

PEOPLES DEMOCRATIC REPUBLIC OF ALGERIA
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH
UNIVERSITY OF MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTY OF SCIENCES
DEPARTMENT OF PHYSICS
N° : PH/ENR/23/2024



FIELD: MATERIAL SCIENCES
DEPARTEMENT OF: PHYSICS
OPTION: PHYSICS OF ENERGY
AND RENEWABLE ENERGIES

Thesis submitted to the department of physics in partial fulfillment of
The requirements for the master degree

Submitted by:

MOUSSA KODO Boubacar

Entitled

**Comparative study of the exploitation of photovoltaic solar energy
in some African regions**

Defended on 10/06/2024 in front of a jury composed of:

Dr. TAALOUB Djedid	University Mohamed Boudiaf- M'sila	Chairman
Dr. SALMI Mohamed	University Mohamed Boudiaf- M'sila	Supervisor
Dr. KHERIFI Djelel	University Mohamed Boudiaf- M'sila	Examinator
Dr. BRIK Youcef	Incubator of the University of M'sila	Examinator
ALI SAOUCHA Salim	1SE Se (Socio-economic)	Examinator

Academic Year: 2023/2024

Remerciements

Au terme de ce travail, nous tenons à exprimer notre gratitude et notre reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de cette thèse, en premier lieu, mon directeur de thèse : le Dr MAHAMED SALMI pour son aide, sa disponibilité, son suivi permanent et ses nombreux conseillers qui m'ont permis de mener à bien ce travail.

Je tiens également à remercier les membres du jury : DR. TAALOUB Djedid et DR. KHERIFI Djelal, pour avoir accepté d'être examinateurs de mon travail.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à tout le personnel du Département de physique, de la Faculté des sciences et de tous les professeurs qui nous ont suivis pendant nos études.



Je dédie ce modeste travail.

A ALLAH LE TOUT MISÉRICORDIEUX, LE TRÈS MISÉRICORDIEUX

Aux deux personnes qui me sont très chères, mon père et ma mère : M. Kodo N'golo Moussa, Mme Zouera Adamou (Idrissa) vous qui m'avez élevé et éduqué... Vous qui avez toujours été là pour moi et qui n'avez jamais cessé de croire en moi, aucun mot ni aucune langue ne pourraient exprimer ma profonde gratitude envers vous.

À toute la famille Moussa Kodo, à mes grands-parents, à mes frères aînés et à ma grande sœur : Maman Sani alias Mohamadou, Garba alias samedi, Yacouba, Abdoul Aziz, Abourahmane, Fati alias Fatilé, à mes petits frères et à ma petite sœur, Hamidou, Adamou alias papa, Mariama alias Gambi, à mes nièces et nouvelles et aux États nigérien et algérien.

À tous mes amis

**À tous ceux qui ont veillé sur mon éducation
À tous ceux que j'aime et qui m'aiment
Avec l'expression de tous mes sentiments et de mon respect,**

Que Dieu accepte notre travail.

Sommaire

Remerciements	2
Introduction générale	10
Introduction générale	1
Chapitre I	3
Energie solaire	3
I-1 Historique de l'énergie solaire.....	4
I-2 Imaginaire solaire au cours du XIX ^e siècle.....	4
I-2.1 Solaire thermique	4
I-2.2 Dans l'Antiquité.....	4
I-2.3 Au XIX ^e siècle	5
I-3 Énergie solaire électrique	6
I-3.1 Premières utilisations sur terre	8
I-3.4 GISEMENT SOLAIRE	9
I-4.2) Soleil	10
I-4.3 Constante solaire	11
I-4.4 Irradiation solaire au monde.....	11
I-4.5 Irradiation solaire en Afrique	12
I-4.6 Potentiel solaire en Afrique.....	12
I-4.8 Statistiques.....	13
Chapitre II	16
La Conversion Photovoltaïque.....	16
II-1 Spectre solaire : Qu'est-ce que la lumière ?	17
II-2.1 Principe de la conversion Photoélectrique	18
II-3 Définition	20
II-3.1 Effet de la photoconductivité	21
II-3.2 Principe de fonctionnement	21
II-3.3 Cellule photovoltaïque	22
II-3.4 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	22
II-4 Matériaux semi-conducteurs et Etat de l'art en technologies photovoltaïque	24
II-4.1 silicium	24
II-4.2 Première génération	25
II-4.3 Silicium monocristallin.....	25
II-4.4 Méthode Czochralski	25
II-4.5 Méthode de la zone fondue flottante ou fusion de zone	25
II-5 Principe de la technique	26

II-5.1 Silicium polycristallin (Multicristallin)	27
II-5.2 Deuxième génération : filière couches mince	27
II-5.3 Silicium nanocristallin et amorphe	27
II-5.4 Description	28
II-5.5 Propriétés	28
II-5.6 amorphe hydrogéné	28
II-5.7 Silicium en ruban (ribbon) autosupporté	29
II-5.8 Cellules à base de tellure de cadmium CdTe.....	30
II-5.9 Matériaux à base de sélénure de cuivre indium gallium	30
II-5.10 Troisième génération	30
II-6.1 Cellules multifonctions	31
II-6.2 Cellules nanocristallines à colorant ou cellules de Grätzel	31
II-6.3 Cellules organiques.....	31
II-6.4 Puissance et caractéristique d'une cellule PV	33
II-6.5 Facteur de forme	33
II-6.6 Rendement de la conversion d'énergie.....	33
II-7 Module photovoltaïque	34
II-7.1 Assemblage du module photovoltaïque	34
II-7.2 Connexion des cellules photovoltaïques	34
II-7.3 interconnexion	34
II-7.4 Encapsulage	35
II-7.5 Encadrement	35
II-7.6 Ajout d'un boîtier de jonction au dos du panneau solaire	36
Chapitre 3	37
Évaluation de l'énergie solaire en Afrique	37
III-1 Approche de base du PV _{SYST}	41
III-1.1 Logiciel PV _{SYST}	41
III-1.2 Premier contact avec Pvsyst	41
III-1.2 Très peu de systèmes autonomes (SSR : Systèmes solaires résidentiels) :	42
III-2 Systèmes de moyenne puissance (résidentiel, relais de communication)	42
III-2.1 Procédure pour les systèmes autonomes	44
III-2.2 Première étape :	44
III-2.3 Deuxième étape	44
III-2.4 Troisième étape :	44
III-2.5 Quatrième étape :	44
III-2.6 Cinquième étape :	44
III-3 Définir l'orientation	45

III-3.1 Définition de base des besoins de l'utilisateur	46
III-3.2 Définir le système	48
III-3.3 Autonomie requise en nombre de jour(s) :	49
III-3.4 Tension de la batterie (utilisateur) :	49
III-3.5 Outil d'aide au prédimensionnement :	50
III-3.6 Contrôleur universel	50
III-3.7 principaux paramètres à adapter sont :	51
III-3.8 Exécution de la première simulation	51
III-4 Application aux quelques régions Africaines	52
III-4.2 Résultats de simulation	53
III-4.3 Rapport de simulation	53
Niamey (Niger)	54
III-4.4 Energie solaire photovoltaïque dans quelques régions Africaines	55
Chapitre IV:ANNEXE STAGE	57
Stage pratique sur DES systèmes photovoltaïques	57
IV-1 Introduction	58
IV-2 Déroulement du stage	58
IV-2.1 Dimensionnement d'une installation photovoltaïque	58
IV-2.2 Estimation de la consommation d'Energie	58
IV-2.3 Calcule de la consommation d'énergie	58
IV-2.4 détermination de l'ensoleillement de la cité	58
IV-2.5 Diode by-pass	59
IV-2.6 Données météorologiques	59
IV-2.7 Dimensionnement du générateur champ PV	60
IV-2.8 Tension de fonctionnement	60
IV-2.9 calcule de module du champ nécessaire	60
IV-2.10 Nombre de module en série	60
IV-2.11 Nombre de module en parallèle	60
IV-3 Dimensionnement des équipements	61
IV-3.1 Dimensionnement du régulateur de charge	61
IV-3.2 Contrôleurs de charger ou régulateurs	61
IV-3.3 Description	61
IV-3.4 Fonctionnement	61
IV-3.6 Dimensionnement de l'onduleur	62
IV-4 Type de câble solaire	63
IV-4.1 Longueur des câbles photovoltaïques	63
IV-4.2 Section du câble solaire	63

IV-4.3 Connecteurs	63
IV-5 Dimensionnement du parc de batteries	64
IV-5.1 Nombre de batterie en série	64
IV-5.2 Nombre de batterie en parallèle.....	65
IV-6.1 Pompage solaire immergé.....	66
IV-6.2 Système de 12 volts.....	66
IV-6.3 Système de 24 volts.....	67
Conclusion générale	69
Conclusion générale.....	69
Bibliographiques	71

Liste des figures

Figure I-1 : Four solaire d'Odeillo, le plus grand au monde

Figure I-2 : Évolution des rendements records des cellules photovoltaïques de 1976 à 2016

Figure I-3: Soleil

Figure I-4: Variation de la constante solaire

Figure I-5 : Atlas solaire du monde

Figure I-6 : global irradiation du continent africaine

Figure II-1 : Effet photoélectrique

Figure II-2 : Schéma du principe de l'effet photovoltaïque dans une photopile

Figure II-3: La cellule photovoltaïque

Figure II-4: méthode de cz

Figure II-5: technique de la fusion de zone

Figure II-6: Silicium monocristalline

Figure II-7: Silicium polycristalline

Figure II-8:Silicium amorphe

Figure II-9: Procédés de production du silicium en ruban.

Figure II-10: vue schématique de la composition de la cellule à multi-jonction

Figure II-11:Cellule organique

Figure II-12: Puissance maximum d'une cellule PV

Figure II-13:Techniques de soudure des cellules solaires

Figure II-14: Structure de l'encapsulation

Figure II-15: Encadrement du module

Figure II-16: Boitier de jonction

Figure II-17: Module ou panneau solaire photovoltaïque

Figure III-1: systèmes (50 à 200 Wc)

Figure III-2 : systèmes 200 Wp et 2 kWp

Figure III-3: systèmes (à 2KWc à PLUS)

Figure III-4 : Interface de sélection de projet

Figure III-5: Interface d'orientation

Figure III-6: Interface de calcule de puissance

Figure III-7 : Interface de temps de fonctionnement

Figure III-8 : Interface de définition du système panneaux et batteries

Figure III-9 : interprétation de simulations

Figure III-10: variation mensuelle de l'irradiation

Figure III-11: Energie solaire photovoltaïque

Figure IV-1: Contrôleur de charge

Figure IV-2 : Onduleurs

Figure IV-3: Câble solaire

Figure IV-4: batterie solaire

Figure IV 6 : Pompe solaire et boitier de contrôle

Figure IV 6: Panneaux solaire polycristalline de 250 WC

Figure IV 7: Contrôleur MPPT de 12-24V

Figure IV 8 : un multimètre basique

Figure IV 9: Batterie de 12 volts

Figure IV 10: kit solaire pour une l'installation autonome de 12 volts

Figure IV 11: Système de 24 volts

Liste des tableaux

Tableau II-1 **Différentes technologies photovoltaïques**

Tableau III-1 indiquer les coordonnées géographiques

Tableau IV-1 les angles

Tableau IV-2 la tension du champ en fonction de la puissance crété

Liste des symboles

I_{ph}: Photo courant, ou courant généré par l'éclairement, Courant du générateur photovoltaïque (A)

I_D : Courant circulant dans la diode(A).

I_o: Courant de saturation inverse de la diode(A).

I_p: courant traversant R_p (A).

I_s: courant de saturation il dépend de la température de la jonction, courant du générateur photovoltaïque (A)

V : Tension du générateur photovoltaïque (V).

R_s : Résistance série (Ω).

R_p : Résistance parallèle (Shunt) (Ω)

T : température effective de la cellule en Kelvin (K) K :

Constante de Boltzmann ($k=1.381 \times 10^{-23}$ J/K). q :

Charge de l'électron ($q = 1.602 \times 10^{-19}$ C). n :

coefficients d'idéalité de la jonction PN .

V_t = kt/q : potentiel thermique.

E : Eclairement solaire en (1 kW /M²) cc:

Courant de Court- Circuit

I_{op} : Courant optimal du générateur photovoltaïque (A)

V_{op} : Tension optimal du générateur photovoltaïque (V)

V_{oc} : Tension du circuit ouvert du générateur photovoltaïque (V) .

I_{cc} : Intensité de court –circuit. A

V_{oc} : Tension de circuit ouvert.

I_{m p}: Le courant maximal sous conditions standards (A).

V_{m p}: La tension maximale du module sous conditions standards (V).

MPP : maximum power point W

MPPT : Poursuite du Point de Puissance Maximale, 'Maximum Power Point Tracking'

P_{opt} : La puissance maximale utile W

P_{max}: Puissance maximale aux bornes de la cellule PV.W

P_m: La puissance maximale produite PV (W) F :
facteur de forme.

S : la surface du module (m²).

μ : Rendement énergétique.

GPV : Générateur Photovoltaïque

PV GIS : (Photovoltaïque Géographia Information Sy stem)

DC/DC : Hacheur Courant Continu-Courant Continu

DC/AC : Hacheur Courant Continu- Courant Alternatif .

GlobHor (Rayonnement global horizontal): une combinaison du rayonnement diffuse global et du rayonnement direct global pour une surface horizontale.

GlobEff (Le rayonnement effectif sur les collecteurs): le rayonnement restant après les pertes détaillées précédemment, multiplié par la surface PV.

Introduction générale

Introduction générale

Le monde actuel et confronté à une crise majeure basé sur le changement climatique, ce changement climatique provient d'une longue série d'utilisation des énergies fossiles.

En effet l'exploitations énergétiques basé sur les énergies fossiles, limités et non renouvelables, sont les principaux sources des gaz à effet de serre.

Les gaz à effet de serre, ou GES, sont des gaz qui absorbent une partie des rayons solaires en les redistribuant sous la forme de radiations au sein de l'atmosphère terrestre.

L'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère se traduit par une hausse de sa température, cette hausse de température entraîne un dérèglement climatique.

Par conséquent, l'effet de serre dans l'atmosphère est renforcé et modifie le climat de notre planète, entraînant des changements dramatiques dans les tendances (chutes de neige et précipitations), une augmentation des températures moyennes et des événements climatiques extrêmes tels que des vagues de chaleur, des inondations et la sécheresse.

Les causes d'un tel changement ce traduit par l'activité humaine, qui utilise les énergies fossiles pour se fournir en énergie afin d'alimenté sa vie.

Les quatre principaux émetteurs (Chine, Etats-Unis, Inde et UE27) contribuent à plus de 55 % des émissions directes totales, selon la base de données européennes EDGAR. En 2020, l'ensemble des pays du G20 représentaient 75 % des émissions mondiales.

Au regard de tout ce qui suit des efforts sont mises en œuvre pour réduire l'utilisation des énergies fossiles et de passé aux énergies vert et renouvelable.

En capacité d'énergie renouvelable le monde possède une quantité énorme d'énergie géothermique, hydraulique, éolienne et reçoit une énergie solaire gigantesque (lumineuse et thermique) estimé plus de 342 W /m² soit une puissance de $1,17 \times 10^{17}$ W en 24 heure.

L'énergie solaire photovoltaïque (ou énergie photovoltaïque ou EPV) est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire grâce à des capteurs ou à des centrales solaires photovoltaïques. C'est une énergie renouvelable, car le Soleil est considéré comme une source inépuisable à l'échelle du temps humain.

L'Afrique est le continent qui possède la plupart des ressources naturelles du fait de sa position géographique, elle est comprise pour l'essentiel dans la zone tropicale, et se partage entre zones à climats chauds et secs sous les tropiques, et zones à climats chauds et humides sous l'équateur.

Notons que les systèmes d'exploitation des énergies renouvelables, se base essentiellement sur trois concepts, le concept de l'exploitation de l'énergie thermique du soleil, le concept de l'exploitation de l'intensité lumineuse du soleil et le concept d'exploitation de l'énergie hydraulique.

L'Afrique et dans ces deux premiers concept le lieu idéal pour installer des systèmes d'exploitation des énergies renouvelables savoir celle de la thermique et de la lumière.

En termes de rayonnement solaire l'Afrique est le continent le plus exposé aux radiations solaires, elle représente un lieu essentiel pour l'exploitation de cette ressource.

Ainsi le sujet du mémoire se basera sur le concept de comparaison de l'exploitation de l'énergie solaire à travers les panneaux solaires photovoltaïques dans quelques régions africaines, nous allons ici démontrer de manière théorique à détailler les différentes étapes qui constituent le concept même qui est à l'œuvre de la transformation de la lumière du soleil en électricité et donné la partie pratique du concept.

Ce pourquoi, la première partie du chapitre de cette mémoire est consacré sur l'historique, le gisement solaire, et la seconde partie sur l'énergie solaire au monde, sa disponibilité, l'influence de l'atmosphère sur cette dernière, le potentiel de l'énergie solaire au monde, et le potentiel de l'énergie solaire dans quelques régions africaines.

Le second chapitre qui est intitulé conversion photovoltaïque, qui donnera une connaissance plus élargie sur les phénomènes qui sont à l'origine de la conversion de la lumière du soleil en énergie électriques, les technologies photovoltaïques utilisés, plus précisément les technologies de fabrications, les types des cellules cristallines (mono, poly et amorphe).

Le chapitre trois qui porte sur l'exploitation de l'énergie solaire en Afrique sera appuyé par le logiciel de simulation le PVSYST, elle permet notamment d'évaluer l'énergie solaire captée, faire le choix des sites. Suivie d'une présentation des différents types de champs photovoltaïques, résultats des calculs, tableaux et figures, l'influences d'inclinaison du plan, l'azumit, les pertes, facteur de transposition, etc.

Le quatrième chapitre est porté sur le dimensionnement d'un système PV appuyé par les données récolter au cours du stage pratique qui sera effectué au laboratoire de physique énergétiques de l'université de M'sila. Qui met en œuvre les systèmes autonomes, les batteries, régulateurs, onduleurs, charges, décharges, câbles de raccordement.

Il est crucial de bien comprendre le comportement des modules photovoltaïques en fonction de leurs conditions d'installation afin d'assurer la fiabilité de l'installation des nouvelles centrales et de prévoir les résultats futurs pour faciliter leur intégration dans le réseau ou leurs autonomisations. En réalité, les installations et les informations disponibles concernant les systèmes photovoltaïques fonctionnant dans des situations ombragées ou des situations de fonctionnement incompatible qui sont parfois inévitables.

Chapitre I

Energie solaire

I-1 Historique de l'énergie solaire

L'énergie solaire est propre et renouvelable. La Terre reçoit sous forme de lumière du Soleil plus de 10 000 fois l'énergie que l'humanité consomme. En effet, la surface du globe reçoit annuellement de l'énergie solaire ayant une puissance allant de 85 à 290 W/m²[1]. Et cette énergie est inépuisable car elle est entretenue par les réactions nucléaires qui ont lieu dans le soleil. Bien que la ressource ait toujours existé, son utilisation est assez récente dans l'histoire de l'humanité. On voit apparaître les premières réalisations technologiques solaires au XIX^e siècle mais c'est véritablement pendant la deuxième partie du XX^e siècle que l'énergie solaire commence à apparaître comme une source d'énergie importante, particulièrement avec le développement du photovoltaïque. C'est dans le cadre de la course à l'espace entre les États-Unis et l'Union soviétique que la recherche et développement dans cette énergie fait un bond. Puis peu à peu, à partir des années 1970, l'énergie photovoltaïque prend place dans l'industrie terrestre. L'histoire de l'énergie solaire ne peut se comprendre sans tenir compte de celles des énergies concurrentes (principalement les combustibles fossiles) et des contraintes économiques auxquelles elle est soumise.

