Dans ce cas, la température a une influence négligeable sur la valeur du courant I_{pv} est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement.

Quand la température augmente, la tension V_{pv} diminue beaucoup

3. Système de coordonnées d'un système PV

Un système PV a trois types de coordonnées :

- Coordonnées terrestres.
- Coordonnées équatoriales.
- Coordonnées horizontales

3.1. Coordonnées terrestres

Pour localiser un point sur la Planète Terre, on doit définir deux coordonnées qui s'appellent les coordonnées terrestres et qui sont :

La latitude (ϕ) : elle est positive dans l'hémisphère nord et négative dans l'hémisphère sud.

CHAPITRE III : Modélisation d'un système PV

La longitude (L) : elle est positive à l'ouest et négative à l'est.

3.1.1. La latitude (φ)

La latitude est une coordonnée géographique qui indique si un point se trouve au nord ou au sud de l'équateur (qui est la ligne de référence).

Elle est entre -90° et 0° vers le sud, et entre 0° et $+90^\circ$ vers le nord.

3.1.2. La longitude (L)

La longitude mesure la position d'un point à l'est ou à l'ouest du méridien de Greenwich (qui est le point de départ (0°)).

- Si un point est à l'est, sa longitude est positive (+).
- Si un point est à l'ouest, sa longitude est négative (-).

La longitude est entre -180° et $+180^\circ$

Chaque degré de longitude représente un décalage de 4 minutes en temps

3.1.3. Inclinaison

L'inclinaison est l'angle que forme le plan de capteur et l'horizontal du lieu.[13]

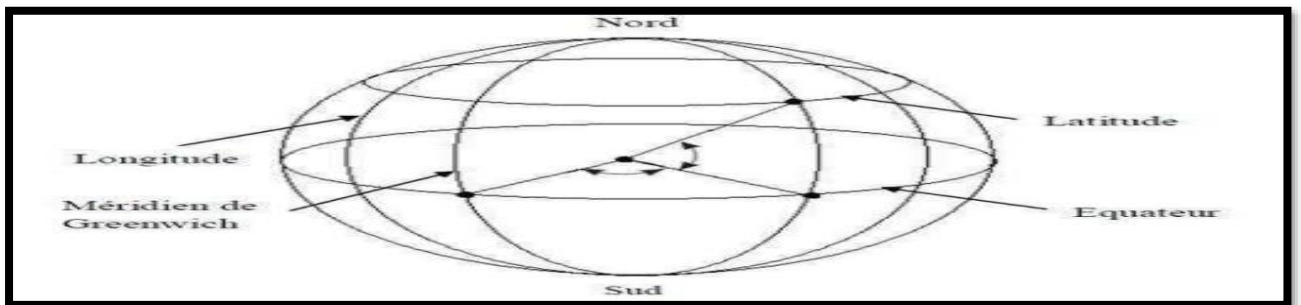


Figure 23: Coordonnées terrestres.[13]

3.2.Coordonnées équatoriales

On peut décrire le mouvement du soleil par rapport à la Terre avec deux angles qui sont :

- La déclinaison (δ).
- L'angle horaire (ω).

3.2.1. La déclinaison (δ)

La déclinaison est l'angle entre la direction du soleil et le plan de l'équateur terrestre.

Elle change tout au long de l'année en suivant une forme de vague (sinusoïdale) :

Elle est nulle (0°) lors des équinoxes (printemps et automne).

CHAPITRE III : Modélisation d'un système PV

Elle atteint $-23,27^\circ$ au solstice d'hiver.

Elle atteint $+23,27^\circ$ au solstice d'été.

On peut calculer la déclinaison avec la formule suivante :

$$\delta = 23.45 * \sin[0.98 * (n - 81)] \quad (10)$$

n : Le nombre du jour dans l'année (par exemple, 1^{er} janvier = 1, 1^{er} février = 32, etc.).

3.2.2. L'angle horaire (ω)

L'angle horaire mesure la position du Soleil par rapport à midi solaire (moment où le Soleil est au plus haut dans le ciel).

À midi solaire, $\omega = 0^\circ$:

- Il est négatif le matin.
- Il est positif l'après-midi.
- Il change de 15° par heure.
- Il peut aller de -180° à $+180^\circ$.

On peut calculer l'angle horaire avec la formule suivante :

$$\omega = 15 * (TSV - 12)$$

Équation 1 : Angle horaire du soleil selon le temps solaire vrai (TSV).

TSV : Le temps solaire vrai (en heures).[13]

3.2.3. Coordonnées horizontales

On utilise l'horizon comme un plan de référence pour repérer la position du soleil par sa hauteur (H) et son azimuth (α)

3.2.3.1. Hauteur du Soleil (H)

La hauteur du soleil est l'angle entre la direction du soleil et sa projection sur le sol.

Elle change tout au long de la journée et selon la période de l'année.

On peut calculer la hauteur du soleil avec cette formule :

$$\sin(H) = \sin(\varphi) * \sin(\delta) + \cos(\varphi) * \cos(\delta) * \cos(\omega) \quad (12)$$

φ : latitude du lieu

δ : déclinaison du Soleil (liée à la date)

ω : angle horaire (lié à l'heure)

CHAPITRE III : Modélisation d'un système PV

3.2.3.2. Azimuth du Soleil (α)

L'azimuth du soleil est l'angle entre la projection du soleil sur le sol et la direction du Sud. Il varie de 0° à 360° , en tournant de l'ouest vers l'est.

On peut calculer l'azimuth du soleil avec cette formule : [13]

$$\sin(\alpha) = \sin(\delta) * \sin(\omega) / \cos(H) \quad (13)$$

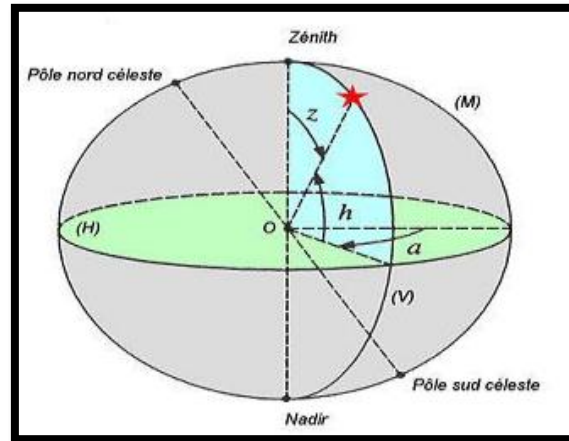


Figure 24: Coordonnées horizontales

4. Modélisation du l'onduleur :

4.1. Onduleur autonome

Un onduleur autonome est un système qui utilise des composants qu'on commande pour s'ouvrir et se fermer à des moments précis, définis par un circuit de commande externe.

Il peut fonctionner à fréquence variable et s'adapte à tout type de charge.

Cet onduleur ne peut pas fonctionner en sens inverse (il n'est pas réversible). [17]

4.2. Onduleur triphasé

Un onduleur triphasé deux niveaux, comme celui montré sur la figure 4-4, a un circuit de puissance particulier. [17]

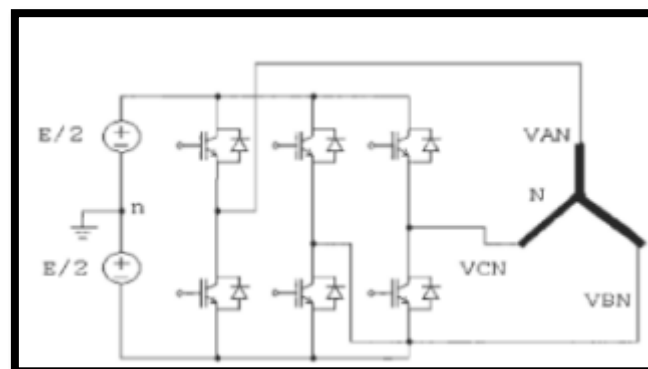


Figure 25 : le circuit de l'onduleur triphasé [17]

CHAPITRE III : Modélisation d'un système PV

Dans le circuit de l'onduleur triphasé, il faut savoir que les deux interrupteurs d'un même bras fonctionnent de façon opposée : quand l'un est fermé, l'autre est ouvert.

En se basant sur les états des interrupteurs, on peut calculer les tensions de sortie (tensions de branche) de l'onduleur, mesurées par rapport à la borne négative de la tension continue.

$$V_{AN} = S1 * V_{pv}$$

$$V_{BN} = S2 * V_{pv}$$

$$V_{CN} = S3 * V_{pv}$$

Où S1, S2 et S3 désignent les états des interrupteurs des phases A, B et C respectivement. Les tensions composées sont [35] :

$$V_{AB} = V_{AN} - V_{BN} = (S1 - S2) * V_{pv}$$

$$V_{BC} = V_{BN} - V_{CN} = (S2 - S3) * V_{pv}$$

$$V_{CA} = V_{CN} - V_{AN} = (S3 - S1) * V_{pv}$$

On peut écrire l'équation sous la forme matricielle :

$$\begin{bmatrix} V_{AB} \\ V_{BC} \\ V_{CA} \end{bmatrix} = V_{pv} * \begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} S1 \\ S2 \\ S3 \end{bmatrix}$$

$$V_{AN} = \frac{2}{3} * V_{AN} - \frac{1}{3} (V_{BN} + V_{CN})$$

$$V_{BN} = \frac{2}{3} * V_{BN} - \frac{1}{3} (V_{AN} + V_{CN})$$

$$V_{CN} = \frac{2}{3} * V_{CN} - \frac{1}{3} * (V_{AN} + V_{BN})$$

$$\begin{bmatrix} V_{AN} \\ V_{BN} \\ V_{CN} \end{bmatrix} = \frac{V_{pv}}{3} * \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \quad [17]$$

5. Modélisation de la batterie

Il existe plusieurs types de modèles pour représenter le fonctionnement des batteries au plomb, mais leur utilisation peut être compliquée car il faut prendre en compte de nombreux paramètres. Selon l'usage de la batterie et les conditions dans lesquelles elle fonctionne, son comportement peut varier. C'est pourquoi il n'existe pas un seul modèle valable dans toutes les situations.