I-2 Imaginaire solaire au cours du XIX^e siècle

Au cours du XIX^e siècle, la possibilité d'utiliser l'énergie du soleil pour répondre aux besoins énergétiques de la société humaine prend place dans la littérature. On peut citer par exemple le roman *Travail* d'Émile Zola (1901) dans lequel celui-ci peint le tableau d'une société harmonieuse, basée sur les progrès techniques avec une application généralisée de l'électricité[1]. Vers la fin de l'ouvrage, le narrateur constate que l'épuisement des mines de charbon est un problème important en vue de la nécessité toujours plus importante de produire de l'électricité. C'est ainsi qu'il imagine la possibilité de capter l'énergie solaire afin d'en faire un « moteur universel ».

I-2.1 Solaire thermique

L'énergie solaire thermique est le domaine dans lequel on cherche à transformer la lumière du Soleil en source de chaleur. S'il n'y a pas de nuages masquant le Soleil, il est possible de concentrer cette lumière avec des miroirs ou des lentilles, afin d'augmenter la température. L'énergie solaire thermique sert à chauffer, climatiser un intérieur, réfrigérer, congeler, chauffer l'eau pour la douche, la lessive ou les processus miniers, chauffer pour faire la cuisine, la chimie, théoriquement jusqu'à la métallurgie. C'est une énergie propre et renouvelable.

I-2.2 Dans l'Antiquité

Le système le plus ancien est la parabole solaire. Étudiée par le grec Diocles (-240/-180), certaines sources affirment qu'on s'en servait pour allumer le feu des jeux olympiques antiques. Archimède (-287/-212) est connu pour avoir mis le feu aux navires de l'armée romaine à Syracuse avec des lentilles concentrant la lumière du Soleil[5]. Bien que certaines personnes disent que ceci n'est qu'une légende, d'autres affirment que Léonard de Vinci dit s'en être inspiré pour l'un de ses nombreux concepts. Par ailleurs le poète Aristophane fait mention de la lentille solaire dans l'un de ses textes.

L'énergie solaire thermique à concentration était donc manifestement connue dès l'Antiquité.

I-2.3 Au XIX^e siècle

L'imaginaire solaire que l'on retrouve dans l'œuvre de Zola, celui-ci le tire des débats sur l'utilisation de l'énergie du soleil, qui alimentent le XIX^e siècle.

Dès 1840, le risque d'un épuisement des stocks de charbons fait débat. Pour certains, l'expansion massive de l'industrie du charbon couplé à la demande croissante en énergie et la généralisation du libre-échange met en péril les réservoirs de combustibles². Par ailleurs, l'économiste anglais Stanley Jevons met en avant le paradoxe que plus l'efficacité des technologies augmente, plus la consommation totale de carburant augmente également et donc conduit à un épuisement des ressources.

C'est ainsi qu'en 1867, l'ingénieur français Louis Simonin publie un ouvrage *La Vie souterraine ou les mines et les mineurs*, dans lequel il propose de « mettre le soleil en bouteille ».

Il considère l'utilisation des énergies naturelles, comme le solaire, comme une voie alternative aux combustibles fossiles. D'autres ingénieurs tentent même de construire des machines fonctionnant à l'énergie solaire comme John Ericsson ou encore Augustin Mouchot. Le premier développe dans les années 1860 un nouveau système de machine à vapeur, utilisant les rayons du Soleil. Il publie également un ouvrage en 1868, *The Use of Solar Heat as a Mechanical Motor-Power*, dans lequel il décrit le solaire comme principale alternative à la crise des ressources de carburants fossiles. Mouchot lui, construit en 1865 un appareil composé d'un miroir captant les rayons solaires, au fond duquel une marmite porte l'eau à ébullition. Mais la fin des années 1860 est marquée par la guerre franco-prussienne qui met fin pour un temps à ces expérimentations. Il reprend ses travaux dans les années 1870, où il est financé par L'Association française pour l'avancement des sciences qui a pour objectif le redressement national par la modernité[8].

L'utilisation de l'énergie solaire prend aussi place dans les logiques impérialistes françaises dans le cadre de la colonisation en Algérie. Afin de renforcer cette colonisation, le gouvernement français tient à exploiter de nouveaux territoires (264 villages créés ou agrandis entre 1871 et 1880, 401 000 hectares de terres à cultiver) et il doit répondre à la question de la production énergétique dans ces territoires qui manquent de combustibles fossiles et sont peu desservis par des routes ou des voies ferrées.

L'utilisation de ressources renouvelables comme le soleil se présente donc comme une alternative et en 1877, Mouchot est financé de 10 000 francs pour réaliser une mission scientifique en Algérie. Celui-ci avait notamment annoncé que si le climat de l'Europe n'était pas forcément le plus adéquat à une utilisation de l'énergie solaire, les régions au climat intertropical où les rayons du soleil sont plus présents et plus puissants, comme l'Algérie, seraient beaucoup plus intéressantes pour installer des installations solaires. Mouchot améliore les rendements de ses machines à Alger lors d'une deuxième mission en Algérie en 1879. Il est même financé de 5 000 francs pour construire un réflecteur solaire pour représenter l'Algérie à l'exposition universelle de Paris de 1878. Sa machine est saluée par le public, le jury et la presse.

À la suite de ce succès, l'associé de Mouchot, Abel Pifre, multiplie les démonstrations et les déclarations où il met en avant les possibilités qu'apportent les machines de Mouchot ainsi que sa vision du futur où il voit le solaire prendre une place importante dans le système énergétique européen. Mais en dépit de l'enthousiasme du public, les machines solaires peinent à être efficaces dans la pratique. Leur coût trop élevé et leur rendement très faible combiné à l'apparition d'énergies combustibles peu coûteuses entraînent peu à peu la disqualification de la trajectoire énergétique solaire.

L'utilisation de l'énergie solaire est alors considérée comme irréaliste et pénètre dans l'espace de la littérature utopiste. Au XX^e siècle En 1949, le savant Félix Trombe met au point un four solaire à Mont-Louis. Basé sur les travaux de Lavoisier sur l'énergie solaire concentrée, il s'agit d'une parabole, capable de chauffer à plus de 3 500 °C, à condition de bénéficier d'un soleil sans nuages [5].



Figure I-1 : Four solaire d'Odeillo, le plus grand au monde

En 1968, Félix Trombe met au point un nouveau modèle, le four solaire d'Odeillo. Aujourd'hui encore le plus grand four solaire au monde, le four solaire d'Odeillo chauffe à plus de 3 500 °C. Aucun matériau ne lui résiste, même le diamant fond. Utilisant l'énergie solaire, il offre la vision d'une métallurgie futuriste utilisant une énergie propre et renouvelable.

I-3 Énergie solaire électrique

L'énergie solaire électrique est le domaine qui vise à transformer la lumière du Soleil en électricité. Tandis que le solaire photovoltaïque le fait directement, le solaire thermodynamique passe par un détour (l'énergie thermique) et accuse d'une perte d'efficacité globale comparé au photovoltaïque. Les systèmes photovoltaïques sont des panneaux utilisant au minimum deux matériaux actifs, dans la famille des semi-conducteurs. On a besoin de créer une sorte d'escalier (asymétrie) afin que les électrons libres aillent dans un seul sens et créent un courant électrique. Le système photovoltaïque peut être avec n matériaux actifs, avec ou sans concentration, avec ou sans contact

avant, cristallisé ou amorphe, à couches minces ou épaisses. L'électricité produite peut servir à l'éclairage, au fonctionnement des ordinateurs et des serveurs Internet, au pompage des eaux souterraines ainsi qu'à de nombreux autres usages et peut être transportée sur de longues distances. C'est une énergie propre et renouvelable.

Apparition de la photovoltaïque et première utilisation dans le cadre de la course de l'espace

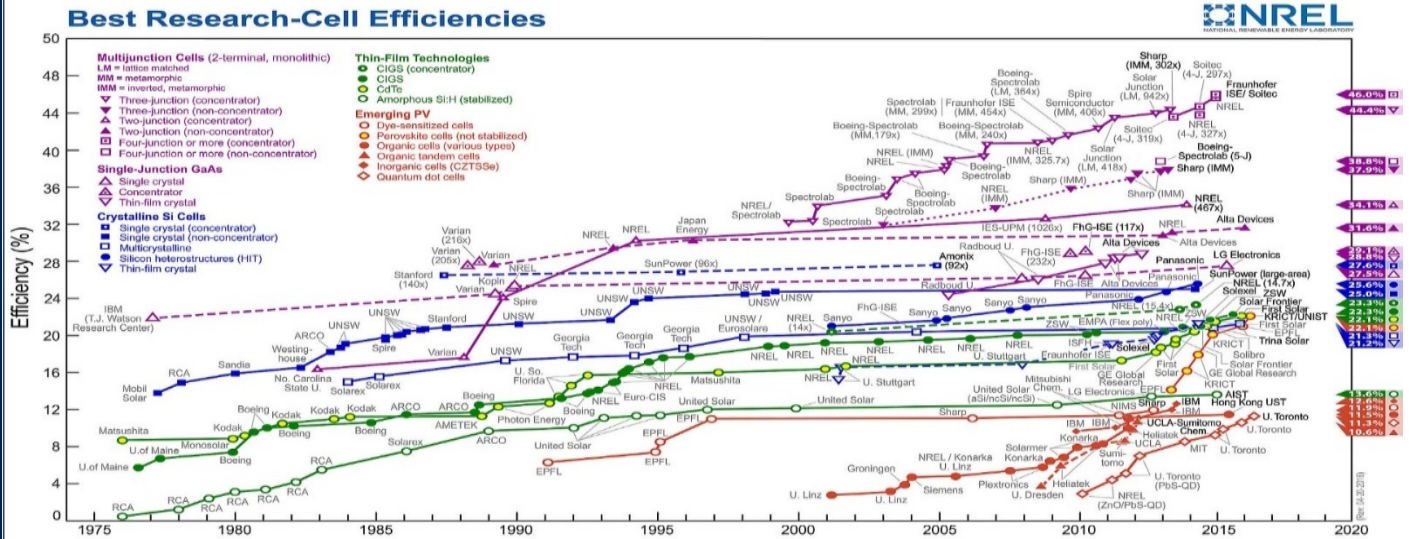


Figure I-2 : Évolution des rendements des cellules photovoltaïques de 1976 à 2016

En 1839, Edmond Becquerel découvre l'effet photoélectrique, le principe physique à la base de la production d'énergie solaire photovoltaïque. En 1953, le physicien Gerald Pearson et le chimiste Calvin Fuller, des laboratoires *Bell*, arrivent à réaliser la première cellule solaire à base de silicium. Cette cellule est capable de transformer les rayons du soleil en électricité⁴. Pendant ce temps, un autre scientifique des mêmes laboratoires, Daryl Chapin, fait des recherches sur la possibilité de produire de l'énergie dans les zones humides où les batteries traditionnelles se dégradent rapidement. Il s'intéresse alors au photovoltaïque comme alternative et reprend la découverte de Pearson et Fuller.

Après plusieurs améliorations il parvient à réaliser en 1954 une cellule solaire avec une efficacité de 6 %, soit au-dessus de l'efficacité limite qu'il s'était donnée pour que la cellule soit une source d'énergie intéressante (5,7 %). Mais face au prix très élevé du silicium, cette technologie peine à apparaître dans le monde industriel.

Les panneaux photovoltaïques trouvent leur première application dans le cadre de la course à l'espace⁴. L'armée américaine veut les utiliser dans le cadre d'un projet secret : les satellites. La Navy, qui s'est vu donner la responsabilité d'envoyer le premier satellite américain, équipe son satellite, le Vanguard I, d'une batterie électrochimique et de panneaux solaires. Il est lancé le 17 mars 1958. Alors que la batterie s'épuise en 1 semaine environ, les cellules solaires continuent de produire de l'électricité pendant des semaines. Malgré ce succès, la Nasa refuse de voir le photovoltaïque comme une solution suffisamment efficace pour les satellites. Cependant, des cellules solaires encore plus

efficaces sont réalisées et vers la fin des années 1960, l'énergie solaire est considérée comme la principale source d'énergie pour les satellites. Dans le cadre de course à l'espace, le gouvernement a dépensé environ 50 millions de dollars dans la R&D pour l'énergie solaire entre 1958 et 1969[3].

I-3.1 Premières utilisations sur terre

Pendant plusieurs années, le photovoltaïque reste cantonné au domaine de l'industrie spatiale au vu du coût extrêmement élevé des cellules solaires en silicium (100 \$ par watt au début des années 1970). Il est aussi utilisé par des agences gouvernementales qui ont beaucoup de moyens. Par exemple, la CIA installe des appareils de mesure qui fonctionnent à l'énergie solaire pour surveiller le trafic sur la piste Hô Chi Minh pendant la guerre du Vietnam.

Tandis que dans les années 1960 apparaît le mouvement écologiste, notamment à travers la protestation contre le nucléaire, en 1973 avec le premier choc pétrolier, les industriels s'intéressent à cette source d'énergie autorisant plus d'autonomie³. Les deux mouvements convergeront et feront de l'énergie solaire un domaine à la fois technique et politique. C'est au début des années 1970 que les cellules photovoltaïques sont pour la première fois produites à large échelle sur terre.

En 1973, la Solar Power Corporation, compagnie fondée par le docteur Elliot Berman et financée par Exxon, commence à produire des cellules solaires ayant un coût de 20 \$ par watt. La première industrie à s'intéresser au photovoltaïque est l'industrie du pétrole. Celle-ci en a besoin pour alimenter des lumières signalétiques sur les sites d'extraction mais également pour combattre la corrosion dans les tuyaux, ce qui se fait par l'utilisation de petites quantités d'électricité. L'utilisation du photovoltaïque prend également un sens économiquement pour les garde-côtes.

En effet, l'utilisation de batteries non rechargeables pour alimenter les bouées les obligent à dépenser des milliers de dollars pour changer les batteries. Après des années de bataille avec ses supérieurs, le lieutenant Lloyd Lomer parvient en 1977 à obtenir du gouvernement un programme photovoltaïque pour équiper ces appareils. Le photovoltaïque prouve son intérêt et son utilité dans les chemins de fer dans les années 1970[2,6].

En effet, les appareils permettant la sécurité sur les voies nécessitent un peu d'électricité et acheminer de l'électricité sur de longues distances coûte cher. C'est ainsi que plusieurs compagnies de chemins de fer se convertissent au photovoltaïque.

I-3.2 Photovoltaïque dans les pays en développement

L'utilisation de l'énergie solaire prend sens par la suite au Mali quand la grande sécheresse frappe le Sahel et cause la mort de milliers de personnes. Bernard Verspieren, un religieux français, intervient au Mali initiant un programme de pompage d'eau à l'aide de panneaux photovoltaïques. Inspiré par la première pompe solaire installée au sommet d'une colline en Corse, initiée par Dominique Campana, Il met en place la première pompe solaire africaine au Mali qui devient un modèle pour tous les pays en

développement. On compte en effet à la fin du XX^e siècle des dizaines de milliers de pompes solaires dans les pays en développement.

I-3.3 Progrès récents du photovoltaïque

Dans les années 1970 et 1980, les programmes de recherches gouvernementaux en Amérique, en Europe et au Japon ont l'idée de construire des grandes centrales solaires. Mais un ingénieur suisse, Markus Real, met en avant l'idée qu'il serait beaucoup plus économique que chaque particulier ait ses propres panneaux solaires. Il arrive à prouver son idée en faisant installer des panneaux solaires sur 333 toits à Zurich. Son opération est un succès et depuis plusieurs gouvernements financent des plans énergétiques pour inciter leurs citoyens à installer des panneaux solaires sur leur toit. On peut penser notamment au 1000-Dächer-Programm en Allemagne, lancé entre 1990 et 1995.

Au début du XXI^e siècle, l'électricité produite à partir du photovoltaïque coûte 25 \$ par kilowatt. Cela revient donc moins cher d'utiliser l'énergie solaire que d'installer des fils électriques sur des kilomètres pour alimenter des appareils nécessitant peu d'énergie. En revanche, cela reste beaucoup plus cher que l'électricité produite par les combustibles fossiles.

La recherche s'axe donc sur la nécessité de produire des cellules solaires beaucoup moins chères pour que le solaire soit plus compétitif que les combustibles fossiles dont les ressources s'épuisent et dont la combustion entraîne le réchauffement global de la planète. En effet, l'apparition grandissante dans les consciences du danger que peut causer le réchauffement climatique place l'énergie solaire comme une alternative de plus en plus sérieuse aux énergies fossiles.

En 2009, la production énergétique mondiale due au photovoltaïque est de 10,66 GW. Les cellules solaires majoritairement produites sont celles à base de silicium mono et polycristallin avec un coût de production de 1,5 \$ par watt mais des progrès sont également faits dans le domaine des cellules solaires à couche mince qui coûtent 0,76 \$/W et atteignent un rendement d'environ 20 %.

Depuis, la R&D du photovoltaïque s'intéresse à la possibilité de produire des cellules solaires à partir de matériaux organiques qui auraient l'avantage d'être beaucoup moins cher et plus flexibles que les cellules à base de silicium. En 2013, on parvient à avoir des rendements de presque 9 % avec des cellules organiques à base de polymère. Mais la difficulté de production de ces matériaux entraîne la recherche dans le solaire vers la possibilité de construire des cellules solaires à partir de molécules organiques simples. C'est ce que parviennent à faire les chercheurs de l'Institut Moltech-Anjou en réalisant une cellule solaire à base d'une molécule dont la synthèse présente d'excellents rendements en masse et dont la conversion en électricité atteint les 4 %. [7]

I-3.4 GISEMENT SOLAIRE

Comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire à l'étude des systèmes photovoltaïques, surtout dans une optique de développement des marchés et des technologies. Par gisement solaire, on entend ici les différentes caractéristiques du

rayonnement solaire, susceptibles d'influencer les performances d'un système en un lieu donné. Dans un premier temps, on rappellera quelques données de base concernant le rayonnement solaire, indispensables tant au chercheur qu'à l'ingénieur : distributions types d'éclairement, irradiances moyennes et maximales sur divers plans, distribution spectrale moyenne... Les applications photovoltaïques requièrent des présentations spécifiques des données de rayonnement, qui peuvent être différentes selon le niveau de détail des études envisagées, mais aussi selon le système projeté (selon qu'il est, par exemple, autonome ou relié au réseau).

Les moyennes mensuelles ou annuelles de l'irradiation sur le plan des cellules sont une donnée de base pour des calculs rapides d'avant-projet ; à l'autre extrême, les fichiers pluriannuels de valeurs horaires de rayonnement (voire avec un pas de temps plus fin que l'heure) servent à la simulation dynamique détaillée des installations. Les différents types de données et les particularités des applications photovoltaïques seront analysés. On montrera par exemple comment différents types de données de rayonnement solaire peuvent être ou non utilisées comme intrants de logiciels de simulation d'une installation photovoltaïque autonome.