CHAPITRE III : Modélisation d'un système PV

Pour simplifier notre étude, nous allons utiliser le modèle R-C, aussi appelé modèle simple. Ce modèle est plus facile à utiliser car il ne demande pas de faire des expériences pour identifier certains paramètres comme le font d'autres modèles plus complexes. Il permet aussi d'utiliser un simulateur avec un pas de calcul fixe, ce qui est pratique quand on travaille avec des convertisseurs à découpage.

Le modèle R-C représente la batterie avec trois éléments :

Une tension E_0 qui symbolise la tension de la batterie lorsqu'elle n'est pas utilisée (tension à vide),

Un condensateur qui représente la capacité interne de la batterie (C_{bat}),

Une résistance qui modélise la résistance interne de la batterie (R_s).

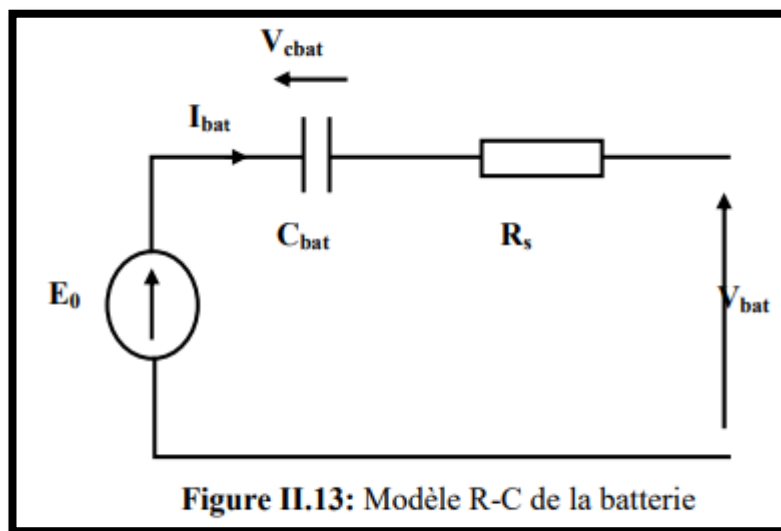


Figure 26 : Le modèle R-C d'une batterie

On a donc :

$$V_{bat} = E_0 - R_s * I_{bat} - V_{cbat} \quad (17)$$

On définit également l'état de charge (E_c) de la batterie par :

$$E_c = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (18)$$

Avec :

- C_{bat} : la capacité (Ah) nominale de la batterie.
- Q_d : la quantité de charge manquante par rapport à C_{bat}

CHAPITRE III : Modélisation d'un système PV

6. Méthodes de dimensionnement

Pour réaliser une installation photovoltaïque il faut suivre une méthode de calcul afin d'obtenir un meilleur résultat.

Le bon dimensionnement repose sur les caractéristiques techniques de chaque partie du système.

7. Outils de dimensionnement :

Python :

Python est un langage de programmation facile à comprendre, utilisé dans beaucoup de domaines.

On s'en sert souvent pour créer des sites web, analyser des données ou automatiser des tâches.

C'est un langage polyvalent, ce qui veut dire qu'on peut l'utiliser pour faire beaucoup de choses différentes avec l'informatique.

Pvlib :

La bibliothèque Pvlib pour Python est un outil open-source largement utilisé pour la modélisation, la simulation et le dimensionnement de systèmes photovoltaïques. Elle est développée de manière collaborative par une communauté internationale de chercheurs, ingénieurs et développeurs.[18]

Jupyter :

Jupyter Notebook est une application web open-source qui permet de créer et de partager des documents contenant :

- Du code exécutable (Python, R, Julia, etc.),
- Du texte explicatif en Markdown,
- Des équations mathématiques (via LaTeX),
- Des graphiques et visualisations interactives.

Utiliser pour le dimensionnement photovoltaïque [19]

Numpy :

Numpy est une bibliothèque Python très populaire qui est principalement utilisée pour effectuer des calculs mathématiques et scientifiques. Elle offre de nombreuses fonctionnalités et outils qui peuvent être utiles pour les projets de Data Science. [20]

Pandas :

Pandas est une bibliothèque open source rapide, puissant, flexible et simple d'utilisation, conçu pour l'analyse et la manipulation de données.

Il est basé sur le langage de programmation Python.

CHAPITRE III : Modélisation d'un système PV

ModelChain :

La classe ModelChain constitue une interface de haut niveau destinée à la modélisation standardisée des systèmes photovoltaïques. Elle a été conçue pour automatiser une grande partie du processus de modélisation, tout en restant suffisamment flexible et extensible pour s'adapter à différents besoins. Ce guide a pour but d'aider les utilisateurs à se familiariser avec l'utilisation de ModelChain. Une connaissance de base de la programmation orientée objet en Python est recommandée, mais la majorité des concepts présentés restent accessibles même sans une maîtrise complète des classes.[21]

Math :

Ce module donne accès aux fonctions mathématiques courantes et aux constantes standards, y compris celles définies par la norme C.[22]

Matplotlib :

C'est une bibliothèque standard de Python pour la création de graphiques statiques, animés ou interactifs en 2D. Elle est largement utilisée en science des données, en intelligence artificielle et en ingénierie pour explorer, illustrer ou communiquer visuellement des résultats quantitatifs.[23]

PV sys :

PV system est le logiciel le plus utilisé, il est créé par André Mermod en 1992 pour la simulation et le dimensionnement des systèmes PV ces fonctions son :

- Simulation énergétique. :
- Analyse de pertes.
- Dimensionnement des onduleurs et batteries.[24]

Homer pro :

Homer pro est développé par le National Renewable Energy Laboratory (NREL) des États-Unis. Il est utilisé pour la conception de systèmes hybrides (PV, diesel, batteries.....).[25]

System Advisor Model (SAM) :

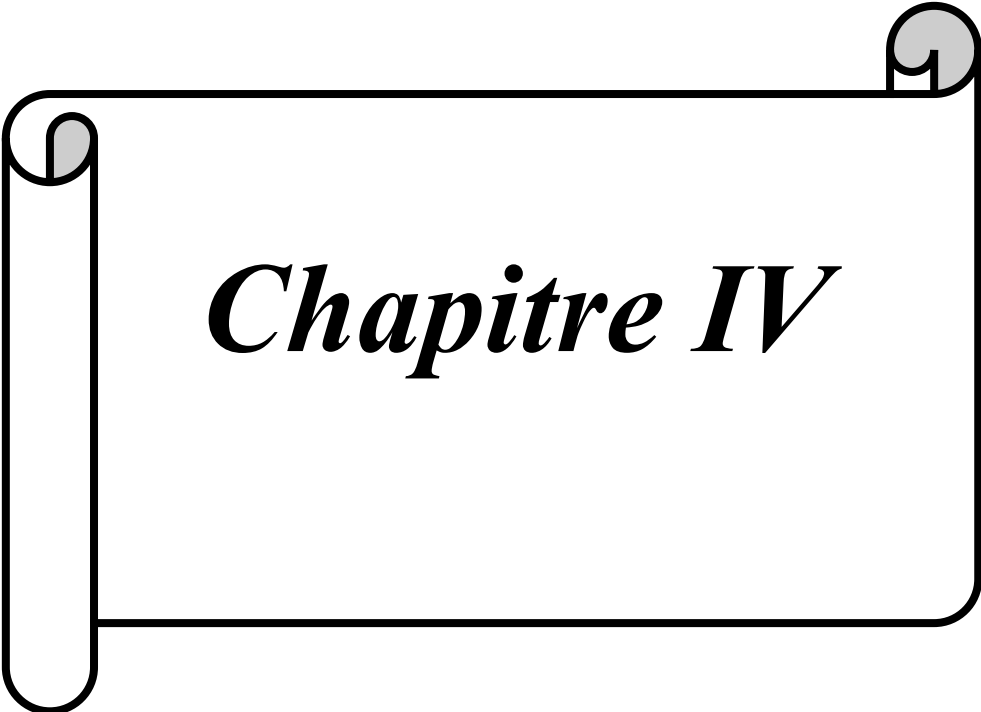
Le System Advisor Model (SAM) est un logiciel gratuit développé par le National Renewable Energy Laboratory (NREL). Il s'agit d'une application de bureau permettant de réaliser des analyses techno-économiques complètes dans le domaine des énergies renouvelables. SAM est utilisé par les ingénieurs, les chefs de projets, les analystes en politiques énergétiques, les chercheurs et les développeurs de technologies, afin d'évaluer la faisabilité technique, économique et financière de projets énergétiques.[26]

CHAPITRE III : Modélisation d'un système PV

8. Conclusion :

Le bon dimensionnement d'un système photovoltaïque est la clé pour garantir son bon fonctionnement et éviter les pertes d'énergie.

Grâce à des étapes claires et à des logiciels spécialisés, on peut créer une installation adaptée à chaque situation, en tenant compte du lieu, des besoins et des conditions climatiques



Chapitre IV

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

CHAPITRE IV: Dimensionnement du système PV

1. Introduction

Dans le cadre de notre projet, nous avons effectué un stage chez Sonelgaz, pendant lequel nous avons reçu des données utiles sur le climat et la consommation d'énergie de la région du Bordj el Haouas (en Djanet).

Ce chapitre s'appuie sur ces données avec les bases théoriques et les informations présentées dans les chapitres précédents pour effectuer un dimensionnement complet à l'aide d'outils de simulation en Python afin de simuler avec précision le comportement d'un système photovoltaïque adapté.

2. Cas d'étude

2.1.Sonelgaz



Figure 27: Le signe de Sonelgaz

Sonelgaz constitue l'opérateur historique en matière de fourniture d'énergie électrique et gazière en Algérie. Créée en 1969, l'entreprise œuvre depuis plus de cinquante ans au service des citoyens algériens, en assurant l'accès à des ressources énergétiques indispensables à la vie quotidienne.

Acteur clé du développement économique et social du pays, Sonelgaz a fortement contribué à la mise en œuvre de la politique énergétique nationale. Cette contribution s'est traduite par la réalisation de vastes programmes d'électrification rurale et d'extension du réseau de distribution publique de gaz naturel. Grâce à ces efforts, le taux de couverture en électricité a atteint 99 %, desservant près de 12 297 856 clients, tandis que le taux de pénétration du gaz s'élève à 67 %, soit environ 8 132 420 clients.

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

2.2.Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida (SKTM)



Figure 28: Le signe de SKTM

SKTM est une société par actions créée le 7 avril 2013, entièrement détenue par Sonelgaz, elle se spécialise dans la production d'électricité conventionnelle pour les réseaux isolés du Sud ainsi que dans les énergies renouvelables à l'échelle nationale.

La création de SKTM a été officialisée par un accord ministériel en date du 16 décembre 2012, et elle fait partie intégrante du SONELGAZ.

Depuis Avril 2022, SKTM a été intégré à Sonelgaz Energie Renouvelables (SER), une des filiales du groupe Sonelgaz.

2.3.Le stage effectué chez Sonelgaz

Dans le cadre de notre stage de la durée de deux mois au sein de SONELGAZ à Gué de Constantine, nous avons eu l'opportunité de visiter le département SER (Sonelgaz Énergies Renouvelables), on a obtenu des données de la consommation de la station photovoltaïque dans le site de Bordj el Haouas au Djanet.

2.4.La région de Bordj el Haouas

Bordj el Haouas est située dans la wilaya de Djanet depuis 2019 est anciennement, dans la wilaya d'Ilizi.

Le tableau suivant montre les données régionales de Bordj el Haouas :

Indicateur	Valeur
Population totale	3412 habitants
Superficie estimée	~98 500 Km ²
Densité de population	~29 hab/km ²
Activité économique	Pastoralisme nomade, commerce frontalier, Agriculture oasienne...

Figure 29 : Les données régionales de Bordj el Haouas

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

3. Chargement des données

3.1.Importation des bibliothèque PYTHON

```
"""# 2. Imports"""
from pvlib.pvsystem import retrieve_sam, PVSystem
import pvlib
import pandas as pd
from pvlib.pvsystem import PVSystem
from pvlib.modelchain import ModelChain
from pvlib.location import Location
from pvlib.temperature import TEMPERATURE_MODEL_PARAMETERS
from math import ceil
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
import matplotlib.dates as mdates
from datetime import datetime
from numpy import random
```

3.2.La consommation du Bordj El Haouas

Dans le graphe suivant, on a tracé l'évolution des charges pour l'année 2022 obtenu de Sonelgaz :

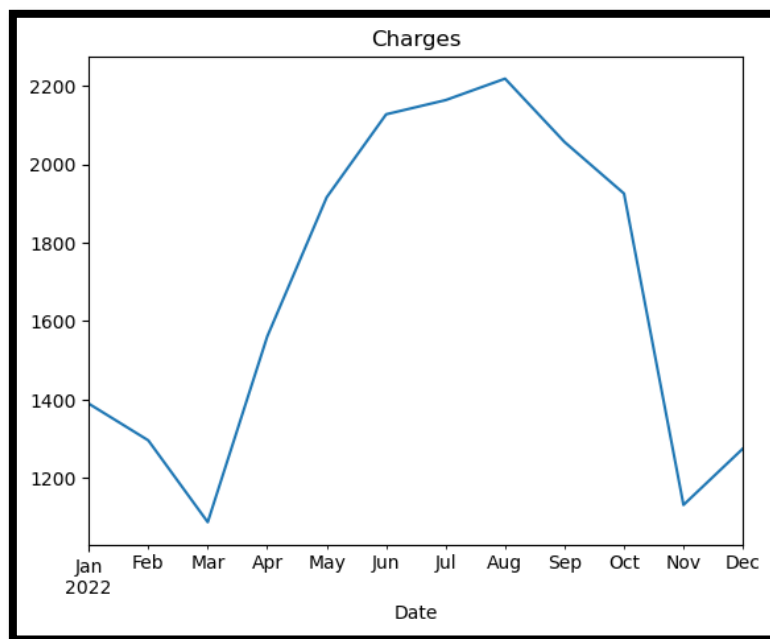


Figure 30: l'évolution des charges en Bordj El Haouas à 2022

On remarque qu'elles commencent à augmenter à partir du mois de mars, atteignent leur point le plus élevé (**le pic**) en août, puis diminuent progressivement jusqu'à la fin de l'année.

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

```
"""# 2. Charger les charges depuis le fichier Excel"""
```

```
df_charge = pd.read_excel("charges.xlsx", sheet_name="Bordj El  
Houas", nrows=288)
```

```
df_charge.set_index('Date', inplace=True)
```

3.3. Les données solaires de notre site

Ces données sont des données d'une année météorologique typique (TMY).

Les données de cette année ne sont pas d'une vraie année, mais ils sont les meilleures données depuis 30 jours.

On récupère ces données depuis le site web NSRDB.

Dans le graphe suivant, on a tracé l'évolution de la température pour une année typique :

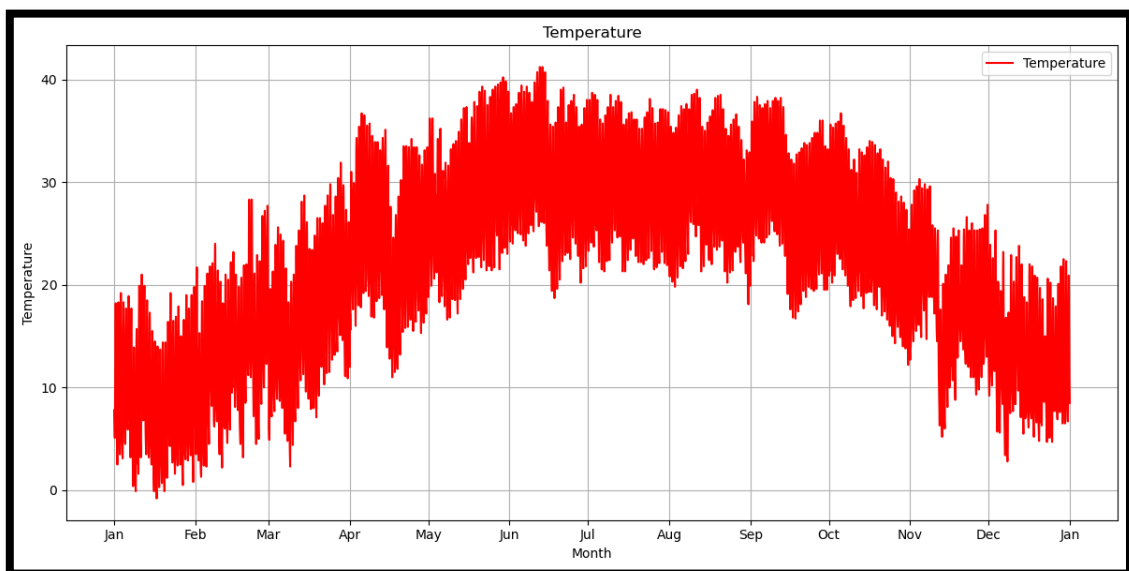


Figure 31 : l'évolution de la température en Bordj El Haouas pour une année typique

Dans le graphe suivant, on a tracé l'évolution de l'irradiance globale horizontale (GHI) dans une année typique :

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

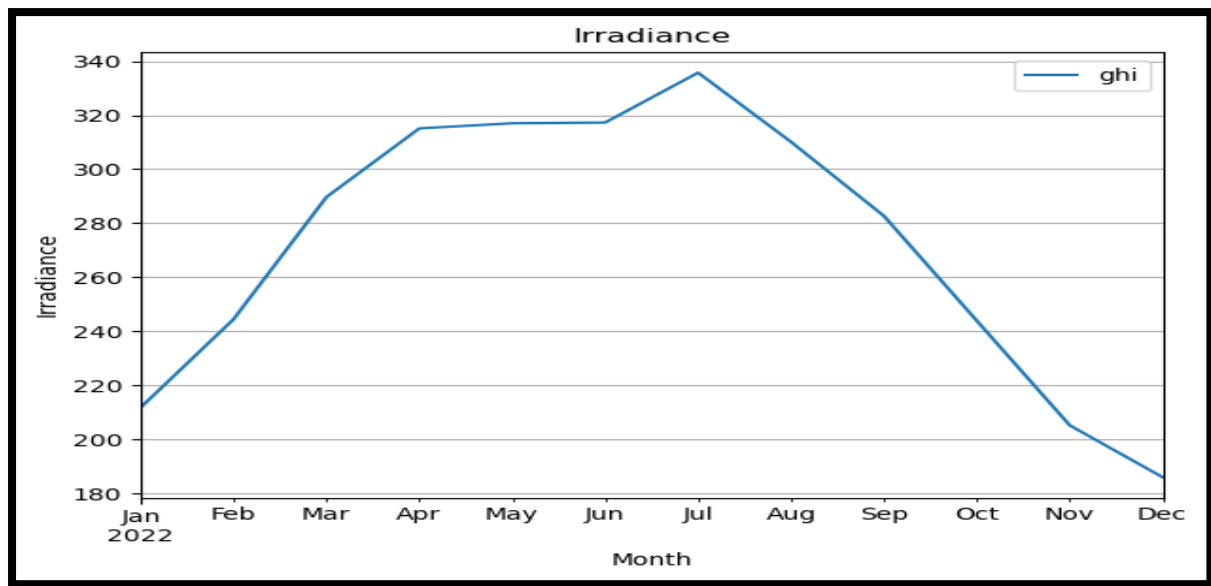


Figure 32 : l'évolution de GHI en Bordj El Haouas pour une année typique

```
"""# 3. Charger les données météo"""  
# Lecture du fichier CSV contenant les données météorologiques, en ignorant  
# les 2 premières lignes :  
  
weather = pd.read_csv("weather_data.csv", skiprows=2)  
  
weather.set_index('Date', inplace=True) # Mise en place du Dataframe
```