I-4.1) Définition

Le gisement solaire est une partie de la science qui étudie les variations, les comportements et la nature du rayonnement solaire tant sur la terre que dans l'espace en s'appuyant sur des données météorologiques récoltés par les stations spatiales et terrestres de météorologies.

I-4.2) Soleil

Le **Soleil** est l'étoile du Système solaire. Dans la classification astronomique, c'est une étoile de type naine jaune d'une masse d'environ $1,989 1 \times 10^{30}$ kg, composée d'hydrogène (74 % de la masse ou 92 % du volume) et d'hélium (25 % de la masse ou 8 % du volume). Le Soleil fait partie de la galaxie appelée la Voie lactée et se situe à environ 8 kpc ($\sim 26\ 100$ al) du centre galactique, dans le bras d'Orion. [8]

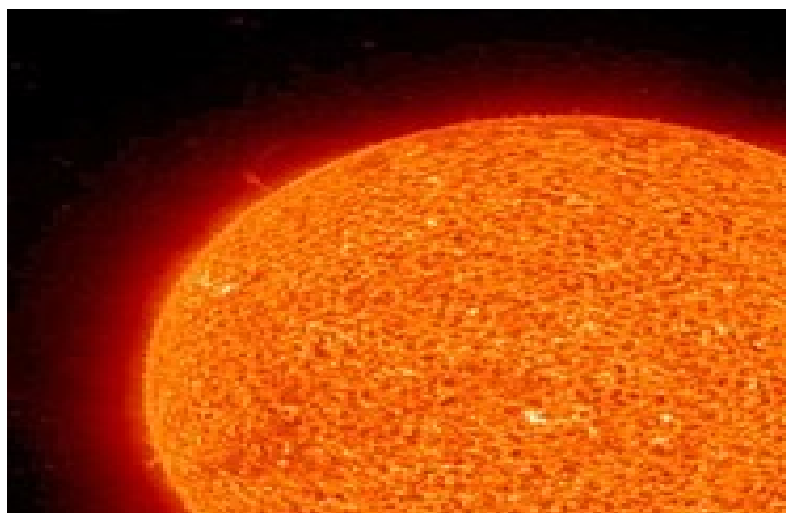


Figure I-3: Soleil

Le Soleil orbite autour du centre galactique en une année galactique de 225 à 250 millions d'années. Autour de lui gravitent la Terre (à la vitesse de 30 km/s), sept autres planètes, au moins cinq planètes naines, de très nombreux astéroïdes et comètes et une bande de poussière. Le Soleil représente à lui seul environ 99,854 % de la masse du système planétaire ainsi constitué, Jupiter représentant plus des deux tiers du reste.

I-4.3 Constante solaire

La constante solaire, aussi appelée irradiance solaire totale, exprime la quantité d'énergie solaire que recevrait pendant une seconde (soit la puissance) une surface de 1 m² située à une distance d'une unité astronomique (distance moyenne Terre-Soleil), exposée perpendiculairement aux rayons du Soleil, en l'absence d'atmosphère. Pour la Terre, c'est donc la densité de flux énergétique au sommet de l'atmosphère. Sa valeur moyenne "I₀" appelée constante solaire est de l'ordre de 1354 W.m⁻². En première approximation, on peut calculer la valeur de "I_c" en fonction du numéro du jour de l'année "nj" par la relation suivante [9]:

$$I_c = I_0 [1 + 0.033 \times \cos (0.984 \times nj)] \quad (\text{I-1})$$

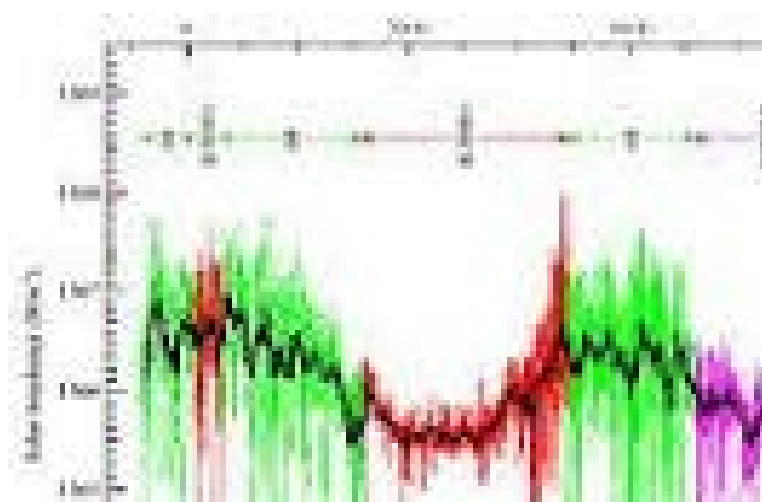


Figure I-4: Variation de la constante solaire

I-4.4 Irradiation solaire au monde

L'**irradiation solaire** est une grandeur radiométrique qui mesure la quantité d'énergie solaire reçue par unité de surface. Elle peut être exprimée en kilowattheures par mètre carré (kWh/m²) ou en joules par mètre carré (J/m²) dans le Système international d'unités. L'irradiation solaire peut être mesurée grâce à un radiomètre ou un albédo mètre.

Elle est distincte de l'éclairement énergétique solaire, aussi appelé « irradiance solaire » par anglicisme, qui est un flux exprimé en W/m² et dont l'irradiation solaire est l'intégrale sur une période de temps.

L'irradiation solaire peut être mesurée dans l'espace ou sur la surface de la Terre après avoir pris en compte l'absorption et la diffusion atmosphériques. La valeur mesurée dépend de l'inclinaison du capteur de l'appareil de mesure ainsi que de son spectre d'analyse.

Puisque cette grandeur caractérise le gisement solaire, elle peut être utilisée dans les calculs de rendement des installations thermiques et photovoltaïques ou pour modéliser le climat.

I-4.5 Irradiation solaire en Afrique

L'Afrique est sans commune mesure le continent doté du plus fort potentiel pour l'énergie solaire car la ressource solaire y est disponible en quantité, en qualité et sur un vaste espace. Nombre des lieux et des pays les plus ensoleillés du monde se trouvent sur le continent.

Malgré ce potentiel considérable, le taux de pénétration de l'énergie solaire est encore faible : 1,7 % de la production d'électricité en 2020, mais connaît une forte croissance à partir de la deuxième partie des années 2010.

I-4.6 Potentiel solaire en Afrique

Le gisement solaire, aussi appelé potentiel solaire, de l'Afrique dans son ensemble est colossal. Les réserves totales d'énergie solaire théoriquement disponibles sur le continent ont été estimées à près de 60 millions de TWh/an contre 37,5 millions de TWh/an pour l'Asie, Moyen-Orient (hors Égypte) inclus, et seulement 3 millions de TWh/an pour l'Europe. L'Afrique détiendrait ainsi 40 % du potentiel total mondial², alors que la superficie totale de l'Afrique constitue à peine 20 % de la superficie totale des continents terrestres. L'irradiation solaire globale de l'Afrique est donc a priori très favorable à l'exploitation de l'énergie solaire [10].

I-4.7 Pays les plus ensoleillés du monde se trouvent sur le continent

Certaines régions du continent sont parmi les plus ensoleillées de la planète que ce soit en termes d'intensité du rayonnement solaire^{6,7} ou de durée de l'insolation effective⁸. Le centre du Sahara oriental - la région la plus aride du globe - par exemple, à cheval entre la Libye, l'Égypte, le Soudan et le Tchad, constitue la partie de la Terre où l'astre brille le plus souvent en moyenne avec près de 4 300 h/an¹⁰ de soleil ce qui représente 97 à 98 % de la période diurne totale, un record mondial¹¹. L'intensité moyenne des radiations solaires y dépasse 220 kcal. Cm⁻². an, là aussi un record planétaire [11].

Cet aperçu à l'échelle du continent ne doit pas masquer les disparités parfois impressionnantes à l'échelle régionale, nationale voire locale, quant à la distribution des ressources solaires à travers le continent. Ces inégalités se manifestent le plus fréquemment assez logiquement entre les différentes grandes zones climatiques. Le gisement solaire d'un lieu donné dépend en effet de plusieurs facteurs géographiques et climatiques comme :

- l'altitude du lieu ;
- la latitude du lieu, c'est-à-dire l'éloignement du lieu par rapport à l'équateur ;
- la nébulosité du lieu, c'est-à-dire la fraction du ciel couverte par les nuages ;

- la pluviométrie du lieu, etc.

Ainsi les zones les plus favorisées du continent en matière de gisement solaire sont le nord de l'Afrique, le sud de l'Afrique, la zone équatoriale sèche de l'Afrique orientale¹³ et l'Ouest malgache. Ce sont des régions sèches essentiellement hyperarides, arides ou semi-arides souvent situées au voisinage des tropiques où le ciel est le plus souvent clair et la luminosité continue. Elles font partie de la *Global Sun Belt*, la « ceinture solaire de la Terre ».

Au contraire, les zones les moins favorisées du continent en la matière sont les zones côtières de l'Afrique de l'Ouest au bord du golfe de Guinée et leurs arrière-pays, le centre de l'Afrique et la côte orientale de l'Afrique le long de l'océan Indien. Ce sont des régions humides bien arrosées situées à proximité de l'équateur d'où un angle d'incidence du rayonnement solaire proche du maximum atteignable mais contrebalancé par un ciel le plus souvent couvert et une luminosité intermittente.

On peut donc dégager quelques tendances selon les pays à l'échelle du continent :

les pays extrêmement favorisés : l'Algérie, le Maroc ; l'Égypte ; le Niger ; l'Afrique du Sud ;

les pays très favorisés : l'Éthiopie ; l'Angola ; la Tanzanie ;

les pays favorisés : le Nigeria ; la République centrafricaine ; le Mozambique ; la Tunisie ; les pays peu favorisés : la Côte d'Ivoire ; le Cameroun ; la République démocratique du Congo ;

les pays très peu favorisés : le Gabon ; la République du Congo ; le Liberia.

À noter que la liste d'exemples dans chaque catégorie est notamment basée sur les conditions climatiques de ces pays et est évidemment non exhaustive.

Précisons également qu'il existe souvent des contrastes à l'intérieur même de certains pays africains à fortiori si les pays en question sont traversés par différentes zones climatiques qui présentent des régimes de nébulosité et de pluviométrie bien distincts.

I-4.8 Statistiques

En 2020, la production d'électricité solaire photovoltaïque en Afrique s'élevait à 11 581 GWh et celle des centrales solaires thermodynamiques à 2 558 GWh, soit respectivement 1,4 % et 0,3 % de la production d'électricité du continent¹⁵ ; les productions mondiales correspondantes s'élevaient à 823 782 GWh et 13 715 GWh ; la part de l'Afrique était donc de 1,4 % pour le photovoltaïque et de 18,7 % pour le solaire thermodynamique.

Les installations solaires totalisaient une capacité de production de 4,15 GWc (gigawatts-crête) sur toute l'Afrique en 2017, dont plus de la moitié en Afrique du sud, selon le rapport 2018 de l'Agence internationale des énergies renouvelables (Irena). En comparaison, la France totalise 8,5 GWc de solaire installés, qui ne fournissent pourtant que 2 % de l'électricité du pays.

Si les projets d'électricité verte se développent en Afrique du sud et dans les pays du Maghreb, l'Afrique subsaharienne reste en revanche le parent pauvre des énergies vertes, et notamment du solaire, selon un rapport de l'Institut Montaigne publié le 14 février 2019. Alors que la ressource solaire est disponible, la taille des projets adaptable, et leur compétitivité de plus en plus attractive face aux solutions thermiques polluantes (fioul et charbon), le nombre de personnes n'ayant pas accès à

l'électricité en Afrique subsaharienne devrait continuer à augmenter jusqu'en 2025, voire 2040 selon les estimations, alors qu'il a reculé de 34 % dans le monde entre 2000 et 2016.

Un marché se développe toutefois depuis plusieurs années via les « kits individuels », des lampes solaires ou de petits systèmes limités à un panneau et une batterie, avec paiement par le téléphone mobile. Les micro-réseaux électriques, adaptés aux zones rurales éloignées des grandes lignes électriques, se développent également. Mais les projets de taille intermédiaire qui permettraient d'alimenter des agglomérations sont souvent trop petits pour avoir accès aux financements adaptés aux contraintes et aux risques des pays africains [12].

La baisse importante des coûts de l'équipement solaire devrait permettre une augmentation significative du taux d'équipement, avec une estimation à 2,2 GWc en 2018.

L'Afrique du Sud est le pays africain qui dispose du parc solaire le plus important, avec 1 329 MWc installés en 2016. L'énergie solaire en Afrique du Sud est en pleine expansion.

Au Maroc, les centrales solaires en exploitation totalisent 700 MWc, dont 192 MWc en photovoltaïque : Noor Ouarzazate IV (72 MWc), mise en service en 2018, NoorLaâyoune I (80 MWc), NoorBoujdour I (20 MWc) et Ain Beni Mathar (20 MWc).

La Banque africaine de développement (BAD) se prépare à lancer le projet « Desert to Power » pour fournir de l'énergie à 250 millions de personnes dans les 11 pays de la bande sahélienne (du Sénégal à l'Éthiopie) en faisant de cette région la plus grande zone de production solaire au monde avec 10 000 MWc de capacité.

La société PEG Africa fournit dans les pays d'Afrique de l'Ouest des kits solaires hors réseau en zone rurale, où le combustible représente jusqu'à 30 % des coûts pour les ménages. En Afrique subsaharienne, seule 32% de la population est connectée au réseau électrique, souvent d'une qualité médiocre, les solutions hors-réseaux connaissent un certain engouement.

La centrale de Zagtoui, près de Ouagadougou au Burkina Faso, est inaugurée le 29 novembre 2017. Cette centrale d'une puissance de 33 MWc et étalée sur 60 hectares a été construite pour un coût de 47,5 millions d'euros, financés par la Commission européenne et l'agence française de développement.

Le Ghana doit mettre en service début 2019 une centrale solaire privée, la Nzema Solar Power Station d'une puissance de 150 MWc.

Le Tchad adopte en décembre 2017 un plan de 23 millions de dollars pour l'électricité solaire, alors que seule 5 % de la population dispose de l'électricité⁴¹. Ce plan est financé à 87 % par la banque islamique de développement, 11 % par le gouvernement et 2 % par l'Office national d'électricité marocain.

L'Éthiopie démarre en début de 2018 la construction d'une centrale solaire de 100 MWc dans la région d'Oromia, dans le but de diversifier sa production d'électricité. Par ailleurs, une usine de panneaux solaires était presque achevée en 2015 à Sendafa.

En Namibie, l'entreprise française Inno-Vent a construit les deux premières centrales solaires du pays à Omburu et Osona (5 MWc chacune). La première commence à produire en 2015.

En 2021, une centrale de 50 MWc (127 344 panneaux solaires) est inaugurée au Togo.

A travers ce programme d'énergies renouvelables, l'Algérie compte se positionner comme un acteur majeur dans la production de l'électricité à partir des filières photovoltaïque et éolienne en intégrant la biomasse, la cogénération, la géothermie et au-delà de 2021, le solaire thermique [13].



Figure I-6 : Global irradiation du continent africain

Chapitre II

La Conversion Photovoltaïque

II-1 Spectre solaire : Qu'est-ce que la lumière ?

Un faisceau lumineux est un déplacement de petits corps porteurs d'énergie, ou photons, comme l'a décrit Einstein en 1905, pour expliquer l'effet photoélectrique. Depuis l'équivalence onde-corpuscule mise en évidence par Louis de Broglie en 1924, la lumière est décrite également comme une onde électromagnétique, comme les rayons X ou les ondes radiofréquences. Tout est une question de longueur d'onde, ou de fréquence, pour ces oscillations qui traversent l'espace et parfois la matière. Chaque photon porte une quantité d'énergie directement liée à sa longueur d'onde [20].

Le Soleil émet un rayonnement de type électromagnétique. La lumière blanche nous parvient en très peu de temps (elle met en moyenne environ 8 minutes et 19 secondes à nous parvenir) car il se déplace à la vitesse de la lumière, soit 299 792 458 m/s.

Ce rayonnement constitue un spectre continu allant des ultra-violet à l'infra-rouge en passant par le visible où il émet avec le maximum d'intensité. Cependant, en traversant la chromosphère du Soleil et l'atmosphère de la Terre, les atomes qui les composent absorbent certains photons.

Le spectre alors observable depuis la surface de la Terre est donc un spectre de raies d'absorptions. Ainsi, à la surface de la Terre le rayonnement solaire comprend : 5% d'ultra-violet, 40% de lumière visible et 55% d'infra-rouge, les IR étant porteurs de l'essentiel de l'énergie thermique.

Le rayonnement ultra-violet émis par le Soleil est classé en 3 types d'ultra-violet : les UV-A ayant une longueur d'onde de 380 (cette valeur peut varier légèrement selon la source) à 315 nanomètres (1nm=1×10⁻⁹mètre), les UV-B dont la longueur d'onde est comprise entre 315 et 280 nm ainsi que les UV-C qui ont une longueur d'onde allant de 280 à 200 nm. Cependant seuls les UV-A et une petite partie des UV-B parviennent jusqu'à la surface de la Terre car en traversant l'atmosphère la totalité des UV-C et la majeure partie des UV-B sont soit absorbées, soit réfléchies. Ainsi le rayonnement solaire que nous recevons comprend seulement 5% d'ultra-violet, ces 5% étant composés à 95% d'UV-A et à 5% d'UV-B.

Le rayonnement solaire peut être considéré comme un ensemble de photons, particules transportant chacune une quantité d'énergie appelée "quantum d'énergie" et notée " ΔE ". L'énergie d'un photon de fréquence ν (en hertz), dont la longueur d'onde λ (en mètre) est égale à la célérité divisée par ν , est exprimée par la relation

$$\Delta E = c \nu = \frac{c \times h}{\lambda} \quad (\text{II-1})$$

h est la constante de Planck $6,63.10^{-34} \text{ J/s}$

ν est la fréquence de l'onde exprimé en hertz

ΔE est l'énergie du photon

Ainsi, les photons composant le rayonnement ultraviolet, du fait de leur longueur d'onde, transportent un quantum d'énergie plus important que les photons composant le rayonnement infrarouge.

L'énergie que transmet le Soleil à la surface de l'atmosphère par rayonnement est égale à 1 350 Watts/m² (c'est la constante solaire). Cependant, en traversant l'atmosphère, des parties de ce rayonnement sont réfléchies, absorbées ou diffusées, ce qui diminue significativement cette valeur. Cette diminution est d'autant plus forte que la couche d'atmosphère est importante. Ainsi, l'énergie que nous transmet le Soleil dépend de plusieurs facteurs comme l'épaisseur de l'atmosphère où l'on se trouve ou encore la position du Soleil et sa valeur atteint dans les meilleures conditions 900 à 1000 Watts/m² [14].

II-2.1 Principe de la conversion Photoélectrique

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un matériau. Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse [15].

Le scientifique français, Edmond Becquerel, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photoélectrique. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Par la suite, Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E = \frac{h \times c}{\lambda} \quad (\text{II-2})$$

Où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ sa longueur d'onde. Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte valut à Albert Einstein le prix Nobel en 1905.