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

3.4. Les caractéristiques techniques des composantes du système

3.4.1. Module PV

Le panneau choisi est « Yingli_Energy_China_YL250P_29b » :

Technologie	Multi-c-Si
Type	Panneau simple face
Puissance maximale STC	250.496 W
Puissance estimée aux conditions PTC	226.2 W
Longueur du panneau	1.65 m
Largeur du panneau	0.99 m
Nombre de cellules en série	60
Courant de court-circuit à STC	8.79 A
Tension en circuit ouvert à STC	38.4 V
Courant au point de puissance maximale	8.24 A
Tension au point de puissance maximale	30.4 V
Coefficient de température Icc	0.00385 A/°C
Coefficient de température Voc	-0.129408 V/°C
Température nominale (NOCT)	44.8 °C.

```
"""# 4. Définir les paramètres des composants
## 4.1 Les panneaux
"""

# On importe les modules CEC (California Energy Commission) de la base de
données SAM fournie par pvlib :
sandia_modules = pvlib.pvsystem.retrieve_sam('cecmmod')
sandia_modules.keys()

retrieve_sam('cecmmod')    # renvoie un DataFrame pandas contenant les
caractéristiques techniques de nombreux panneaux photovoltaïques.
sandia_modules.keys()      # renvoie une liste des noms de modules (chaînes de
caractères), chacun correspondant à un modèle particulier.

# On crée une liste vide pour stocker les noms des modules qui correspondent à
notre recherche :
md_l=[]

# On parcourtant tous les noms de modules disponibles dans la base de données
:
for x in sandia_modules.keys():

    # On vérifie si le nom "yl250p_29b" est contenu dans le nom du module
actuel :
    if "yl250p_29b".lower() in x.lower():

        # Si c'est le cas, on ajoute ce nom de module à la liste :
```

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

```
md_l.append(x)

# On affiche les noms de modules trouvés :
for x in md_l:
    print(x)

# # On sélectionne le premier module trouvé dans la liste md_l :
module=sandia_modules[md_l[0]]
```

3.4.2. Onduleur

L'onduleur choisi est « Sungrow_Power_Supply_Co_Ltd_SG1000MX » qui a les caractéristiques suivantes :

PAC nominale de sortie	Paco = 1000 KW
PDC maximale que l'onduleur peut convertir	Pdco = 1033 KW
VDC à laquelle Pdco est déterminée	Vdco = 630 V
PAC consommée par l'onduleur à vide (nuit)	Pnt = 0 W
IDC maximum admissible	Idcmax = 1640 A
VDC minimale pour le suivi MPPT	Mppt_low = 570 V
VDC maximale pour le suivi MPPT	Mppt_high = 800 V

```
"""## 4.2 Onduleurs"""
# On récupère la base de données des onduleurs CEC via la fonction
retrieve_sam de pvlib :
cec_inverters = pvlib.pvsystem.retrieve_sam('cecinverter')

# On affiche toutes les clés (noms des onduleurs) présentes dans cette base de
données
cec_inverters.keys()
in_l=[]
for x in cec_inverters.keys(): # Pour chaque nom d'onduleur dans la base de
données
    # Si la chaîne "Sungrow_Power_Supply_Co_Ltd_" est contenue dans le nom:
    if "Sungrow_Power_Supply_Co_Ltd_".lower() in x.lower():
        in_l.append(x) # On ajoute ce nom à la liste in_l
for x in in_l:
    print(x)

# On sélectionne un onduleur spécifique, ici le 4ème (indice 3) dans la liste
filtrée :
inverter=cec_inverters[in_l[3]]
inverter['Pnt']=0.0
inverter['Pdco']=inverter['Paco']/0.98
inverter['Vdco']=630.0
inverter['Vdcmax']=1000.0
inverter['Idcmax']=inverter['Pdco']/inverter['Vdco']
inverter['Mppt_low']=550.0
inverter['Mppt_high']=850.0
print(inverter)
```

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

3.4.3. Batterie

La batterie choisie est « Lithium Fer Phosphate (LFP ou LiFePO4) » qui a les caractéristiques suivantes :

Capacité totale de la batterie	400 KW
État de charge initial (SOC : State of charge)	$\text{soc_initial} = 0.8 * \text{capacite_batterie_kwh} = 0.8 * 400 = 320 \text{ KW}$
Rendement de la batterie lors de la charge	0.95 %
Rendement de la batterie lors de la décharge	0.95 %
Puissance maximale que la batterie peut charger et déchargé	50% de sa capacité totale.

3.5 La localisation

La station PV de Bordj El Haouas est localisée en 24°29'24.0"N 9°27'36.0"E comme la figure suivante :



Figure 33 : La localisation du station PV de Bordj El Haouas

Dans le programme, on met les coordonnées terrestres et le fuseau horaire (tz : time zone en anglais) de Bordj el Haouas.

```
""# 5. Localisation et système PV""
```

```
latitude = 24.49
```

```
longitude = 9.46
```

```
site = Location(latitude=latitude, longitude=longitude, tz='Africa/Algiers',  
altitude=1083, name='Bordj El Houas')
```

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

4. Dimensionnement et Simulation

Dans notre projet, nous avons 3 dimensionnements différents triés par rapport les trois types de systèmes PV :

4.1.Scénario 1 : Système autonome

4.1.1. Introduction

Ce système vise à utiliser l'énergie photovoltaïque dans le jour et des batteries dans la nuit.

Il calcule le surplus du jour et le stocker dans des batteries pour remplir la production de la nuit

Le surplus du jour doit être supérieur aux charges de la nuit.

4.1.2. Organigramme

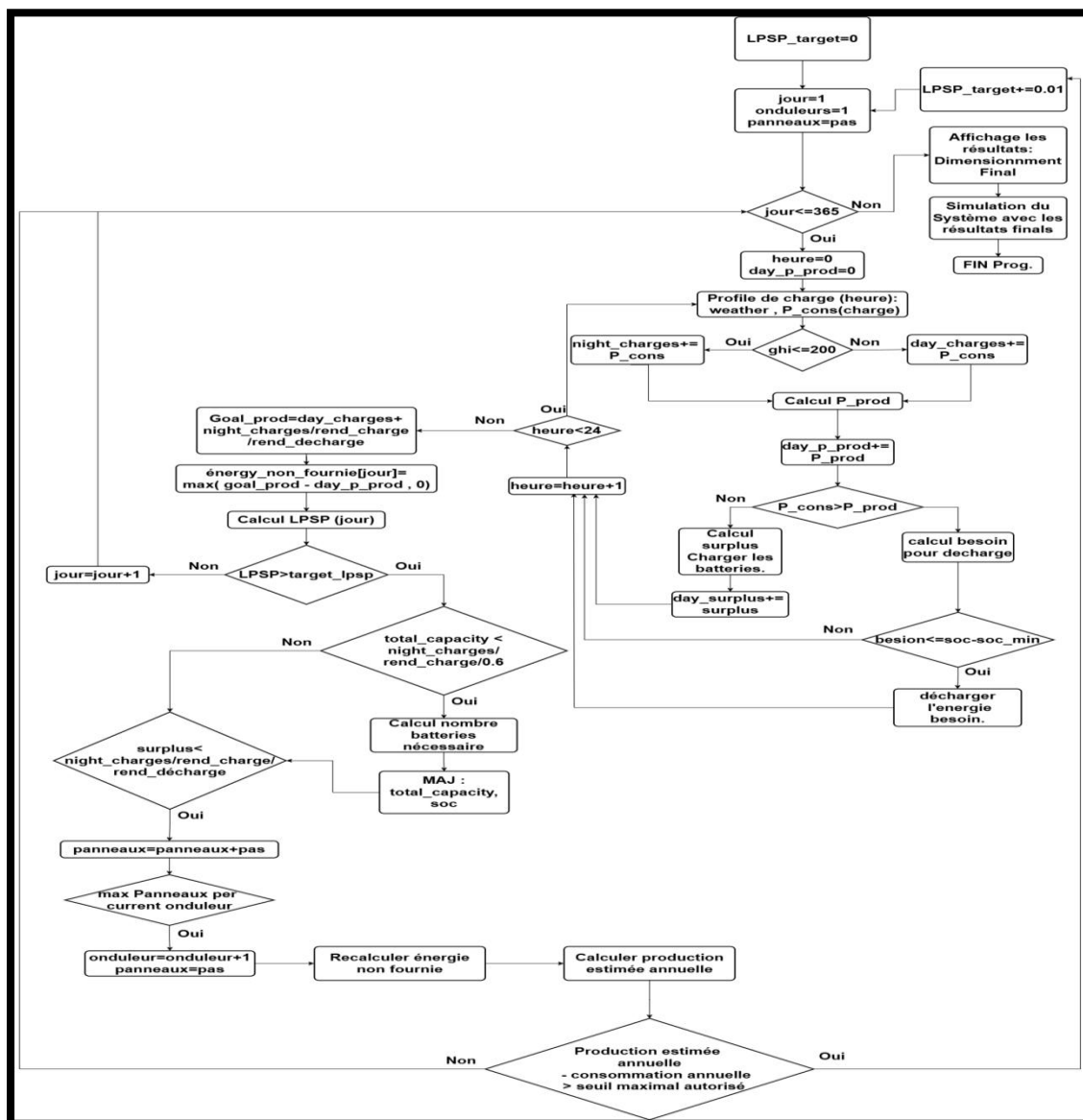


Figure 34 : Organigramme d'un système autonome

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

Le processus de dimensionnement et de simulation d'un système photovoltaïque autonome commence par l'initialisation des variables clés : `jour = 1`, `onduleurs = 1`, `panneaux = pas`.

La simulation débute au premier jour de l'année et se répète pour chaque jour (`jour ≤ 365`). À chaque journée, une boucle horaire (`heure < 24`) permet de simuler la production photovoltaïque (`P_prod`) à partir de l'irradiance (`ghi`) et de répartir la consommation électrique (`P_cons`) en charges diurnes (`day_charges`) ou nocturnes (`night_charges`). Lorsque la production dépasse la consommation, l'excédent est comptabilisé dans le `day_surplus`.

En fin de journée, on calcule la production attendue (`Goal_prod`) et l'énergie non fournie (`energy_non_fournie[jour]`), ce qui permet de déterminer la **LPSP** (`LPSP' jour`).

Si le système ne répond pas aux critères (`LPSP > target_lpsp`), on ajuste le dimensionnement en augmentant le nombre de panneaux (`panneaux = panneaux + pas`), en ajoutant des batteries si `totales_capacity` est insuffisante, ou en ajoutant un onduleur si la capacité des panneaux dépasse celle d'un seul onduleur. Après les 365 jours, les résultats sont affichés, puis une simulation finale est lancée avec la configuration optimale.

4.1.3. Programme

```
# Cible du LPSP (Loss of Power Supply Probability)
list_target = np.arange(0, 0.05, 0.01)
print(list_target)

for ipos, target_lpsp in enumerate(list_target):
    print(target_lpsp)
```

- On veut déterminer la configuration minimale qui respecte une certaine fiabilité énergétique (LPSP cible).

```
# Initialisation des paramètres du système
number_inverters = 1                # Nombre d'onduleurs
pas = 20                            # Incrément pour les strings PV
strings_per_inverter = pas          # Nombre initial de strings par
onduleur
total_capacity = 0                  # Capacité totale de la batterie
(kWh)
soc = 0                             # État de charge (State of
Charge)
```


CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

```
nb_days = 365                                # Nombre total de jours simulés
all_pcons = [3]                               # Consommation totale visée par
jour
all_energie_non_fourne = [4]                 # Énergie non fournie par jour
all_capacity = {}                             # Historique de la capacité
batterie
day = 0
```

- Initialisation des paramètres

```
while (day < nb_days):
    day_p_prod = 0                            # Énergie produite sur la journée
    full_day_charge = 0                      # Charge totale sur la journée
    day_surplus = 0                          # Surplus total sur la journée
    night_charges = 0                        # Consommation nocturne
    day_charges = 0                          # Consommation diurne
    saved_totalcapacity = total_capacity
    saved_soc = soc
    completer = False
```

- Préparation des variables temporaires

```
# Boucle sur chaque heure du jour
for hour in df_charge.index[24 * day:24 * (day + 1)]:
    all_capacity[hour] = total_capacity

    # Récupération des données de charge et de météo
    dfc = df_charge.loc[[hour]]
    dfw = df_weather.loc[[hour]]
    p_cons = dfc["charge"][hour]             # Consommation à l'heure donnée
    ghi = dfw["ghi"][hour]                   # Irradiation globale horizontale
    # Production PV totale de tous les onduleurs à cette heure
    full_inverter_p_prod = all_full_prod[hour]
    p_prod = full_inverter_p_prod * strings_per_inverter /
max_strings_per_inverter
    p_prod += full_inverter_p_prod * (number_inverters - 1)
```

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

```
# Séparation jour/nuit selon le niveau d'irradiation
if ghi <= 200:
    night_charges += p_cons
else:
    day_charges += p_cons

# Calcul des bornes de charge de la batterie
soc_min = total_capacity * 0.2
soc_max = total_capacity * 0.8
puissance_max_kw = total_capacity * 0.5 # Puissance de
charge/décharge max (1h)
day_p_prod += p_prod
```

- La production PV réelle en fonction du nombre de strings actifs et du nombre d'onduleurs.
- L'identification si une charge est diurne ou nocturne à partir du GHI.
- Les limites de fonctionnement des batteries, notamment leur état de charge (SoC) maximal et minimal.
- Le calcul de la puissance disponible ou manquante, en vue de simuler plus loin la charge ou la décharge des batteries.

```
# Si la production est inférieure à la demande → décharge batterie
if p_prod < p_cons:
    besoin = (p_cons - p_prod) / rendement_decharge
    can_decharge = min(max(soc - soc_min, 0), puissance_max_kw,
besoin)
    p_prod += can_decharge * rendement_decharge
    soc -= can_decharge
else:
    # Si surplus → charge de la batterie
    surplus = p_prod - p_cons
    day_surplus += surplus
    energie_dispo = soc_max - soc
    charge_possible = min(surplus, energie_dispo,
puissance_max_kw)
    p_prod += charge_possible
    soc += charge_possible * rendement_charge
```

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

- Simulation batterie : décharge ou charge

```
# Calcul de l'énergie cible à produire dans la journée
goal_prod = day_charges + night_charges / rendement_charge /
rendement_decharge

all_energie_non_fourne[day] = max(goal_prod - day_p_prod, 0)
all_pcons[day] = goal_prod

# Calcul du LPSP global jusqu'à présent
lpsp = np.sum(list(all_energie_non_fourne.values())) /
np.sum(list(all_pcons.values()))
```

- Calcul de l'énergie non fournie et LPSP

```
# Si le LPSP est supérieur à la cible → dimensionnement
if lpsp > target_lpsp:

    # Vérifie si la capacité batterie couvre la nuit
    if total_capacity * 0.6 < night_charges / rendement_decharge:
        capacity_besoin = night_charges / rendement_decharge / 0.6 -
total_capacity

        nb_batteries = capacity_besoin // capacite_batterie_kwh + 1
        total_capacity += capacite_batterie_kwh * nb_batteries
        puissance_max_kw += puissance_max_kw_per_batterie *
nb_batteries

        soc += soc_initial * nb_batteries

    # Vérifie si le surplus de jour est suffisant pour recharger
    if day_surplus < night_charges / rendement_charge /
rendement_decharge:

        strings_per_inverter += pas

        strings_per_inverter = min(strings_per_inverter,
max_strings_per_inverter)

        if strings_per_inverter >= max_strings_per_inverter:
            strings_per_inverter = pas

            number_inverters += 1
```

- Cette partie ajuste **la capacité des batteries** si elles sont insuffisantes pour fournir l'énergie nocturne.
- Elle augmente aussi **le nombre de strings PV ou d'onduleurs** si la production solaire est trop faible pour compenser les besoins de recharge.

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

```
# Recalcul de l'énergie non fournie avec les nouveaux paramètres
all_energie_non_fourne, _, _ = energy_deficit(number_inverters,
strings_per_inverter, total_capacity, soc, day)

# Énergie totale produite par le système PV dimensionné
energie_produite_totale = (
    strings_per_inverter / max_strings_per_inverter +
number_inverters - 1
) * np.sum(list(all_full_prod.values()))

# Si la production est largement suffisante, arrêt de la
simulation
if energie_produite_totale - goal_charges >= 1 * 1000000:
    print("      ", day, energie_produite_totale, goal_charges,
number_inverters, strings_per_inverter)

    break
```

- Cette étape vérifie que le système n'a pas été **surdimensionné inutilement** : on évite de produire bien plus que nécessaire.
- Si l'excès de production est trop élevé, on interrompt la simulation car la configuration est surévaluée.

```
else:

    # Même logique de vérification si le LPSP est acceptable
    energie_produite_totale = (
        strings_per_inverter / max_strings_per_inverter +
number_inverters - 1
    ) * np.sum(list(all_full_prod.values()))

    if energie_produite_totale - goal_charges >= 1 * 1000000:
        print("      ", day, energie_produite_totale, goal_charges,
number_inverters, strings_per_inverter)

        break

    day += 1

    completer = True

# Résultat final lorsque la boucle est complétée
if completer:
    print("      nb:", number_inverters, " st:", strings_per_inverter)

    break
```

- Cas où le LPSP est acceptable (passant au jour suivant)
- Résultats finaux (onduleurs, panneaux)

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

4.1.4. Résultats obtenus : dimensionnement du système PV autonome

Nombre des onduleurs	8
Nombre des panneaux	29360
Capacité Totale de toutes les batteries	53200 KWh
Nombre de batterie (400 KW)	133
Target_LPSP	0.03

Tableau 6: Résultats du dimensionnement (système PV autonome)