La conversion photovoltaïque aujourd'hui largement utilisée peut-être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de

même énergie électrique. Généralement, la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique. [16]

L'énergie produite par l'absorption d'un photon dans un matériau se traduit du point de vue électrique par la création d'une paire électron-trou. Cette réaction entraîne une différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, c'est l'effet photovoltaïque. Le fait d'avoir associé deux types de matériaux pour créer une jonction permet de pouvoir récupérer les charges avant que ces dernières ne se soient recombinées dans le matériau qui redevient alors neutre.

La présence de la jonction PN permet ainsi de maintenir une circulation de courant jusqu'à ses bornes. Le nombre de photons par unité de longueur d'onde est une donnée à connaître pour les applications photovoltaïques pour estimer l'énergie totale disponible. La longueur d'onde correspondant au maximum de photons est de l'ordre de 650-670nm.

La plupart des cellules photovoltaïques utilisent des semi-conducteurs pour récolter les paires électron-trou créées par la collision des photons dans le matériau. Cependant, selon le matériau utilisé, le nombre de photons utiles (qui peuvent être absorbés) diffère.

En effet, chaque matériau possède son propre gap énergétique (bande d'énergie interdite). Tout photon possédant une énergie inférieure à ce gap et arrivant à la surface du matériau n'aura pas assez d'énergie pour arracher un électron au matériau même s'il entre en collision avec un.

Le courant produit par un capteur PV est donc beaucoup plus faible que la quantité de photons arrivant sur le matériau car plusieurs conditions doivent être réunies pour que réellement l'énergie d'un photon se traduise en courant (compatibilité du matériau avec les longueurs d'ondes du spectre solaire, énergie des photons à leur arrivée sur le matériau, probabilité de rencontre d'un photon avec un électron, incidence du rayonnement, épaisseur du matériau...).

De plus, un autre compromis doit être fait par le concepteur de capteurs PV. Si le gap du matériau est grand, peu de photons auront assez d'énergie pour créer du courant mais aux bornes de la cellule, la tension en circuit ouvert sera grande et facilitera d'autant plus l'exploitation de l'énergie électrique. A l'inverse, un matériau avec un faible gap absorbe plus de photons mais présente une tension plus faible à ses bornes. Ce compromis a été quantifié par Shockley et Quessier [17].

Ainsi par exemple, avec un seul matériau, le rendement de conversion maximal théorique est de 31% pour un gap énergétique d'environ 1.4eV. Par comparaison, le gap du silicium qui est aujourd'hui le matériau le plus utilisé pour constituer des cellules dans les capteurs PV terrestres, n'est pas très loin de cet optimum avec 1.12eV. Ainsi, le maximum théorique pour une simple jonction Si est d'environ 29%.

La différence de potentiel présente aux bornes d'une jonction PN soumise à un éclairage est également mesurable entre les bornes de la cellule PV. Typiquement, la tension maximale d'une cellule (PN) est d'environ 0.5 à 0.8V. Elle peut être directement mesurée à ses bornes sans charge (circuit ouvert). Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (Voc). Lorsque les bornes d'une cellule sont court-circuitées, on peut mesurer le courant maximal produit par la cellule PV et on le nomme communément courant de court-circuit (Icc). [18]

En physique, l'**effet photoélectrique** désigne en premier lieu l'émission d'électrons par un matériau sous l'action de la lumière. Par extension, il regroupe l'ensemble des phénomènes électriques dans un matériau sous l'effet de la lumière. On distingue alors deux effets : l'éjection d'électrons hors du matériau (émission photoélectrique) et la modification de la conductivité de ce matériau (photoconductivité, effet photovoltaïque lorsqu'il est en œuvre au sein d'une cellule photovoltaïque, effet photoélectrochimique, effet photorésistif).

Lorsque l'effet photoélectrique se manifeste, toute l'énergie du photon incident se transmet à l'électron. Une quantité d'énergie minimale est nécessaire pour extraire l'électron de l'atome, l'énergie excédentaire est transmise à l'électron sous forme d'énergie cinétique. Une absorption partielle est caractérisée par la diffusion Compton. [19]

II-3 Définition

L'effet photoélectrique est un phénomène physique dans lequel un matériau, généralement métallique, émet des électrons. Il se produit lorsque le matériau est exposé à un rayonnement électromagnétique de fréquence suffisamment élevée, fréquence qui dépend du matériau.

L'existence de ce seuil de fréquence, non prévu par la mécanique classique est expliqué par la physique quantique.

$$E_{cm} = cv - eE_0 \quad (\text{II-3})$$

Energie cinétiques

h la constante de Planck

ν la fréquence de la lumière

e est la charge électronique

E_0 énergie initiale du photon

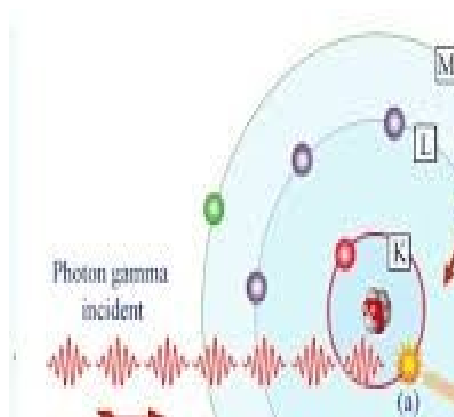


Figure II-1: Effet photoélectrique

II-3.1 Effet de la photoconductivité

En physique, la **photoconductivité** survient chaque fois que la résistance électrique d'un corps varie lorsqu'on l'éclaire avec un rayonnement électromagnétique appartenant à tous les domaines du spectre lumineux (domaine visible, ultraviolet et infrarouge).

Le terme « photovoltaïque » est composé du mot de grec ancien « photos » (φωτος : lumière, clarté) et du nom de famille du physicien italien (Alessandro Volta) qui inventa la pile électrique en 1800 et donna son nom à l'unité de mesure de la tension électrique, le volt.

L'effet photovoltaïque, découvert en 1839 par le français Edmond Becquerel, désigne la capacité que possèdent certains matériaux, notamment les semi-conducteurs, à convertir directement les différentes composantes de la lumière du soleil (et non sa chaleur) en électricité. [20]

II-3.2 Principe de fonctionnement

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont » bombardés » par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être » arrachés / décrochés » : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau. L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique. Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons » décrochés » créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque. Tous les semi-conducteurs présentent cet effet, avec plus ou moins d'efficacité.

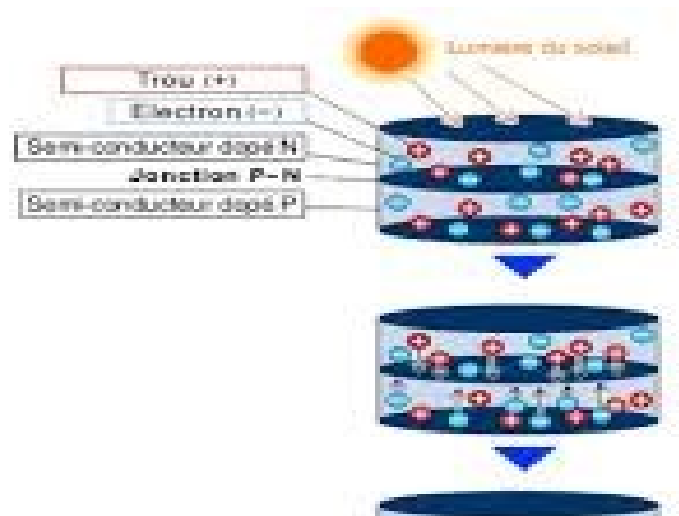


Figure II-2: Schéma du principe de l'effet photovoltaïque dans une photopile

II-3.3 Cellule photovoltaïque

Une **cellule photovoltaïque**, ou **cellule solaire**, est un composant électronique qui, exposé à la lumière, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance électrique obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et elle dépend du rendement de la cellule. Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à une charge électrique (en général un onduleur, parfois une simple batterie électrique).

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium et plus rarement d'autres semi-conducteurs : séléniure de cuivre-indium ($\text{CuIn}(\text{Se})_2$, ou CIS), séléniure de cuivre, d'indium et de gallium ($\text{CuInGa}(\text{Se})_2$, aussi appelé CIGS), tellure de cadmium (CdTe), etc. Elles se présentent généralement sous forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté.

Les cellules sont souvent réunies dans des modules photovoltaïques ou panneaux solaires photovoltaïques, en fonction de la puissance recherchée. [21]

II-3.4 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

Dans un semi-conducteur exposé à la lumière, un photon d'énergie suffisante arrache un électron à la matrice et crée ainsi un « trou ». En l'absence de dispositif supplémentaire, l'électron trouve rapidement un trou pour se recombiner et l'énergie apportée par le photon est ainsi dissipée. Le principe d'une cellule photovoltaïque est de forcer les électrons et les trous à se diriger chacun vers une face opposée du matériau au lieu de se recombiner en son sein : il apparaîtra une différence de potentiel et donc une tension entre les deux faces, comme dans une pile. L'une des solutions pour atteindre cet objectif, couramment utilisée, est de générer un champ électrique au moyen d'une jonction p-n, c'est-à-dire entre deux couches dopées respectivement P et N.

Typiquement, la couche supérieure de la cellule est composée d'un semi-conducteur dopé N^b . Dans cette couche, il existe une quantité d'électrons libres supérieure à celle du matériau intrinsèque (i.e. non dopé), d'où l'appellation de dopage N, comme négatif (charge de l'électron). Le matériau reste électriquement neutre : c'est le réseau cristallin qui supporte globalement une charge négative. La couche inférieure de la cellule est généralement composée d'un semi-conducteur dopé P^c . Cette couche possédera donc en moyenne une quantité d'électrons libres inférieure à celle du matériau intrinsèque (i.e. non dopé), les électrons sont liés au réseau cristallin qui, en conséquence, est chargé positivement. La conduction électrique est assurée par des trous, positifs (P).

Au moment de la création de la jonction P-N, les électrons libres de la région N diffusent dans la couche P et se recombinent avec les trous de la région P. Il existera ainsi, pendant toute la vie de la jonction, une charge *positive* de la région N au bord de la jonction (parce que les électrons en sont partis) et une charge *négative* dans la région P au bord de la jonction (parce que les trous en ont disparu) ; l'ensemble forme la Zone de Charge d'Espace (ZCE) et il existe un champ électrique entre

les deux, de N vers P. Ce champ électrique fait de la ZCE une diode, qui ne permet le passage du courant que dans un sens : les électrons peuvent passer de la région P vers la région N, mais pas en sens inverse ; inversement les trous ne passent que de N vers P.

En fonctionnement, un photon arrache un électron à la matrice, créant un électron libre et un trou. Ces porteurs de charge diffusent jusqu'à la zone de charge d'espace. Là, sous l'effet du champ électrique, ils partent chacun à l'opposé : les électrons s'accumulent dans la région N (qui devient le pôle négatif), tandis que les trous s'accumulent dans la couche dopée P (qui devient le pôle positif). Ce phénomène est plus efficace dans la ZCE, où les porteurs de charges (électrons ou trous) sont séparés immédiatement par le champ électrique. Le phénomène est aussi efficace à proximité immédiate de la ZCE : lorsqu'un photon y crée une paire électron-trou, ils se séparent et ont peu de chance de rencontrer leur opposé, alors que si la création a lieu plus loin de la jonction, le nouvel électron (respectivement le trou) conserve une grande chance de se recombiner avant d'atteindre la zone N (respectivement la zone P). La ZCE est très mince, il est ainsi souvent possible de fabriquer des cellules fines.

D'un point de vue électrique, une cellule photovoltaïque est l'équivalent d'un générateur de courant auquel on a adjoint une diode.

Il faut ajouter des contacts électriques (qui laissent passer la lumière en face éclairée : en pratique, on utilise souvent un contact par une grille), une couche antireflet pour assurer une bonne transmission des photons vers l'absorbeur. Pour que la cellule fonctionne, et produise le maximum de courant, on ajuste le gap du semi-conducteur au niveau d'énergie des photons. On peut éventuellement empiler les jonctions, de façon à exploiter au mieux le spectre d'énergie des photons, ce qui donne les cellules multi-jonctions, aussi appelées « cellules tandem ». [22]



Figure II-3: Cellule photovoltaïque

II-4 Matériaux semi-conducteurs et Etat de l'art en technologies photovoltaïque

II-4.1 silicium

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient par réduction à partir de silice, composé le plus abondant dans la croûte terrestre et notamment dans le sable ou le quartz. La première étape du processus est la production de silicium dit métallurgique, pur à 98 % seulement, obtenu à partir de morceaux de quartz provenant de galets ou d'un gisement filonien (la technique de production industrielle ne permet pas de partir du sable). Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999 %, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium.

Le silicium est produit sous forme de lingots de section ronde ou carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques, le cas échéant mises au carré, de près de 200 μm d'épaisseur, appelées « *wafers* ». Après un traitement visant à l'enrichir en éléments dopants (P, As, Sb ou B) et ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les *wafers* sont « métallisés » : des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés, les *wafers* deviennent des cellules photovoltaïques.

La production des cellules photovoltaïques nécessite de l'énergie, et on estime qu'un module photovoltaïque doit fonctionner environ deux à trois ans pour compenser l'énergie nécessaire à sa fabrication (durée qu'on appelle retour énergétique)^{9,10}, selon sa technique de fabrication, c'est-à-dire pour produire autant d'énergie qu'il en a été consommée pour sa fabrication. Les techniques de fabrication et les caractéristiques des principaux types de cellules à base de silicium sont décrites dans les trois paragraphes suivants.

Il existe d'autres types de cellules : les films photovoltaïques ou *cellules solaires en couche mince*, souples et prometteurs, mais leur utilisation est minoritaire après une baisse drastique des parts de marché dans les années 2000.

Les matériaux et procédés de fabrication font l'objet de programmes de recherche ambitieux pour réduire les coûts de fabrication et de recyclage des cellules photovoltaïques. De fait, en 2006 et 2007, la croissance de la production mondiale de panneaux solaires a été freinée par manque de silicium et les prix des cellules n'ont pas baissé autant qu'espérer. L'industrie cherche donc à faire baisser la quantité de silicium utilisé. Les cellules monocristallines sont passées de 300 μm d'épaisseur à 200, puis 150 μm en 2019, diminuant la quantité de matière et d'énergie nécessaires, mais aussi les prix. En 2019, des cellules de seulement 0,2 μm d'épaisseur sont produites avec un rendement de 20 %, mais le coût des procédés mis en œuvre ne les rend accessibles que pour les applications spatiales[23].

La filière silicium représente actuellement 99% du marché des modules photovoltaïques. Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique. On trouve plusieurs technologies pour le photovoltaïque siliciums détaillés ci-après; d'une part les cellules à base de

silicium massif (monocristallin. polycristallin. rubans) dites de première génération, et qui constituent à l'heure actuelle l'essentiel des modules photovoltaïques commercialisés et d'autre part la technologie à base de silicium en couche mince [24].

II-4.2 Première génération

II-4.3 Silicium monocristallin

Il existe deux méthodes par lesquelles il est possible d'obtenir du silicium monocristallin de qualité microélectronique, mais nécessitant cependant une dépense d'énergie considérable, proche du MWh [12].

II-4.4 Méthode Czochralski

Le **procédé de Czochralski** (prononcé « Tchokhralski »), développé en 1916 par le chimiste polonais Jan Czochralski, est un procédé de croissance de cristaux monocristallins de grande dimension (plusieurs centimètres). Ces monocristaux « géants » sont utilisés dans l'industrie électronique (cristaux semi-conducteurs de silicium dopé), pour les études métallurgiques et pour des applications de pointe. On peut aussi faire croître des gemmes artificielles.

La méthode consiste en une solidification dirigée à partir d'un germe monocristallin de petite taille. On part du matériau fondu à une température juste au-dessus du point de fusion, avec un gradient de température contrôlée. Le germe est placé dans une « navette » suspendue au-dessus du liquide par une tige. Le liquide se solidifie sur le germe en gardant la même organisation cristalline (épitaxie) au fur et à mesure que l'on tire le germe vers le haut tout en le faisant tourner (à vitesse très lente). L'opération se passe sous atmosphère neutre (argon ou azote) pour éviter l'oxydation [25].

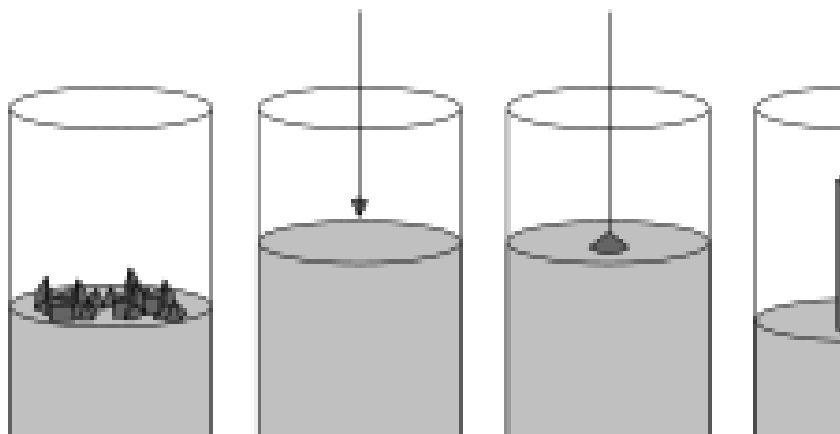


Figure II-4: Méthode de cz

II-4.5 Méthode de la zone fondue flottante ou fusion de zone

La méthode de la zone fondue (également appelée technique de la zone fondue, fusion de zone ou raffinage par zone fondue et désignée en anglais par les termes *zone melting* et *zonerefining*) est une technique permettant de purifier des composés cristallisés stables à la fusion. L'avantage de

cette technique est qu'elle peut permettre d'obtenir de très hauts degrés de pureté (99,999 % en masse pour le silicium¹, par exemple). Elle a été inventée dans les années 1950 par W. G. Pfann.

La méthode est principalement appliquée aux métaux, semi-conducteurs, ou autres composés inorganiques (oxydes, intermétalliques, etc.)³. Quelques applications existent pour les composés organiques⁴, mais elles restent toutefois peu nombreuses en raison de leur faible stabilité à l'état fondu.

Le phénomène physicochimique sur lequel se fonde la méthode existe dans la nature⁵, mais de façon extrêmement limitée.

II-5 Principe de la technique

La fusion de zone consiste à générer une zone fondue sur un échantillon de solide à purifier (appelé "lingot"), et à déplacer de façon très lente cette zone d'une extrémité à l'autre du lingot. L'échantillon à purifier présente généralement une géométrie cylindrique ou parallélépipédique.

Selon la différence de solubilité des impuretés de l'échantillon entre la phase fondue et la phase solide, elles peuvent être déplacées aux différentes extrémités du lingot. À chaque déplacement élémentaire de la zone fondue, la fraction élémentaire de solide qui recristallise présente une concentration en impureté différente de la phase fondue, d'où la possibilité de déplacer les impuretés dans l'échantillon grâce au déplacement de la zone liquide.

Généralement, un passage unique de zone fondue ne permet pas d'obtenir une purification intéressante pour les applications visées. Néanmoins, des passages répétés permettent d'accentuer le phénomène de concentration des impuretés aux extrémités du lingot, permettant de rendre la partie centrale de l'échantillon beaucoup plus pure.