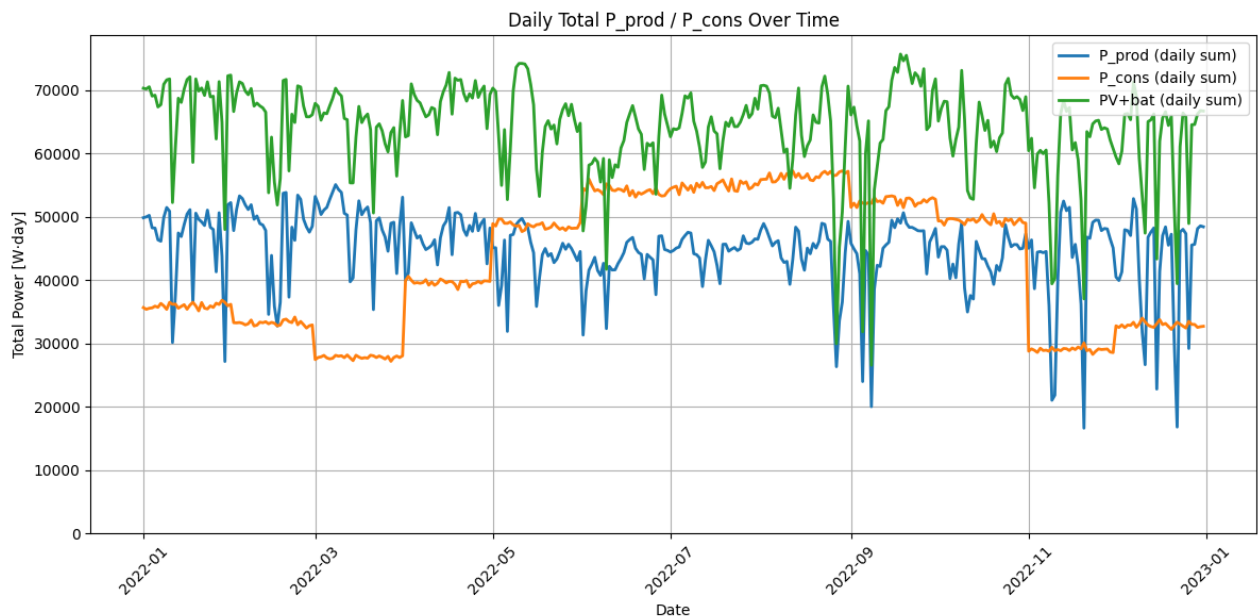
Le système photovoltaïque autonome a été dimensionné en utilisant la méthode LPSP (Loss of Power Supply Probability), calculée sur toute l'année, afin d'assurer une alimentation continue.

Les résultats du dimensionnement sont 29 360 panneaux PV, 133 batteries de 400 kWh et 8 onduleurs pour assurer un fonctionnement autonome et fiable. La valeur de LPSP est définie dans la boucle de dimensionnement.

4.1.5. Simulation du système PV sur toute l'année

PV Energie Surplus du matin	10.10 GWh
Les charges de nuits	9.4 GWh

Tableau 7 : Simulation du système PV sur toute l'année



- Les courbes montrent que la production d'énergie quotidienne (P_{prod}) varie selon les saisons, avec des baisses marquées en hiver et au début du printemps. Les rares chutes

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

brutales de production correspondent à des jours de très faible irradiation solaire. La consommation (P_{cons}) évolue par paliers, reflétant des variations saisonnières ou opérationnelles de la charge. L'énergie disponible (PV + batterie) reste constamment au-dessus de la demande, confirmant un bon dimensionnement du système avec un LPSP inférieur à 0,03.

4.2.Scénario 2 : système raccordé au réseau

4.2.1. Introduction

L'objectif de ce système est d'utiliser l'énergie photovoltaïque pendant la journée et dans la nuit ou en cas de faible irradiance, l'énergie nécessaire est importée depuis le réseau. Lorsque le système génère un surplus, il exporte cette énergie vers le réseau.

4.2.2. Organigramme

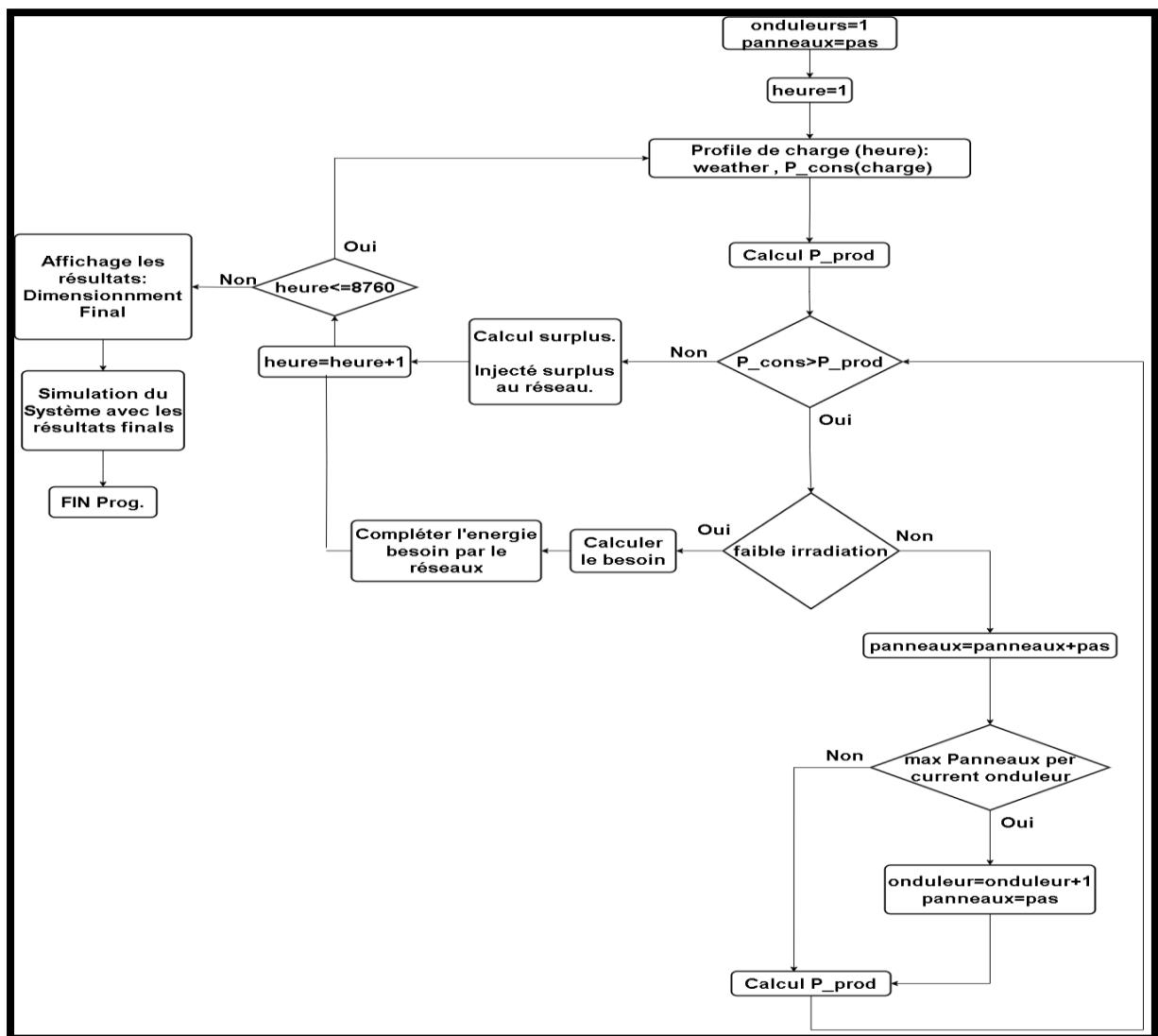


Figure 35 : Organigramme d'un système raccordé au réseau

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

▪ On simule heure par heure

Pour chaque jour, on parcourt les 24 heures et on calcule la puissance produite par le système PV (p_{prod})

Si la consommation dépasse la production ($p_{cons} > p_{prod}$) :

- Dans la nuit ou en cas de faible ensoleillement :
 - On suppose que le réseau complète la demande.
- Ensoleillement suffisant :
 - On augmente le nombre des panneaux pour produire plus d'électricité solaire.
 - Si on atteint la limite maximale des panneaux, on ajoute des onduleurs supplémentaires.

Si la production dépasse la consommation ($p_{prod} > p_{cons}$) :

- L'énergie Surplus est injecté dans le réseau.

Programme

```
# Paramètres d'entrée
pas = 51 # Pas d'augmentation de chaînes PV
number_inverters = 1
strings_per_inverter = pas
```

- Définit le nombre initial de chaînes PV et le nombre d'onduleurs, **pas** détermine combien de chaînes ajouter si la production est insuffisante.

```
for hour in df_charge.index[0:24*366]:
    # Charger les données horaires
    dfc = df_charge.loc[[hour]]
    dfw = df_weather.loc[[hour]]
    p_cons = dfc["charge"][hour]
    ghi = dfw["ghi"][hour]

    # Calcul de la puissance PV produite
    full_inverter_p_prod = all_full_prod[hour]
```

- Parcourt toutes les heures de l'année, et charge les données de consommation (dfc) et météo (dfw) correspondantes.
- Extrait la puissance consommée, l'irradiation et la puissance produite maximale par un onduleur.

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

```
p_prod = full_inverter_p_prod * strings_per_inverter /  
max_strings_per_inverter \
```

- Calcule la puissance totale produite en fonction des chaînes et du nombre d'onduleurs.

```
while p_cons > p_prod:
```

- Tant que la production est inférieure à la consommation, on cherche à l'ajuster.

```
if LowIrradianceDays(full_inverter_p_prod, hour): # pendant  
les faibles irradiances  
    besoin = p_cons - p_prod  
  
    # ajouter le complément par le réseau  
    p_prod = p_cons
```

- Si le soleil est faible, on suppose que le réseau fournit l'énergie manquante.

```
elif NightTime(hour): # pendant la nuit  
    besoin = p_cons - p_prod  
  
    # ajouter le complément par le réseau  
    p_prod = p_cons
```

- Si c'est la nuit, aucune production PV → le réseau couvre toute la demande.

```
else: # pendant la journée  
    strings_per_inverter += pas  
  
    strings_per_inverter = min(strings_per_inverter,  
max_strings_per_inverter)
```

- On augmente les chaînes PV jusqu'à la limite maximale de l'onduleur.

```
if strings_per_inverter >= max_strings_per_inverter:  
    strings_per_inverter = pas  
    number_inverters += 1
```

- Si la capacité d'un onduleur est atteinte, on en ajoute un nouvel onduleur.

```
system = PVSystem(  
    surface_tilt=latitude,  
    surface_azimuth=180,
```


CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

```
module_parameters=module,  
temperature_model_parameters=temperature_model,  
inverter_parameters=inverter,  
modules_per_string=20,  
strings_per_inverter=strings_per_inverter  
)  
  
mc = ModelChain(system, site, aoi_model='no_loss')  
mc.run_model(dfw)  
ac_values = mc.results.ac
```

- Simule un nouveau système PV avec les nouvelles chaînes pour estimer la production.

```
p_prod = ac_values.sum()/1000 +  
full_inverter_p_prod*(number_inverters - 1)
```

- Met à jour la puissance produite par l'ensemble du système (nouveau + anciens onduleurs).

4.2.3. Résultats obtenus :

* Les résultats finaux du dimensionnement sont : 3 onduleurs et 11 220 modules photovoltaïques connectés.

4.2.4. Simulation du système PV sur toute l'année

Énergie injectée au réseau	1.24 GWh
Énergie consommée par le réseau	9.13 GWh
Énergie totale produite par PV	6.05 GWh
Production totale (PV + réseau)	15.18 GWh
Charges totales	13,94 GWh

Tableau 8: Simulation du système PV sur toute l'année

- Le système PV a permis de produire 6.05 GWh, soit environ 43.41 % des besoins énergétiques annuels.
- Une part importante (1.24 GWh) a été injectée dans le réseau, ce qui reflète une capacité de production excédentaire à certains moments.
- Les charges totales ont été largement couvertes par la production mixte PV + réseau (15.18 GWh > 13,94 GWh), ce qui confirme la fiabilité du système.

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

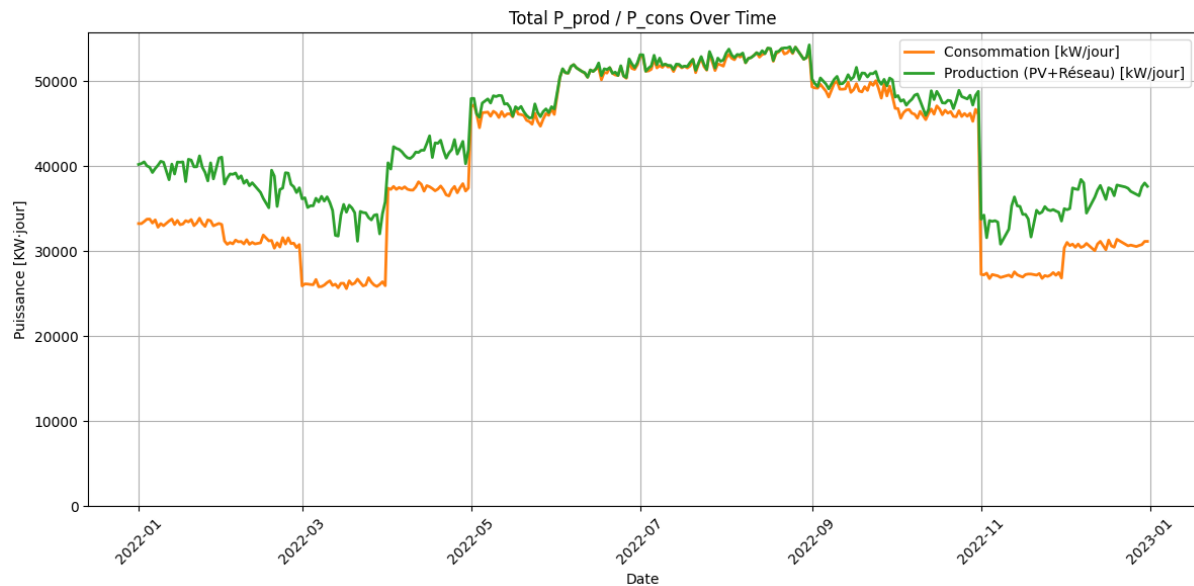


Figure 36 : La comparaison entre la production (PV+Réseau) et la consommation

La Figure ci-dessus illustre les profils journaliers de production et de consommation d'un système photovoltaïque raccordé au réseau sur une année.

Le système couvre généralement la demande énergétique, notamment durant les mois d'été à forte irradiance.

La consommation reste globalement stable, avec quelques variations liées à l'exploitation, montrant une bonne performance et intégration au réseau.

4.3.Scénario 3 : système Hybride

4.3.1. Introduction

Ce système exploite prioritairement l'énergie solaire, stocke le surplus dans les batteries, et utilise le générateur diesel en cas d'insuffisance.

Grâce à la présence du générateur diesel, un système hybride peut fonctionner avec une capacité de batteries réduite. Ainsi, le système hybride permet de limiter les investissements liés au stockage (les batteries) tout en assurant une alimentation fiable et flexible.

Dans ce système hybride, le nombre de batteries a été limité pour que le générateur diesel couvre plus les besoins en cas d'insuffisance solaire.

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

4.3.2. Organigramme

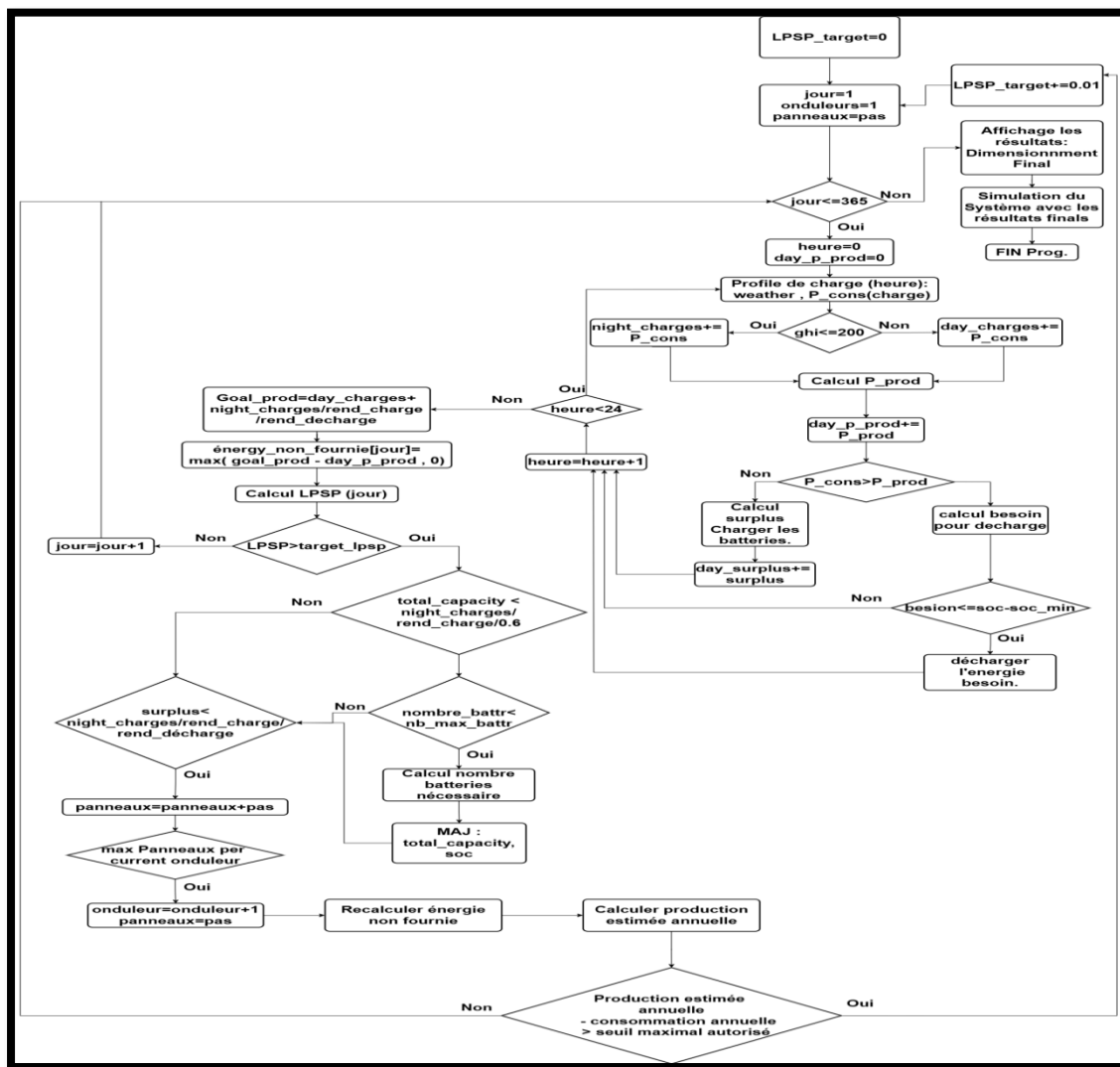


Figure 37: Organigramme d'un système hybride

Similaire au l'organigramme du système autonome sauf dans la partie où la capacité de décharge est insuffisante ($GHI < 200$) :

Si le nombre de batteries < le nombre maximal :

- On ajoute des batteries.

Sinon :

- On décharge l'énergie possible.
- Calcul du nouveau énergie besoin puis couverture de ce besoin par le générateur diesel.