Dans les échantillons inorganiques, la zone fondue est généralement créée par induction électromagnétique ou chauffage laser/infrarouge. Pour les échantillons organiques, le lingot est généralement fondu et resolidifié dans un tube cylindrique de verre amorphe ou cristallin. La zone fondue est ainsi souvent générée par une résistance électrique annulaire qui entoure le cylindre.

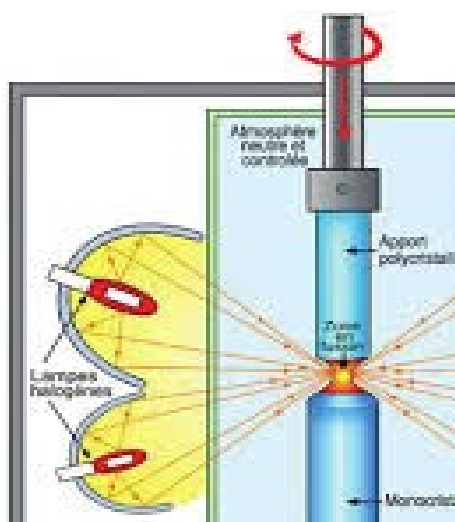


Figure II-5: Technique de la fusion de zone



Figure II-6: Silicium monocristallin

II-5.1 Silicium polycristallin (Multicristallin)

La majorité des modules photovoltaïques sont à base de silicium polycristallin (poly c-Si), plus souvent appelé silicium multicristallin (mc-Si). L'intérêt du silicium multicristallin est au niveau de coûts de production plus faibles, du fait de l'utilisation de procédés de coulage des lingots en blocs, beaucoup plus rapides et moins coûteux en énergie que dans le cas de la synthèse de monocristaux Cz ou FZ (24 à 48 h contre quelques semaines pour ces derniers).

Une variante de la technologie de croissance par coulage de mc-Si, le procédé Polix de EDFPW, est représentée figures I-4. Des blocs de plus de 450 kg sont ainsi obtenus par refroidissement contrôlé du silicium en fusion dans un moule de nature appropriée (souvent en quartz).

Afin de diminuer le bilan énergétique de la croissance de lingots de silicium, des matériaux mc-Si produits par coulée continue en creuset électromagnétique (EMG) ont été développés au Japon et en France. Par ailleurs, des recherches importantes sont menées sur les procédés de purification du silicium à partir du silicium métallurgique, obtenu par carboréduction de la silice et dont la pureté de 99 % est incompatible avec l'obtention de propriétés électroniques suffisantes. Il faut pour cela réduire la concentration des impuretés métalliques en particulier à quelques parties pour million (ppm), par distillation et condensation par l'intermédiaire de chlorosilane dans le cas de l'électronique et de la filière monocristalline (exemple du procédé Siemens).



Figure II-7: Silicium polycristalline

Dans le cas de la filière mc-Si, on part d'un silicium moins pur que pour le mono c-Si, déchets de silicium électronique et silicium métallurgique, que l'on fond dans un creuset en quartz recouvert d'une couche de nitrure de silicium (pour faciliter le démoulage). Ensuite, grâce à un gradient de température contrôlé entre le haut et le bas du creuset, le silicium liquide se solidifie donnant naissance à un lingot avec des grains de silicium de plusieurs centimètres [26].

II-5.2 Deuxième génération : filière couches mince

II-5.3 Silicium nanocristallin et amorphe

Les cellules à base de silicium amorphe sont basées sur l'empilement de base constitué par une couche de type p, une couche non dopée dite intrinsèque et notée i, et une couche de type n.

Ces structures pin sont déposées directement sur le support à basse température (200 °C ou moins) à partir de la méthode de dépôt chimique en phase vapeur assistée par plasma (appelée PECVD pour plasma enhanced-CVD), par décomposition du gaz silane (SiH_4). Il s'agit de technologies largement similaires à celles utilisées dans le domaine des écrans plats. Les cellules solaires au silicium amorphe, à l'origine cantonnées dans des marchés de niches (exemple : calculettes) ont élargi leur champ d'application dans le domaine des modules souples que l'on peut déployer sur les grandes toitures, fabriqués par les technologies en rouleau (roll to roll) sur des supports plastiques ou métalliques, et dans celui des supports verre de grande surface pouvant aller jusqu'à près de $5,7 \text{ m}^2$ d'un seul tenant.

Ce matériau semi-conducteur est couramment utilisé pour réaliser certains panneaux solaires photovoltaïques.

II-5.4 Description

L'atome de silicium est tétravalent, il forme donc quatre liaisons covalentes avec ses voisins. Dans sa forme cristalline, le silicium adopte la structure diamant, comme le carbone et le germanium, formant ainsi un cristal ordonné.

Le silicium amorphe se caractérise par l'absence d'ordre à longue portée : les atomes forment plutôt un réseau aléatoire continu dans lequel certaines liaisons ne sont pas satisfaites ; on parle alors de liaisons "pendantes". Dans un réseau aléatoire continu, la distance interatomique, les angles entre les liaisons covalentes ainsi que les angles dièdres ne sont pas fixes mais suivent plutôt une distribution. Il est possible d'obtenir des informations sur ces distributions en construisant la fonction de distribution radiale du silicium amorphe à partir des expériences de spectroscopie à rayons X.

Les liaisons pendantes sont des défauts cristallins qui sont notamment responsables de l'altération des propriétés électroniques du matériau. Il est possible de réduire la densité de ces défauts de plusieurs ordres de grandeur en traitant le silicium amorphe à l'hydrogène pour former du silicium amorphe hydrogéné, généralement abrégé a-Si:H, présentant suffisamment peu de défauts résiduels pour pouvoir être utilisé dans des composants électroniques. L'hydrogène est cependant une impureté associée à la photodégradation du silicium par effet Staebler–Wronski.

II-5.5 Propriétés

La densité du silicium amorphe est de $4,90 \times 10^{22}$ atomes/cm³ ($2,285 \text{ g/cm}^3$) à 300 K (calculée à partir de couches minces de 5 µm d'épaisseur), ce qui est $1,8 \pm 0,1$ % moins dense que le silicium cristallin à la même température¹. C'est l'un des rares matériaux qui a une densité plus basse à l'état solide qu'à l'état liquide, tout comme l'eau Silicium.

II-5.6 amorphe hydrogéné

Le silicium amorphe non hydrogéné a une très haute densité de défauts de coordination, ce qui entraîne des propriétés indésirables comme la difficulté de dopage, pourtant crucial dans la modulation des propriétés des semi-conducteurs, ou encore une faible photoconductivité. En introduisant de l'hydrogène lors de la fabrication du silicium amorphe, la photoconductivité s'améliore significativement et le dopage devient possible.

Le silicium amorphe hydrogéné a été fabriqué pour la première fois en 1969 par Chittick, Alexander et Sterling par déposition. Le matériau ne se caractérisait pas une plus faible densité de défauts et une plus grande conductivité grâce aux impuretés. À partir des années 1970, le a-Si:H a été développé en cellules photovoltaïques dont l'efficacité a augmenté jusqu'à 13,6 % en 2015.



Figure II-8:Silicium amorphe

II-5.7 Silicium en ruban (ribbon) autosupporté

Les techniques de production de silicium en rubans autosupportés ont été très séduisantes sur le plan technologique. Plusieurs procédés ont été développés. Ces rubans ont connu de nombreux développements au niveau de la recherche et, pour certains d'entre eux, jusqu'à la conception de chaînes de production préindustrielles. La plus connue est basée sur l'effet de la capillarité entre deux lèvres de carbone. Ce procédé, illustré sur la figure I-5(a), a été initié aux USA par Mobil-Tyco dans les années 1975, puis transféré en Allemagne par RWE Schott Solar. D'autres méthodes utilisent des techniques de croissance de ruban sur un film ou une maille de carbone. C'est le cas de la société SOLARFORCE en France qui utilise comme support de croissance un ruban de graphite (figure I-5(b), procédé RST), et qui permet de déposer des rubans de silicium de part et d'autre du graphite. Le principal avantage de la méthode RST est l'obtention de silicium ruban très mince ($< 100 \mu\text{m}$), permettant ainsi un gain matière très important.

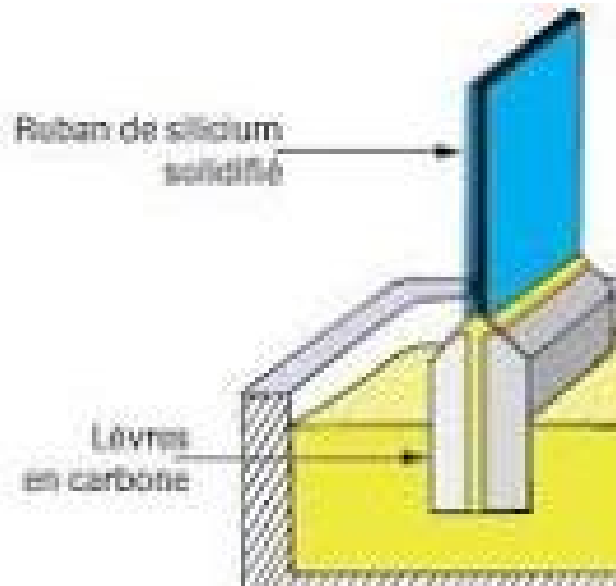


Figure II-9: Procédés de production du silicium en ruban.

Cependant, la vitesse de croissance linéaire est lente, généralement de quelques cm/min à quelques dizaines de cm/min. La vitesse optimale est imposée par les critères de solidification qui imposeront la taille des grains, la pureté du matériau par la ségrégation des impuretés, la déformation et les contraintes dans les plaquettes.

II-5.8 Cellules à base de tellure de cadmium CdTe

Les cellules à base de CdTe sont également basées sur la formation de jonction p-n mais cette fois-ci par la mise en contact de deux matériaux différents, on parle alors d'hétérojonction. La couche n est un semi-conducteur de grande bande interdite (le CdS avec l'énergie du gap E_g 2,4 eV), qui laisse passer la lumière. On parle alors de couche fenêtre. Les photons sont ensuite absorbés dans la couche de CdTe de type p, appelée absorbeur. La valeur 1,45 eV de la bande d'énergie interdite du CdTe est idéalement adaptée au spectre solaire. En outre, son très grand coefficient d'absorption fait que la quasi-totalité du spectre est absorbée sur une profondeur de 2 μm autorisant ainsi l'utilisation de matériaux relativement impurs, dont la longueur de diffusion des porteurs minoritaires ne dépasse pas quelques μm .

II-5.9 Matériaux à base de sélénure de cuivre indium gallium

La fabrication des couches de CIS est plus complexe que celles du CdTe du fait de leur caractère ternaire, voire quaternaire (avec le gallium, CIGS), ce qui a nécessité une mise au point plus longue. La contrepartie positive de cette complexité est une grande flexibilité concernant l'optimisation des propriétés. On peut ainsi fixer de façon très modulable, non seulement le gap mais également les autres propriétés (affinité électronique, travail de sortie), en substituant partiellement l'indium avec du gallium, de l'aluminium ou le sélénium par du soufre. L'absorbeur est le CIGS et les couches fenêtres et d'OCT sont constituées de sulfure de cadmium, zinc ou indium (en substitution potentielle du cadmium) et d'oxyde de zinc, dopé aluminium, tandis que le contact arrière est constitué par une couche de molybdène.

II-5.10 Troisième génération

La disponibilité des matériaux peut être un autre facteur limitant, l'un des inconvénients majeurs des cellules CIGS provient du fait que le sélénium, l'indium et le gallium sont des matériaux dont les ressources sont limitées. Cela entraîne évidemment des coûts de fabrication plus importants car ces

matériaux étant rares, ils sont chers. Ceci a par conséquent conduit à l'émergence d'une troisième génération de cellules solaires, encore au stade de développement mais aux perspectives prometteuses pour l'avenir proche.

II-6.1 Cellules multifonctions

Utilisant actuellement majoritairement des alliages dérivés de l'arséniure de gallium GaAs (dits III-V). Comme montre la figure I-6 :

- une première jonction à grande bande interdite permet de convertir efficacement les photons UV en minimisant les pertes par thermalisation.
- une seconde jonction située immédiatement derrière possède un gap plus petit et convertit alors de façon optimale les photons visibles qui traversent la première jonction.
- une troisième jonction à petit gap convertit les photons.

II-6.2 Cellules nanocristallines à colorant ou cellules de Grätzel

Pour les cellules à colorants, il s'agit d'une matrice poreuse inorganique, fonctionnalisée par le greffage de colorants photoactifs à l'échelle de la monocouche moléculaire et imprégnée par un électrolyte liquide contenant un couple oxydoréducteur permettant de communiquer « électriquement » avec la molécule de colorant.

Le système de référence est constitué d'une couche d'oxyde de titane (TiO₂) frittée dont les particules sont de taille nanométrique, une molécule de colorant à base de ruthénium et un électrolyte non aqueux (acétonitrile) contenant le couple redox iode-iodure.

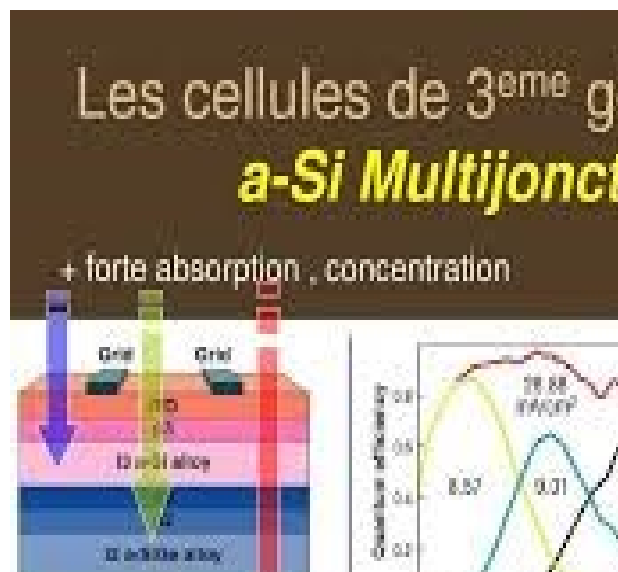


Figure II-10: Vue schématique de la composition de la cellule à multi-jonction

II-6.3 Cellules organiques

Une des filières émergentes est celle des cellules tout organiques. Dans ce cas, on se sert de la propriété semi-conductrice de certains polymères, permettant ainsi de créer des jonctions analogues aux jonctions p-n, et donc d'en faire des cellules solaires. Le saut a été franchi avec l'idée de mélanger intimement deux matériaux organiques permettant ainsi aux excitons (paires électron-trou créées lors de l'excitation lumineuse) d'être plus facilement séparés aux nombreuses interfaces. Le concept de cellules organique à jonction interpénétrée était né (Bulk Heterojunction). Le système de base montré sur la figure est celui où le donneur est constitué par des molécules de fullerène fonctionnalisées et l'accepteur est un polymère dérivé du polythiophène [25, 28].

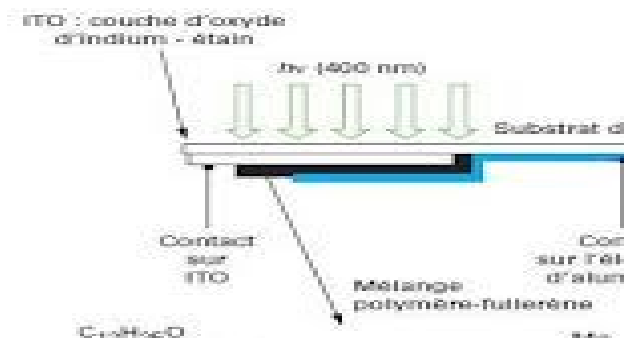


Figure II-11: Cellule organique

On peut résumer les rendements des cellules au tableau suivant :

Type	Rendement cellule en labo	Module en labo	Module commercial	Niveaux de développement
		Première génération		
Silicium monocristallin	24,70%	22,70%	12-20%	Production industrielle
Silicium polycristallin	20, 30%	16,30%	11-15%	Production industrielle
		Deuxième génération		
Silicium amorphe	13,40%	10,40%	5-9%	Production industrielle
silicium cristallin en couche mince	10,20%	9 ,40%	7%	Production industrielle
CIS	19, 30%	13,50%	9-11%	Production industrielle
CdTe	16,70%	11,30%	6-9%	Production industrielle
		Troisième génération		
Cellule organique	5,70%			Stade de la recherche
Cellule de Grätzel	11%	8,40%		Stade de la recherche
Cellule multi-jonction	39%	25-30%		Au stade de la recherche de production

Tableau II-1 : Différentes technologies photovoltaïques

II-6.4 Puissance et caractéristique d'une cellule PV

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc..), la puissance électrique P disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque (figure) est égale au produit du courant continu fourni par une tension continue donnée V :

$$P = V \cdot I$$

P : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV.

V : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

I : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV.

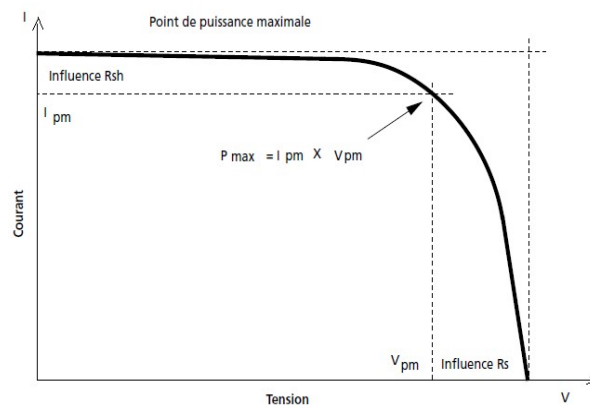


Figure II-12: Puissance maximum d'une cellule PV

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum idéale P_i correspondrait donc à la tension de circuit ouvert V_{CO} multipliée par le courant de court-circuit I_{CC} (figure) :

$$P_i = P_{max\ idéal} = V_{co} \cdot I_{cc} \quad (II-3)$$

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule PV est plus "arrondie", et la tension au point de puissance maximum $V(P_{max})$ est inférieure à la tension de circuit ouvert V_{CO} , de même que le courant fourni $I(P_{max})$ est inférieur, pour cette même tension, au courant de court-circuit I_{CC} .

$$P_{max} = V_m \cdot I_m \quad (II-4)$$

II-6.5 Facteur de forme

Le facteur de forme représente l'efficacité de la cellule ou encore, il peut nous renseigner sur le vieillissement de la cellule. C'est le rapport entre la puissance maximale débitée P_{max} et la puissance idéale P_i . Le facteur de forme FF (en angl. File Factor) correspond au rapport .

$$FF = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{v_{max} \cdot I_{max}}{v_{oc} \cdot I_{cc}} \quad (II-5)$$

II-6.6 Rendement de la conversion d'énergie

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_0 qui est normalisée à 100 mW cm^{-2} pour un spectre de AM1.5. On appelle rendement maximal, le rapport entre la puissance maximale et la puissance P_0 :

$$\eta_m = \frac{v_m I_m}{P_0} = FF \frac{v_{oc} I_{sc}}{P_0} \quad (\text{II-6})$$

II-7 Module photovoltaïque

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt (0,6 V). Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module ou panneau. Les connexions en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant. La mise en parallèle des cellules accroît le courant en conservant la tension.

Les cellules sont connectées entre elles par des fins rubans métalliques, des contacts en face avant (-) au contact en face arrière (+)

II-7.1 Assemblage du module photovoltaïque

II-7.2 Connexion des cellules photovoltaïques

Une fois les cellules photovoltaïques opérationnelles, il faut encore les connecter les unes aux autres. On soude et on encapsule donc de **48 à 72 cellules** entre une plaque de verre trempé et une couche de polymères, avant de les encadrer par de l'aluminium.

II-7.3 interconnexion

ces cellules sont soudées les unes aux autres traditionnellement sur leur face avant (il existe aussi des panneaux dont les soudures sont faites sur la face arrière, ces panneaux sont appelés "back contact", ils offrent en général un rendement supérieur de 10% grâce à la surface économisée sur la face avant), cette étape est appelée l'interconnexion chapelet. Elle permet le regroupement des puissances des cellules.

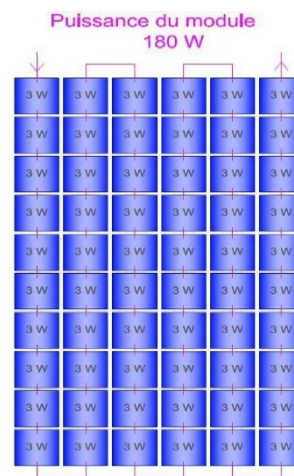
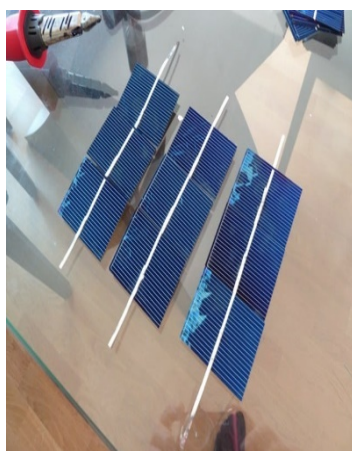


Figure II-13: Techniques de soudure des cellules solaires

II-7.4 Encapsulage

Les différentes structures d'un panneau solaire en EVA dans la mesure où une seule pièce de cellule solaire a une puissance de sortie trop petite pour répondre aux besoins en énergie conventionnels, elle doit être encapsulée sous forme de module solaire pour augmenter sa puissance de sortie. L'encapsulation est une étape clé dans la production de cellules solaires. Sans un bon processus d'encapsulation, même les meilleures cellules solaires ne peuvent pas produire de bons modules solaires. L'encapsulation de la cellule solaire assure non seulement la vie de la cellule solaire, mais améliore également la force d'attaque de la cellule solaire.

La qualité et la longévité du produit sont la clé pour obtenir la satisfaction du client. La qualité d'encapsulation des modules solaires est donc très importante.

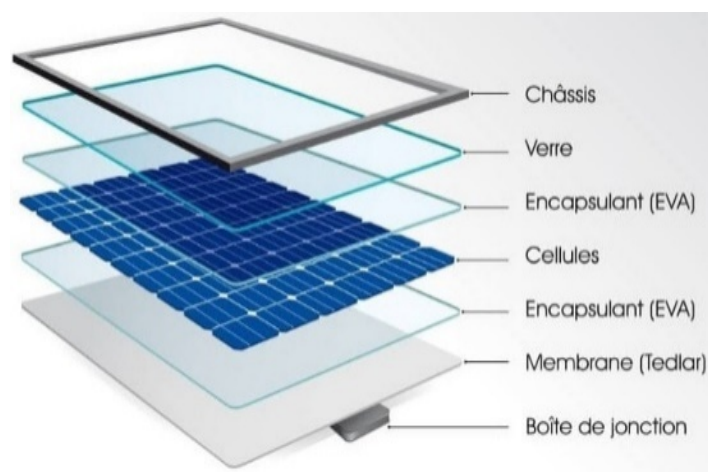


Figure II-14: Structure de l'encapsulation

II-7.5 Encadrement

L'encadrement est une structure généralement faite en aluminium, conçue pour protéger le module, elle encadre l'ensemble de la circonférence du module.



Figure II-15: Encadrement du module

II-7.6 Ajout d'un boîtier de jonction au dos du panneau solaire

Pour finir la fabrication et l'assemblage du module, il ne reste plus qu'à ajouter sur sa face arrière une boîte de jonction. C'est celui-ci qui permet le raccordement du panneau à l'onduleur central (ou le micro-onduleur), qui transforme le courant continu en courant alternatif directement utilisable pour alimenter vos appareils électriques.



Figure II-16: Boîtier de jonction

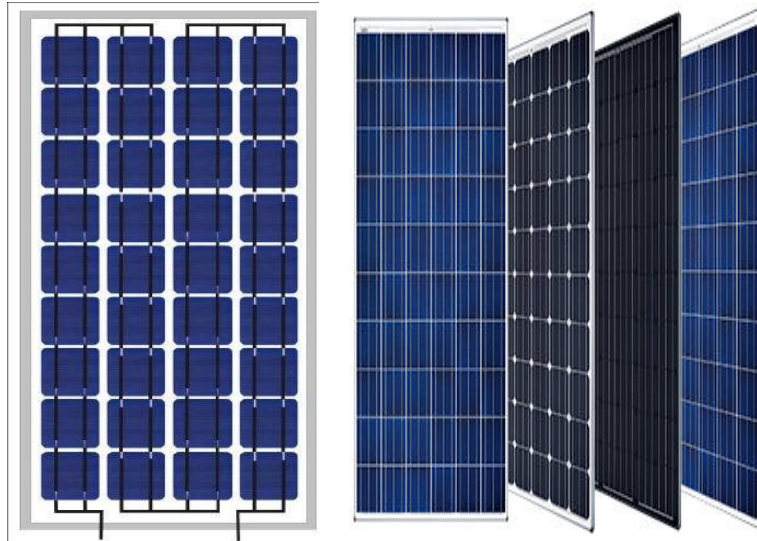


Figure II-17: Module ou panneau solaire photovoltaïque

Chapitre 3

Évaluation de l'énergie solaire en Afrique

III-1 Approche de base du PV_{SYST}

III-1.1 Logiciel PV_{SYST}

La nécessité d'un outil de dimensionnement d'installation photovoltaïque s'est faite sentir dès les premières réalisations à la fin des années 1980. Devant la croissance continue de cette branche ainsi que l'interdit accru des architectes pour les possibilités d'intégrer des Eléments photovoltaïques au bâtiment, une Equipe du Groupe de Physique Appliquée de l'Université de Genève a proposé le développement d'un logiciel de dimensionnement d'installations photovoltaïques.

Avec le soutien financier de l'Office fédéral de l'Energie, le logiciel PVSYST, programmé en TURBO PASCAL vit ainsi le jour. Ce logiciel fut ensuite constamment complet et améliore jusque dans sa version 7.3, encore en circulation en 2024. En 1997, une Etude anglaise sur les différents logiciels européens de simulation des systèmes photovoltaïques a relevé la grande qualité scientifique de PVSYST 2.2 tout ensoulignant son manque de convivialité et d'ergonomie ce qui le pénalisait fortement vis à vis de ses concurrents. Au vu de ces résultats, le Laboratoire d'Energie Solaire et de Physique du Bâtiment de l'EPFL initia le projet d'amélioration de PVSYST, en collaboration avec l'Université de Genève.

Le présent rapport présente les améliorations entreprises lors de ce projet. Le programme Psys est un logiciel de simulation de systèmes photovoltaïques, développé initialement par le groupe de Physique Appliquée (GAP) de l'université de Genève. Ce projet, associant le GAP et le Laboratoire d'Énergie Solaire de Lepel (LESO-PB), eut pour but de rendre ce logiciel, dont les qualités scientifiques sont largement reconnues, plus aisé à utiliser et donc accessible à un large public (architectes, Installateurs PV, Etudiants...).

La démarche a consisté à implémenter une nouvelle interface graphique simplifiée (clic, Drag& drop), une nouvelle navigation à deux niveaux (avant-projet, projet détaillé) et une aide en ligne qui permet une prise en main instantanée du programme. De nouvelles fonctionnalités ont été ajoutées, notamment un système expert simple permettant de concevoir très rapidement une installation réaliste à partir d'éléments du Marché et de contrôler la compatibilité des divers composants et de leur association. L'accueil des professionnels de la branche photovoltaïque a été très positif et a confirmé la validité des options prises pour la nouvelle interface [33].

III-1.2 Premier contact avec Pvsyst

Les systèmes autonomes sont toujours organisés autour d'un stockage sur batterie :

- Un générateur PV charge la batterie ou fournit directement son énergie à l'utilisateur.
- Les besoins de l'utilisateur (consommation) doivent être bien définis, avec son profil quotidien (c'est-à-dire en valeurs horaires).

À chaque heure, la simulation effectue un équilibrage entre la production PV (en fonction de l'irradiance) et les besoins de l'utilisateur. La différence doit être envoyée dans la batterie, soit positivement (charge), soit négativement (décharge).

Cet équilibre énergétique est contrôlé par un contrôleur. Le rôle du contrôleur est de gérer le flux d'énergie, principalement pour la protection de la batterie :

- Lorsque la batterie est pleine, le générateur photovoltaïque doit être déconnecté.

- Lorsque la batterie est vide, l'utilisateur doit être déconnecté.

De plus, le contrôleur peut gérer le démarrage d'un éventuel générateur de secours, lorsque la batterie est vide, et que la puissance solaire n'est pas suffisante.

Dans tous les cas, la reconnexion sera effectuée avec une hystérésis déterminée, en fonction de l'état de charge (SOC) de la batterie.

III-1.2 Très peu de systèmes autonomes (SSR : Systèmes solaires résidentiels) :

Il s'agit de petits systèmes (50 à 200 Wc) dont la consommation est très limitée (quelques lampes, radio-TV, ordinateur, pas de réfrigérateur).

Avec ces systèmes simples, le panneau PV (un ou plusieurs modules) est généralement connecté directement à la batterie, sans conditionnement d'énergie. Cela implique que les modules PV doivent être des modules "12V" ou "24V", c'est-à-dire avec 36 ou 72 cellules.

Ce type d'installation est géré par des contrôleurs simples, agissant soit en déconnectant la batterie, soit en court-circuitant les modules PV lorsque la batterie est pleine.

Ces contrôleurs ont toujours la possibilité de contrôler la charge lorsque la batterie est vide.

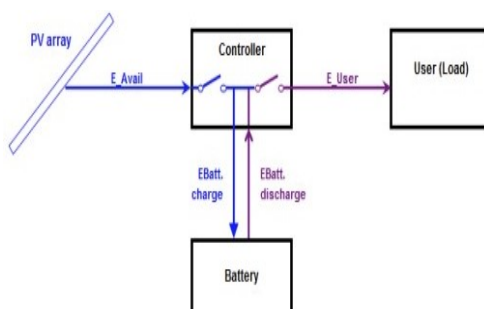


Figure III-1: Systèmes (50 à 200 Wc)

III-2 Systèmes de moyenne puissance (résidentiel, relais de communication)

Ces systèmes sont généralement compris entre 200 Wp et 2 kWp.

Le contrôleur comprend une unité de conditionnement de l'énergie, capable d'effectuer le suivi de la puissance maximale sur le réseau PV. Par conséquent, la tension du panneau photovoltaïque n'est plus liée à la tension de la batterie. La plupart du temps, le contrôleur est également capable d'assurer le contrôle de la charge, avec une capacité de courant limitée (généralement de l'ordre du courant de charge). Ces installations peuvent alimenter l'éclairage, les réfrigérateurs, les lave-linges, les lave-vaisselles, les petits outils électriques, etc. Elles peuvent également être utilisées dans certaines petites stations de communication isolées. L'énergie peut être utilisée comme énergie DC ou alimentée comme énergie AC à travers un onduleur. Actuellement, PVsyst n'implémente pas l'onduleur. La charge est spécifiée comme énergie, quelle

que soit la manière dont elle sera utilisée. De tels systèmes peuvent - rarement - être soutenus par un générateur de secours en cas de manque d'énergie. S'il est automatique, la commande de démarrage/arrêt du générateur doit être gérée par le contrôleur.

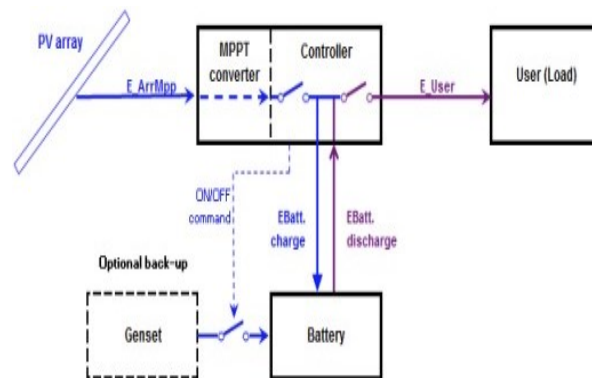


Figure III-2 : Systèmes 200 Wp et 2 kWp

Il peut s'agir de systèmes autonomes qui varient entre 2 kWc et plusieurs dizaines de kWc.

Ces installations utilisent un (ou plusieurs) "chargeurs solaires", équipés de convertisseurs MPPT, et des onduleurs de batterie DC/AC.

Le contrôleur n'est plus un dispositif unique : le contrôle de la charge est assuré par le chargeur solaire (parfois plusieurs en parallèle), et le contrôle de la décharge par l'onduleur. L'onduleur doit également gérer le générateur de secours, s'il y en a un.

Dans PVsyst, nous considérons le chargeur solaire comme étant le composant "contrôleur autonome". Pour des raisons historiques (et de simplification), ce composant PVsyst doit également contrôler la décharge et le générateur de secours. Mais comme les paramètres de ces fonctions ne sont pas définis dans les dispositifs physiques du "Chargeur solaire" (fiches techniques), les paramètres internes de ces contrôles (courant maximum, seuils, etc.) resteront dans le dialogue de ce composant, mais leurs valeurs seront définies dans le système. Leurs valeurs initiales seront adaptées à partir de la configuration du système et seront modifiables en fonction de l'onduleur réel utilisé, ou d'un autre dispositif de contrôle.

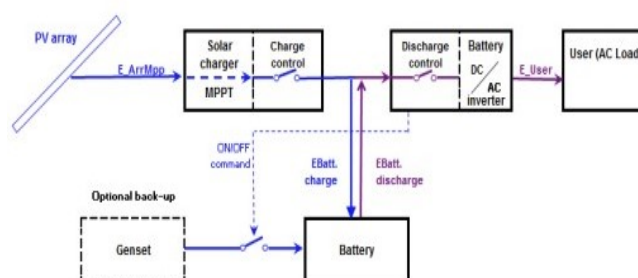


Figure III-3:Systèmes (à 2KWc à PLUS)

III-2.1 Procédure pour les systèmes autonomes

Ceci donne une procédure étape par étape pour définir un système autonome dans PVsyst.

III-2.2 Première étape :

Comme pour tout système PVsyst, vous devez spécifier l'orientation du générateur PV.

III-2.3 Deuxième étape

Il vous est demandé de définir les besoins de l'utilisateur.

Par défaut, pour les petits systèmes, cela est proposé sous la forme d'une liste d'appareils domestiques et de leur consommation (celle-ci peut être saisonnière ou mensuelle).

Pour les systèmes industriels ou plus importants, il existe de nombreuses possibilités de définir un profil de charge (y compris par une liste de valeurs horaires).

III-2.4 Troisième étape :

L'outil de prédimensionnement (en haut) fournit des conseils sur la puissance requise du banc de batteries et du générateur PV. Le calcul est basé sur vos fichiers météorologiques et les définitions ci-dessus. Vous devez définir :

- L'autonomie requise (généralement autour de 4 jours),
- la probabilité acceptable que les besoins ne soient pas couverts par le système (PLOL pour "probabilité de perte de charge »
- la tension nominale du parc de batteries.

Le programme effectuera alors un dimensionnement du système, de manière similaire à la section "Prédimensionnement".

Vous disposez également d'un bouton pour effectuer une étude de dimensionnement plus fine, pour différentes distributions météorologiques, ou en fonction du paramètre PLOL.

III-2.5 Quatrième étape :

Définir le pack de batteries, en choisissant un modèle de batterie (sur la page "Stockage").

Le programme proposera le nombre de batteries en série et en parallèle, en fonction des suggestions obtenues dans l'outil de prédimensionnement précédent.

Vous devez également définir les conditions de température de fonctionnement des batteries, en fonction de la mise en œuvre de votre système.

III-2.6 Cinquième étape :

Définir la configuration du générateur et la stratégie de contrôle (page "générateur PV")

- Validez les propositions de prédimensionnement (puissance prévue ou surface disponible),
- Choisir un modèle de module PV dans la base de données,
- Choisir la stratégie de contrôle (couplage direct, MPPT ou convertisseur DC-DC).

- Dans un premier temps, il est conseillé de choisir le "contrôleur universel", pour s'affranchir des conditions de contrôle spécifiques.
- Le programme détermine le nombre de modules en série et en parallèle, en fonction de la tension de la batterie ou des conditions MPPT et de la puissance PV requise.

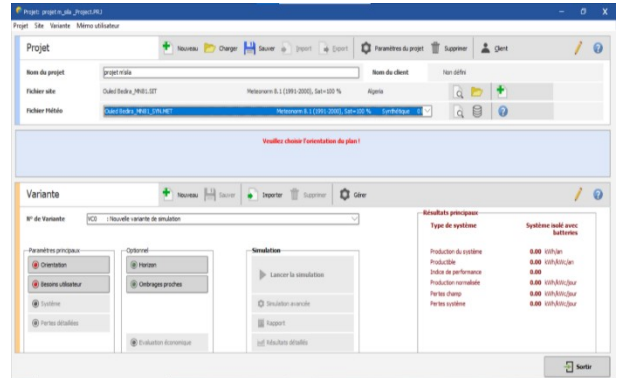
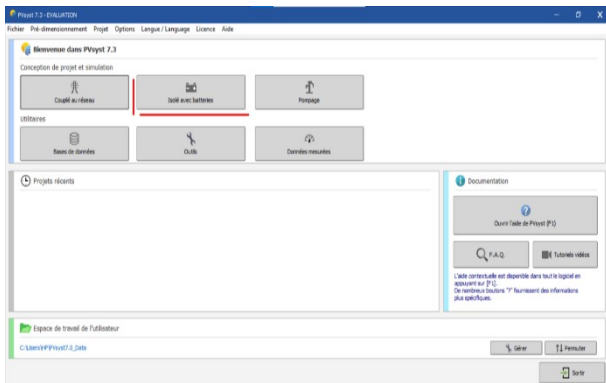


Figure III-4 : Interface de sélection de projet

III-3 Définir l'orientation

Créer la première variante (de base) pour ce projet

Après avoir défini le site et les données météorologiques du projet, vous pouvez procéder à la création de la première variante. Vous remarquerez qu'au début il y a 2 boutons marqués en rouge : "Orientation" et "Besoins de l'utilisateur". La couleur rouge signifie que cette variante du projet n'est pas encore prête pour la simulation : des données supplémentaires sont nécessaires. Les paramètres de base qui doivent être définis pour toutes les variantes et qui ne sont pas encore spécifiés sont l'orientation des panneaux solaires, les besoins de l'utilisateur, le type et le nombre de modules PV, le type et le nombre de batteries qui seront utilisés.