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

4.3.3. Programme

Le code reste identique à celui du système autonome, à l'exception de quelques modifications appliquées uniquement lorsqu'en ajoute des batteries.

```
if total_capacity*0.6<night_charges/rendement_decharge:
    capacity_besoin=night_charges/rendement_decharge/0.6-total_capacity
    nb_batteries=capacity_besoin//capacite_batterie_kwh+1

    if nb_batteries+total_capacity/capacite_batterie_kwh>max_nb_batteries:
        nb_batteries=max_nb_batteries-total_capacity/capacite_batterie_kwh
    total_capacity+=capacite_batterie_kwh*nb_batteries
    puissance_max_kw+=puissance_max_kw_per_batterie*nb_batteries
    soc+=soc_initial*nb_batteries
```

4.3.4. Résultats obtenus : dimensionnement du système PV hybride

Nombre des onduleurs	8
Nombre des panneaux	28890
Capacité Totale	20000 KW h
Nombre de batterie (400 KW)	50 (atteint la valeur maximal)

Tableau 9: Résultats du dimensionnement (système PV hybride)

4.3.5. Simulation du système PV sur toute l'année

PV Energie produit	16.17 GWh
Tous Les charges	14.72 GWh
Energie par le générateur diesel	1.52GWh

Tableau 10: Bilan énergétique annuel du système photovoltaïque

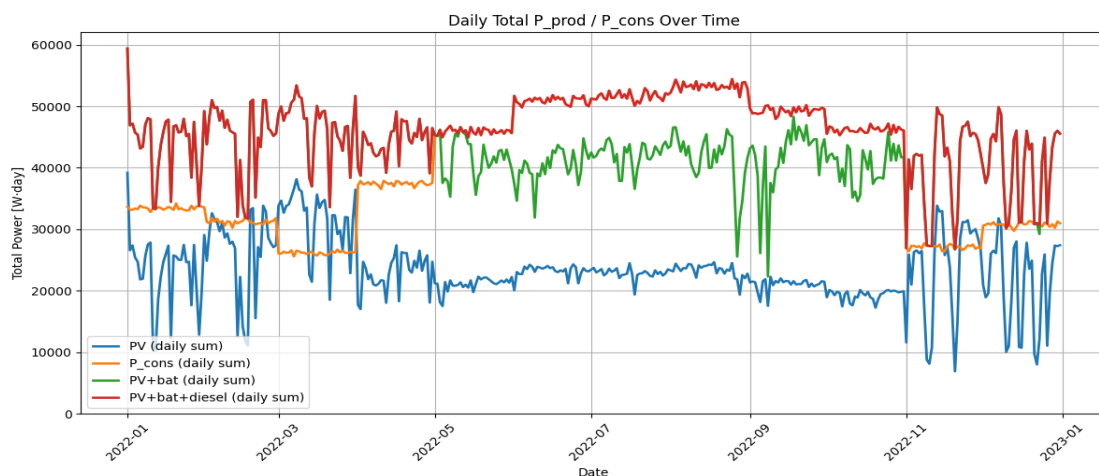


Figure 38: Bilan énergétique quotidien : PV, batterie, diesel vs consommation

CHAPITRE IV : Dimensionnement du système

La figure montre la production totale quotidienne d'énergie (PV, PV+bat, PV+bat+diesel) et la consommation (P_{cons}). La production photovoltaïque (bleu) varie fortement selon les saisons, avec un maximum en été et un minimum en hiver. L'ajout de la batterie (vert) améliore la fiabilité du système, tandis que le diesel (rouge) assure une alimentation constante. L'intégration hybride permet ainsi de couvrir efficacement la demande en toutes saisons.

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé le dimensionnement d'un système photovoltaïque pour la région de Bordj El Haouas. Trois scénarios ont été étudiés : autonome, raccordé au réseau et hybride. Après analyse des besoins énergétiques et des conditions climatiques, les simulations ont permis de déterminer les configurations optimales pour chaque cas. Les résultats montrent que le système raccordé au réseau est le plus avantageux techniquement pour la région ciblée. Toutefois, le système hybride reste une alternative fiable pour les zones où l'accès au réseau est limité. Ce travail confirme l'importance d'un bon dimensionnement pour garantir à la fois la fiabilité, la rentabilité et l'adaptation aux besoins locaux.

Conclusion Générale

Au terme de ce travail, nous avons pu démontrer la pertinence et la faisabilité de l'intégration de systèmes photovoltaïques dans des régions à fort ensoleillement comme Bordj El Haouas. L'étude réalisée a permis de mettre en lumière les avantages techniques, et environnementaux de l'énergie solaire, en particulier lorsqu'elle est utilisée dans un cadre rationnel et bien dimensionné.

À travers l'analyse des données de consommation énergétique et des conditions climatiques locales, nous avons évalué plusieurs scénarios de fonctionnement, allant du système autonome au système hybride, pour enfin privilégier la configuration raccordée au réseau. Ce choix s'est imposé par sa capacité à garantir une alimentation continue, tout en assurant la stabilité et la flexibilité du système en cas de fluctuation de l'irradiation solaire.

Le dimensionnement précis des composantes du système a permis de répondre de manière efficace aux besoins énergétiques identifiés. Le système proposé est capable non seulement de couvrir les charges locales mais également d'injecter un surplus d'énergie dans le réseau en période de forte production, contribuant ainsi à une meilleure gestion de l'énergie à l'échelle régionale.

Ce travail s'inscrit dans une démarche globale de valorisation du potentiel solaire de l'Algérie, en cohérence avec les stratégies nationales visant à diversifier le mix énergétique, à renforcer la sécurité énergétique et à réduire les impacts environnementaux. Il constitue également une base pour des projets similaires dans d'autres zones du pays et peut servir de référence pour les initiatives futures en matière d'énergie renouvelable.

En conclusion, l'essor du photovoltaïque en Algérie représente une opportunité réelle, à condition de l'accompagner par des études rigoureuses, un encadrement technique adapté et une volonté politique claire pour soutenir les investissements dans ce domaine stratégique.

Bibliographie

- [1] Helali, K., Modelisation d'une cellule photovoltaïque: etude comparative, 2012, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou,
<https://www.ummto.dz/dspace/bitstream/ummto/607/1/Helali%20Kamelia.pdf>
- [2] *Modèle d'une cellule photovoltaïque*. Available from:
<https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/renouvelables/essentiel-sur-cellules-photovoltaïques.aspx>.
- [3] Ikram, T., Simulation numérique d'une cellule solaire Tandem (4T) Pérovskite/Si, 2021 - 2022, http://archives.univ-biskra.dz/bitstream/123456789/22337/1/Troudi_Ikram.pdf
- [4] Solartap. *Modèle d'un cellule Mono-Cristalline*. Available from:
<https://www.solartap.com/blogs/solar-101/monocrystalline-vs-polycrystalline>.
- [5] futura-sciences. *La cellule à base de tellure de Cadmium (CdTe)*. Available from:
<https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaïques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/10/>.
- [6] futura-sciences. *La cellule à base de Cuivre indium sélénium (CIS) / Cuivre indium Gallium sélénium (CIGS)*. Available from: <https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/developpement-durable-cellules-photovoltaïques-coeur-panneaux-solaires-1688/page/11/>.
- [7] ISLAM, B.N.E. and A. SALIM, Energie photovoltaïque, 2023 / 2024, UNIVERSITY BADJI MOKHTAR - ANNABA, <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2024/11/memoire-Lenergie-Photovoltaïque024-1.pdf>
- [8] *La batterie au plomb-acide*
Available from: <https://www.musitel.shop/0158/fr/252/Batterie-Plomb-Acide-12V-1.3Ah>.
- [9] *La batterie au Cadmium - Nickel*. Available from:
<https://www.huntkeyenergystorage.com/fr/ni-cd-battery/>.
- [10] *La batterie au Nickel – Zinc*. Available from: <https://lygte-info.dk/review/batteries2012/NiZn%20AA%202800mWh%20%28Green%29%20UK.html>.
- [11] *La batterie au Lithium*. Available from: <https://www.solaris-store.com/8109-lifepo4-battery-128v180ah-smart-victron-vi-bat512118610.html>.

- [12] Franklin, E., Types of Solar Photovoltaic Systems, 2017, College of Agriculture, University of Arizona (Tucson, AZ),
<https://repository.arizona.edu/bitstream/handle/10150/670063/AZ1742-2018.pdf?sequence=1>
- [13] Hocine, S., Contribution à la réalisation d'une centrale photovoltaïque de 300MW à «El-Foulia», Wilaya d'El-Oued, 2023, Université de BLIDA 1, <https://di.univ-blida.dz/xmlui/bitstream/handle/123456789/26289/HMemoire%20FINALE%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [14] *Bilan Énergétique National 2023*. 2023; Available from:
<https://www.energy.gov.dz/?article=bilan-energetique-national-du-secteur>.
- [15] *Vision 2035 2050 d'efficacité énergétique 2023*; Available from:
<https://www.energy.gov.dz/>.
- [16] Slama, F., Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique, 2018, http://dspace.univ-setif.dz:8888/jspui/bitstream/123456789/2105/1/M%C3%A9moire_SF_Final_24_06_2012.pdf
- [17] ABD ESSATAR, S.M. *Étude d'un système d'irrigation alimenté par générateur PV avec stockage de l'énergie*. 2023/2024; Available from: <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2024/11/memoire-fin-detude-2024-1.pdf>.
- [18] Anderson, K.S., et al., *pvlb python: 2023 project update*, Journal of Open Source Software, 2023. **8**(92): p. 5994, <https://joss.theoj.org/papers/10.21105/joss.05994.pdf>.
- [19] *Jupyter*. Available from: <https://jupyter.org/>.
- [20] *Numpy*. Available from: <https://datascientest.com/numpy>.
- [21] *ModelChain*. Available from: https://pvlb-python.readthedocs.io/en/stable/user_guide/modelchain.html.
- [22] *math-bibliothèque*. Available from: <https://docs.python.org/3/library/math.html>.
- [23] Varoquaux, G., *Python comme langage scientifique*, Linux Magazine France, 2009. **40**, <https://inria.hal.science/hal-00776672/file/article.pdf>.
- [24] Mermoud, A. and T. Lejeune. *Performance assessment of a simulation model for PV modules of any available technology*. in *25th European photovoltaic solar energy conference*. 2010..
- [25] *Homer*. Available from: <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html>.
- [26] *SAM*. Available from: <https://sam.nrel.gov/>.