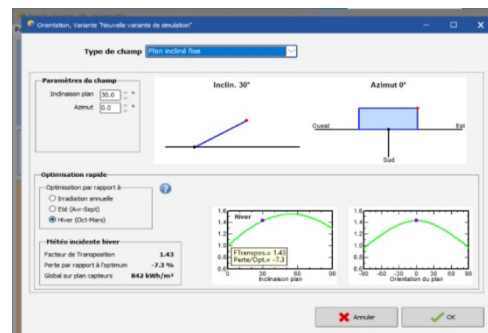
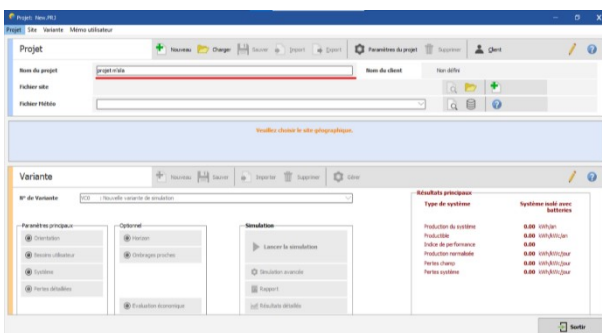


Figure III-5: Interface d'orientation

Il s'agit d'un outil visant à montrer l'orientation la plus appropriée pour un système photovoltaïque, ou ce que vous perdez lorsque l'orientation n'est pas optimale.

Le facteur de transposition est le rapport entre l'irradiation incidente sur le plan et l'irradiation horizontale. C'est-à-dire ce que vous gagnez (ou perdez) en inclinant le plan du collecteur.

Veillez noter que l'optimisation de l'orientation dépend de l'utilisation prévue de l'énergie photovoltaïque.

- Pour les systèmes autonomes, le rendement solaire pertinent pour le dimensionnement du système peut être, par exemple, les mois d'hiver pour une maison ou un système industriel, ou certains mois spécifiques pour les appareils de loisirs.

Par conséquent, cet outil offre la possibilité de choisir la période d'optimisation : Année, Hiver, Été, ou mois choisis.

En outre, l'optimisation peut dépendre de conditions spécifiques d'ombrage lointain (montagnes) : vous pouvez définir une ligne d'horizon, ce qui entraînera généralement un déplacement d'azimut.

III-3.1 Définition de base des besoins de l'utilisateur

Il s'agit maintenant de définir les besoins de l'utilisateur. Plusieurs options sont possibles :

- Utilisation d'un profil de consommation disponible dans la base de données
- Importer un profil de consommation au format CSV
- Utiliser l'interface de définition des besoins de l'utilisateur

Nous allons utiliser l'interface de définition des besoins de l'utilisateur afin de vous donner des clés pour personnaliser la définition de vos besoins énergétiques.

Pour compléter vos besoins énergétiques, vous devez dans tous les cas cliquer sur l'onglet "Besoins de l'utilisateur".

Une fois le menu "Besoins de l'utilisateur" ouvert, commencez par définir la fréquence de vos besoins.

Vous pouvez choisir la répartition de votre consommation entre :

- Années
- saisons
- Mois

De même, vous pouvez choisir le nombre de jours relatifs à votre consommation.

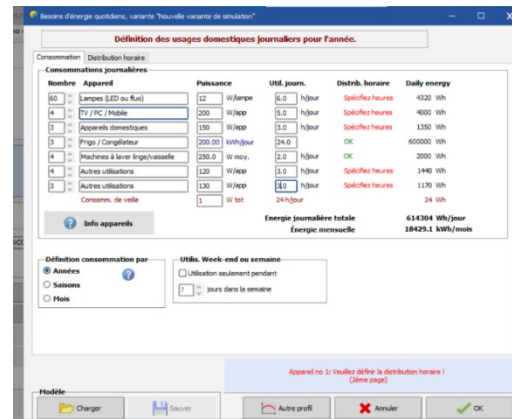
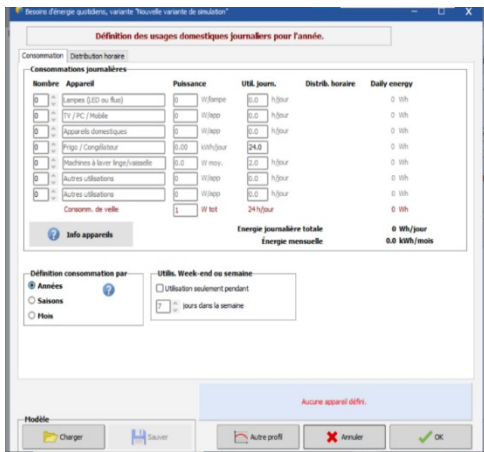


Figure III-6: Interface de calcul de puissance

L'étape suivante consiste à compléter le tableau de la consommation quotidienne.

Pour ce faire, vous devrez définir :

- Le nombre d'appareils correspondant à la désignation
- La puissance unitaire en Watts
- Le temps de fonctionnement quotidien

Vous pouvez modifier / personnaliser le nom de chaque appareil dans la section « Appareil ».

Veillez noter que nous ne parlons pas de puissance unitaire, mais de l'énergie consommée (en kWh / jour).

Une fois la définition de vos besoins énergétiques terminée, vous disposez d'un bilan de l'énergie totale quotidienne et mensuelle consommée par vos appareils.

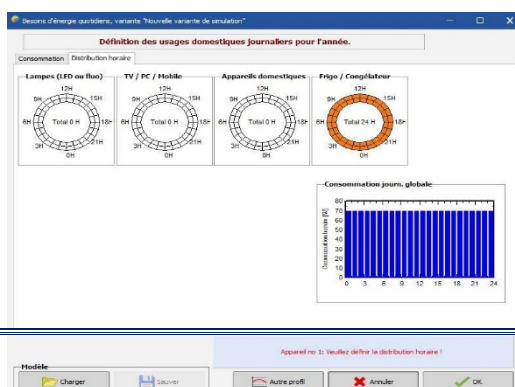
Vous pouvez constater que nous avons ajouté 24 watts sur 24 heures pour les consommateurs en mode veille. En effet, lorsque vos appareils sont éteints, très souvent une lampe de veille ou autre reste allumée.

Il est donc nécessaire de définir cette consommation afin d'obtenir un dimensionnement plus proche de la réalité.

Plusieurs messages d'erreur en rouge indiquent que vous n'avez pas terminé de définir vos "Besoins d'utilisateur".

En effet, maintenant que vous avez défini les appareils et leur puissance, vous devez saisir les plages horaires de fonctionnement de ces appareils. Il est important que ces plages horaires soient correctement remplies car c'est avec ces éléments que le dimensionnement du champ photovoltaïque et du pack batterie sera calculé par l'outil de " pré-dimensionnement ".

Lorsque vous cliquez sur l'onglet "distribution horaire", les cadrans respectifs de vos appareils seront



vides. Seul le cadran des systèmes de réfrigération sera préalablement complété (évidemment modifiable en fonction de votre projet).

Figure III-7 : Interface de temps de fonctionnement

Chaque cadran est composé de 48 sections. Chaque section représente 30 minutes de la journée. Pour définir un horaire ou une plage horaire, vous pouvez le faire en cliquant le bouton gauche de la souris. Pour supprimer un horaire ou une plage horaire, vous pouvez le faire en cliquant le bouton droit de votre souris.

Lorsque vous ajoutez une plage horaire, un graphique correspondant à votre profil de consommation journalière est automatiquement construit.

De plus, si la valeur de l'heure de fonctionnement positionnée dans les cadrans ne correspond pas à l'utilisation quotidienne définie dans l'onglet "Consommation", la valeur définie dans les cadrans de l'onglet "Répartition horaire" sera utilisée pour les calculs. Une fois la répartition horaire effectuée, vous pouvez revenir à l'onglet "Consommation" pour vérifier si un changement de valeur a été effectué et si aucun message d'erreur n'apparaît. Lorsqu'il n'y a plus de message en rouge ou de message d'erreur, vous pouvez valider ces informations en cliquant sur OK.

Tous ces paramètres d'entrée seront affichés dans le rapport PDF final.

III-3.2 Définir le système

Une fois terminée la définition de l'orientation du système et de vos besoins d'utilisateur, l'onglet "Système" devient rouge, ce qui signifie que vous pouvez cliquer dessus pour définir votre système électrique.

- Les caractéristiques du pack de batteries.
- Les caractéristiques du champ photovoltaïque
- Les caractéristiques du régulateur de charge/décharge

Vous pouvez ajouter un système de générateur optionnel via l'onglet "Appoint"

Dans cette première fenêtre, plusieurs informations importantes :

- Prédimensionnement
- Définitions du pack batteries
- Température de fonctionnement de la batterie

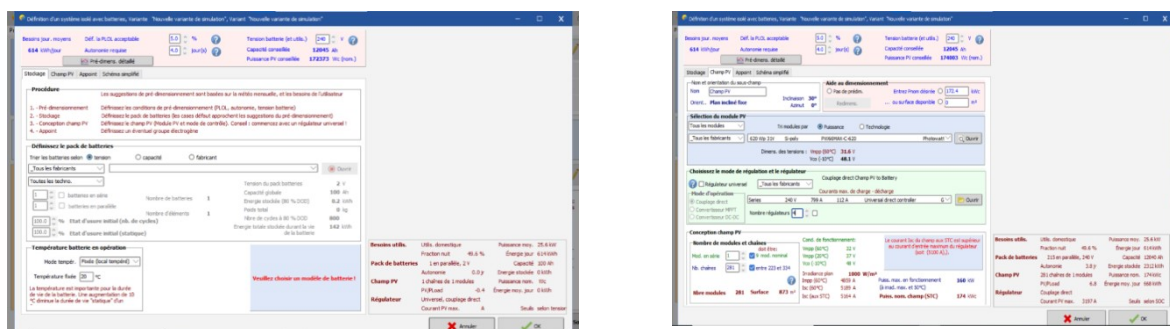


Figure III-8 : Interface de définition du système panneaux et batteries

L'outil de prédimensionnement calcule deux informations :

- Capacité conseillée (batterie) en Ah
- Puissance PV conseillée en Wc

PLOL en % :

Cette valeur représente la probabilité que les besoins de l'utilisateur ne puissent pas être satisfaits (c'est-à-dire la fraction de temps pendant laquelle la batterie est déconnectée en raison de la sécurité du régulateur "Charge faible").

Elle peut être comprise comme le complément de la "fraction solaire" (bien qu'elle soit décrite en termes de temps plutôt que d'énergie).

Au cours du processus de dimensionnement, l'exigence LOL permet de déterminer la taille du champ photovoltaïque nécessaire, pour une capacité de batterie donnée.

Le LOL est calculé à l'aide d'une simulation annuelle simplifiée et rapide : le programme divise les valeurs météorologiques mensuelles en une séquence aléatoire réaliste de 365 jours (selon le modèle Collares-Pereira), chaque jour étant divisé en 3 périodes : matin - jour (avec gains solaires) - et soir. Ensuite, il effectue un bilan jour par jour, et rapporte l'état quotidien du système, afin d'accumuler une valeur annuelle réaliste "LOL".

Ce processus est répété avec différentes tailles de panneaux photovoltaïques, afin de trouver la taille exacte correspondant au "LOL" requis.

III-3.3 Autonomie requise en nombre de jour(s) :

Dans le processus de prédimensionnement, la capacité du pack batterie proposé est déterminée en fonction de l'autonomie requise du système, donnée en nombre de jours.

L'autonomie est définie comme le temps durant lequel la charge peut être effectuée par la batterie seule, sans aucun apport solaire, en partant bien sûr d'un état de batterie "complètement chargée". Avec des charges non constantes (définition saisonnière ou mensuelle, utilisation hebdomadaire), ceci est pris en compte comme le pire scénario sur l'année.

Le calcul prend en compte le seuil de déconnexion du SOC minimum, ainsi que le "rendement énergétique" de la batterie.

Il doit également appliquer une correction de capacité, car ce mode d'utilisation se produit généralement à un taux de décharge plutôt lent (correspondant donc à peu près à la définition de capacité C100, c'est-à-dire avec une décharge sur une période de 100 heures environ) ; alors que la capacité nominale des batteries dans la base de données PVsyst est définie comme la valeur C10. Le rapport C100/C10 est généralement de l'ordre de 120% à 130%.

Ces 3 paramètres de dimensionnement sont réglables dans l'onglet "paramètre caché".

NB : Lors de la définition d'une très grande autonomie, le processus d'optimisation globale du système choisira la taille PV "minimale" qui répond juste au "LOL" requis.

Cela peut conduire à une valeur d'état de charge moyenne très basse sur de grandes périodes de l'année, ce qui est relativement dommageable pour la batterie.

III-3.4 Tension de la batterie (utilisateur) :

Dans un système PV autonome avec couplage direct à l'utilisateur (sans onduleur), la tension de la batterie détermine la tension de distribution. De nos jours, de nombreux appareils à courant continu sont disponibles en 24V ou en 12V, ce choix doit être fait en fonction de la puissance du système et/ou

de l'appareil, ainsi que de l'extension du réseau de distribution prévu pour minimiser les pertes ohmiques du câblage.

Ce choix doit être fait dès le début de la planification d'une installation, car la tension existante de l'appareil ne peut généralement pas être modifiée, et les convertisseurs de tension seront coûteux et pas à 100% efficaces.

Les valeurs nominales de distribution peuvent être choisies en fonction des critères suivants (on suppose que l'onduleur est directement connecté sur le pack de batteries) :

- 12V : petits systèmes pour l'éclairage et la télévision :
 - Puissance maximale de l'appareil < 300 W
 - Courant correspondant 25 A
 - Onduleur : environ < 1 kW
- 24V : taille moyenne, ménage avec réfrigérateur et petits appareils, ou extension du câblage à plus de 10 m.
 - Puissance maximale de l'appareil < 1000 W
 - Courant correspondant 42 A
 - Onduleur : environ < 5 kW
- 48V : utilisation industrielle ou agricole spéciale
 - Puissance maximale de l'appareil < 3 kW
 - Courant correspondant 62 A
 - Onduleur : environ < 15 kW

Des puissances plus élevées nécessitent soit des tensions continues élevées (appareils spéciaux), soit une alimentation en courant alternatif via un onduleur.

NB : Dans un pack de batteries, lorsqu'une cellule est plus faible que les autres, elle se vide plus tôt.

Comme toutes les cellules sont connectées en série, c'est-à-dire avec le même courant, elle peut subir des décharges profondes, ou même une polarisation inverse (le courant forcé peut inverser la polarité, comme pour le Hotspot dans un panneau photovoltaïque).

Cela endommagera encore davantage cette mauvaise cellule. De la même manière, durant la charge, la capacité diminuant, les conditions de surcharge produiront des gaz avant les autres cellules, entraînant une perte d'électrolyte.

Par conséquent, dans les packs de batteries haute tension, en l'absence d'une maintenance attentive ou de stratégies de compensation, le risque de défaillance est fortement accru.

III-3.5 Outil d'aide au prédimensionnement :

Avec cet outil, vous pouvez définir une surface ou une puissance maximale que vous souhaitez installer.

Lorsqu'une valeur est définie dans l'une des deux cases, le logiciel fait une suggestion de câblage via l'outil de conception de panneaux photovoltaïques.

III-3.6 Contrôleur universel

Au cours de la phase initiale de l'étude d'un système autonome, les principaux problèmes sont le dimensionnement global du système, c'est-à-dire la détermination du bloc de batteries, la puissance du générateur PV, en fonction des besoins de l'utilisateur et des conditions météorologiques. Après

l'évaluation rapide du prédimensionnement, les résultats (PLOL, énergie non utilisée) doivent être évalués par une simulation horaire détaillée.

La stratégie exacte du régulateur n'a pas d'importance. Pour se débarrasser des contraintes de contrôle, PVsyst introduit un contrôleur universel "générique" à usage général, pour les 3 différentes stratégies : Couplage direct, convertisseur MPPT ou convertisseur DC-DC.

Pendant le processus de dimensionnement (spécification du pack de batteries et du panneau PV), ces dispositifs spéciaux adapteront leurs paramètres au système, afin de toujours rester compatible avec un comportement normal sans pertes de contrôle pendant la simulation horaire.

III-3.7 principaux paramètres à adapter sont :

- Les seuils de contrôle : leurs valeurs par défaut sont spécifiées dans les "Paramètres cachés" en termes de SOC. Mais vous pouvez les modifier pour étudier la dépendance des seuils, et éventuellement les définir en termes de tension de la batterie.
- Corrections de température pour les seuils de tension de la batterie
- Avec les unités de conditionnement d'énergie, les tensions et les puissances d'entrée en fonction des modules de la matrice, ainsi que la courbe de rendement. Les valeurs de rendement (rendements Euro et Max) peuvent être explicitement modifiées.
- Les courants maximums de Charge, de Charge et de Back-up,
- La gestion de la commande de back-up si un Genset est spécifié.

Tous ces paramètres sont stockés dans votre variante de calcul, conservant ainsi vos modifications.

Si vous souhaitez conserver une configuration spécifique pour une utilisation ultérieure, vous pouvez toujours sauvegarder ce convertisseur universel avec les paramètres actuels. Dans ce cas, veuillez lui donner un nom significatif aux paramètres Fabricant et Modèle. Il est conseillé de l'enregistrer sous un nom tel que "Fabricant_Modèle.RLT" dans votre propre base de données.

III-3.8 Exécution de la première simulation

Sur le tableau de bord du projet, tous les boutons sont maintenant verts (parfois orange) ou éteints

Ici tout est vert le système

Le bouton "Simulation" est activé, et nous pouvons cliquer dessus

Une barre de progression apparaît indiquant la partie de la simulation qui reste à effectuer. Une fois la simulation terminée, le bouton "OK" devient actif. Lorsque vous cliquez dessus, vous accédez directement à la boîte de dialogue "Résultats".

Cette boîte de dialogue affiche en haut un petit résumé des paramètres de simulation que vous devez rapidement vérifier pour vous assurer que vous n'avez pas fait d'erreur évidente dans les paramètres d'entrée. A droite se trouve un cadre avec neuf valeurs qui résument d'un seul coup d'œil les principaux résultats de la simulation.

Elles ne donnent qu'une image grossière des résultats et sont là pour repérer rapidement les erreurs évidentes ou pour avoir une première impression d'un changement ou d'une comparaison entre les variantes du projet.

Le rapport de simulation donnera une description complète de notre système, avec tous les paramètres utilisés et les résultats est présentée sur la figure III.8

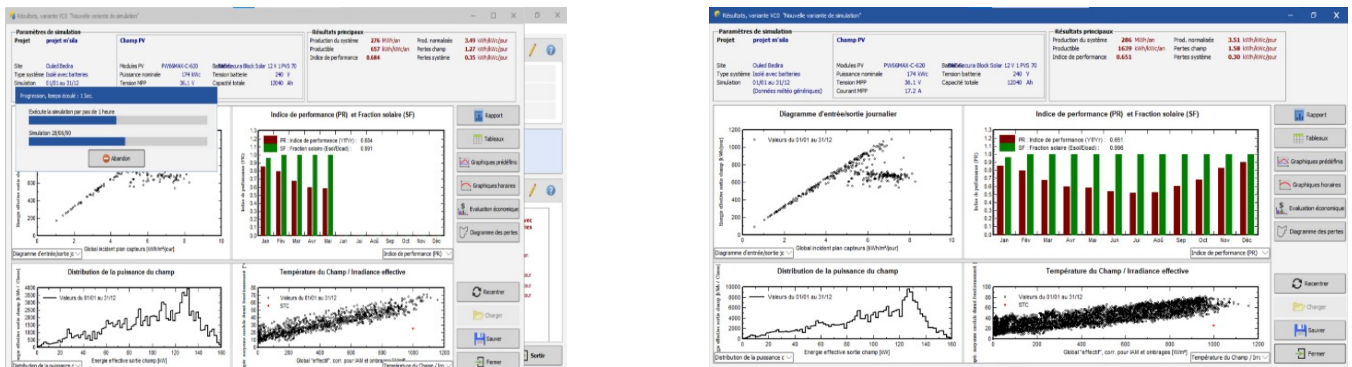


Figure III-9 : Rapport de simulation du PVSYS

III-4 Application aux quelques régions Africaines

III-4.1 Sites choisis

Le tableau III.1 représente les coordonnées géographiques des sites choisis pour notre étude.

REGION	Latitude (deg)	Altitude (m)	Longitude (deg)
M'sila	35,74 N	518	4,55 E
IN GAZZAM	21 ,80 N	484	2,59 E
Niamey	13,48 N	227	2,18 E
N'Djamena	12,75N	285	15,18 E
Kano	11,96 N	471	8,54E
JAMESTOWN	-15,92S	0	-5,72 W
GUINEE BISSEA	11,86 N	13	-15,60 W
SAO TOME ET PRINCIPE	0,34 N	7	6,73 E
SAHARA OCCIDENTAL LAAYOUNE	27,14 N	72	-13,19 W
REPUBLIQUE CENTRAFRIQUE BANGUI	4,36 N	337	18,55 E
COMORES MORONI	46,20 N	398	6,15 E
REPUBIQUE DE CONGO BRAZZAVILLE	46,20 N	398	6,15 E
LESOTHO MASERU	-29,32 S	1550	27,48 E
SOUDAN DU SUD	46,20 N	398	6,15 E
GUINEE EQUATORIAL MALABO	-3,43 S	1681	29,92 E
BURUDI GITEGA	-3,43 E	1681	29,92 E

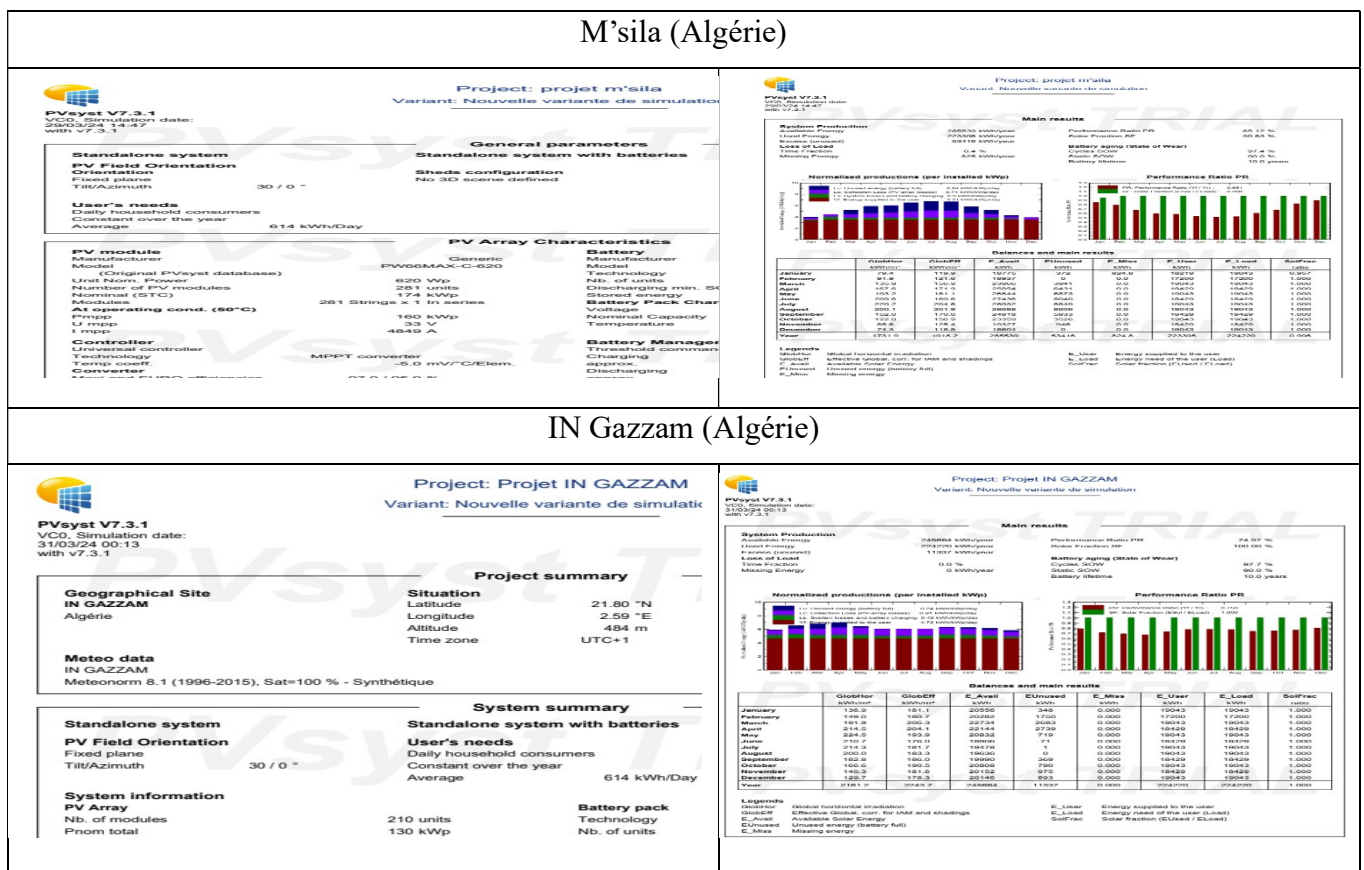
GABON LIBREVILLE	0,39 N	16	9,45 E
MALAWI LILONGWE	-13,97 S	1053	33,79 E
LA REUNION SAINT-DENIS	-20,88 S	37	55,45 E
ESWATINI LOBAMBA MBABANA	-26,47 S	687	31,20 E
GAMBIE BANJUL	13,45 N	4	-16,58 W

Tableau III-1: Coordonnées géographiques des sites

III-4.2 Résultats de simulation

III-4.3 Rapport de simulation

Le rapport de simulation des quatre villes types sont représentés dans la figure III.10.



Les valeurs du rayonnement solaire global estimé pour des différents sites type sont représentées dans la figure III.11.

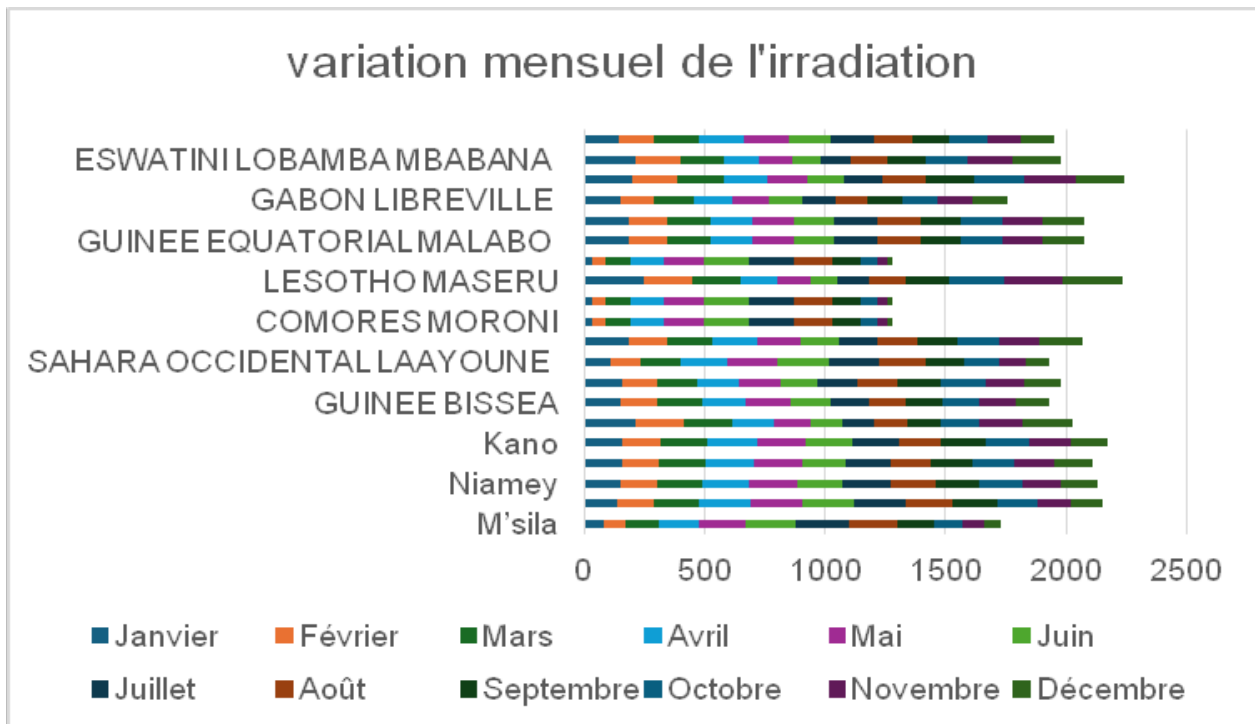


figure III-10: Variation mensuelle de rayonnement solaire

Les différentes simulations menées sur le PVsyst montre très clairement la variation du flux solaire sur les différents pays, d'un point de vue scientifique nous dirons que les régions les plus exposés sont ces qui sont situé au nord-est du continent d'où leurs fortes expositions aux rayonnements solaire.

III-4.4 Energie solaire photovoltaïque dans quelques régions Africaines

L'histogramme III.3 représente les différentes d'énergie solaire photovoltaïque pour quelques régions Africaines

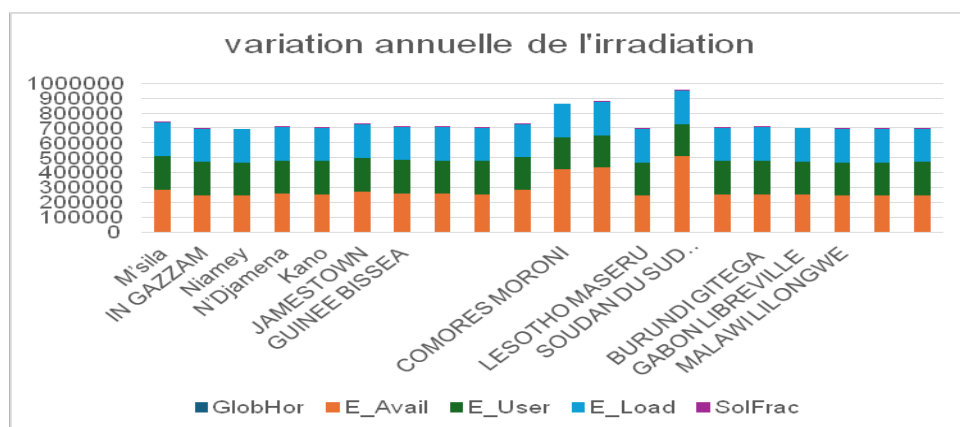


Figure III-11: Energie solaire photovoltaïque

Nous avons répertorié les données collectées au des différentes simulations d'énergie solaire photovoltaïque dans les histogrammes qui on montre la différence des irradiances solaires c'est qui a permis de modéliser le champ de panneaux solaires, car avec ces données la répartition du nombre de modules évolué en fonction de l'irradiation solaire plus le site et irradié moins de modules et vice versa ce que réduit fortement le coup de l'installation.

Les pays comme l'Algérie le Niger et le Tchad sont des sites de production d'électricité sous solaire photovoltaïque vis-à-vis de leurs localisations géographiques qui leurs procure les meilleures conditions climatiques.

Chapitre IV:ANNEXE STAGE

Stage pratique sur DES systèmes photovoltaïques

IV-1 Introduction

Au cours de la préparation de mon mémoire de fin de second cycle dans le système LMD j'effectue un stage pratique au sein du laboratoire de physique énergétiques et énergies renouvelables dans l'université de M'sila.

Au cours de ce stage pratique je me suis familiarisé avec les différents outils et appareils des systèmes photovoltaïques, comme le pompage solaire, système autonome avec et sans batterie, les différents éléments des différents systèmes.

La technologie photovoltaïque, ou PV, représente une méthode révolutionnaire pour exploiter l'énergie solaire et la convertir en électricité. La technologie PV repose sur le principe de l'effet photovoltaïque, selon lequel certains matériaux génèrent un courant électrique lorsqu'ils sont exposés à la lumière du soleil.

IV-2 Déroulement du stage

IV-2.1 Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

Le dimensionnement d'une installation photovoltaïque comporte 5 étapes :

- Estimation de la consommation d'énergie
- La détermination de l'ensoleillement de la cité
- Le calculer de la puissance nécessaire
- Dimensionnement des équipements

Régulateur de charge, onduleur, câblage électrique solaire.

- Dimensionnement du parc de batteries

IV-2.2 Estimation de la consommation d'énergie

Elle représente la partie essentielle du travail, car elle détermine la puissance des champs photovoltaïques à installer.

Il faut faire le bilan de tous les appareils que l'on désire installer, il est très important de ne pas sous-estimer les besoins énergétiques.

IV-2.3 Calcul de la consommation d'énergie

La consommation énergétique d'un logement peut être calculée à partir de la consommation réelle des appareils électriques qui y sont présents. Il vous suffit de multiplier les nombres d'heures d'utilisation des appareils par jours par la puissance des appareils.

La formule suivante permet de faire le calculer :

$$E_c = \sum P_i t_i \quad (IV-1)$$

E_c Est l'énergie consommée

P_i La puissance totale de fonctionnement des appareils

t_i Le temps de fonctionnement

IV-2.4 détermination de l'ensoleillement de la cité

Afin d'optimiser l'installation photovoltaïque il faut prendre en compte l'orientation et l'inclinaison des modules.

Ces paramètres dépendent de la cité d'installation les modules doivent être orientés vers le sud dans l'hémisphère nord vice versa du lieu où on se trouve, loin des zones ombragées est inclinés d'un angle qui permet de récupérer le maximum d'énergie solaire.

Relation entre l'attitude φ et inclinaison β

L'attitude φ	inclinaison β
$\varphi < 10^\circ$	10°
$10^\circ < \varphi < 30^\circ$	φ°
$30^\circ < \varphi < 40^\circ$	$\varphi + 10^\circ$
$\varphi > 40^\circ$	$\varphi + 15^\circ$

Tableau IV-1 : Tableau des angles

IV-2.5 Diode by-pass

Les panneaux solaires cristallins sont constitués de cellules solaires individuelles qui sont connectées avec un fil électrique.

Le courant généré traverse toutes les cellules individuelles avant de quitter le panneau et de passer au régulateur et à la batterie.

Supposons qu'une feuille tombe sur le panneau solaire, de sorte qu'une cellule est ombragée et génère par conséquent beaucoup moins ou pas d'électricité.

En raison de la connexion des cellules solaires, le courant maximal dans toute la chaîne est déterminé par la cellule la moins exposée. Par conséquent, le courant des cellules solaires, sur

lesquelles tombe bien la lumière du soleil, doit encore passer ces cellules solaires ombragées moins actives.

Cependant, la perte de puissance n'est pas l'inconvénient majeur, car le courant forcé est "poussé", de sorte que les cellules solaires ombragées réchauffent énormément.

C'est ce qu'on appelle un "Hot Spot".

Cela peut endommager les cellules solaires, ou même déformer ou éclater la plaque en verre des panneaux.

Pour l'éviter, des diodes de by-pass sont incorporées dans un panneau solaire. Quand il y a des cellules solaires qui produisent moins d'énergie, le courant qui doit passer ces cellules est détourné par un by-pass diode.

IV-2.6 Données météorologiques

La conception des systèmes photovoltaïques nécessite une connaissance préalable du rayonnement solaire sur le site pour l'installation, car plus l'énergie solaire est grande plus le coût est moindre.

Il est donc nécessaire de disposer de données fiables en recourant à des statistiques accumulées sur les années antérieures grâce à l'héliographe, les stations météorologiques élaborent les statistiques des rayonnements solaires à partir de toutes les données disponibles. Ces données sont appelées GHI (GLOBAL HORIZONTAL IRRADIATION)

IV-2.7 Dimensionnement du générateur champ PV

Le dimensionnement du système dépend de la puissance crête qu'on désire avoir par rapport à l'irradiation du lieu, car dépend fortement de cette irradiation.

Elle est calculable suivant cette formule :

$$P_c = \frac{E_c}{K t_{irr}} \quad (IV-2)$$

P_c puissance crête

E_c énergie consommée

t_{irr} temps d'irradiation

K coefficient de correction tient en compte de plusieurs paramètres

$$0,55 \leq K \leq 0,75$$

IV-2.8 Tension de fonctionnement

La tension de fonctionnement est choisie en fonction de la puissance crête par le champ PV

Puissance crête	Moins de 500 Wc	Moins de 2000 Wc	Moins de 10000 Wc	>10000 Wc
Tension de fonctionnement du champ PV	12	24	48	96

Tableau IV-2 : Tension du champ en fonction de la puissance crête

IV-2.9 calcul de module du champ nécessaire

Une fois qu'on a déterminé la puissance crête et la tension de fonctionnement il faut déterminer le nombre de panneaux nécessaires pour cette installation.

IV-2.10 Nombre de module en série

Le nombre de modules en série est déterminé par la formule suivante :

$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_m} \quad (IV-3)$$

V_{ch} Tension du champ

V_m Tension d'un seul module

IV-2.11 Nombre de module en parallèle

Le nombre de modules en parallèle est déterminé par la formule suivante :

$$N_p = \frac{V_M}{V_s} \quad (IV-4)$$

V_M Nombre total de modules

V_s Nombre de modules en série

IV-3 Dimensionnement des équipements

Le dimensionnement des équipements est RES fondamental pour le bon fonctionnement du système.

IV-3.1 Dimensionnement du régulateur de charge

Le régulateur de charge est dimensionné d'après la tension du champ, le courant d'entre et de sortie.

Le courant d'entrée est égal à :

$$I_s = 1,5I_{max} \quad (IV-5)$$

I_s courant d'entrée

I_{max} courant du champ debite par les modules

Le courant de sortie

$$I_s > I_{max}$$

I_s majoré de 20% jusqu'à 40% dans les régions limitant par rapport à I_{max}

$$I_s = 1,2I_{max} \text{ jusqu'à } 1,4I_{max} \quad (IV-6)$$

$$I_{max} = \frac{P_{ch}}{V_{ch}} \quad (IV-7)$$

P_{ch} puissance du champ

V_{ch} tension du champ

$$P_{ch} = N_S N_P P_{max} \quad (IV-8)$$

P_m puissance maximum d'un module

IV-3.2 Contrôleurs de charger ou régulateurs

IV-3.3 Description

Le régulateur de charge/décharge est associé à un générateur photovoltaïque, il a pour rôle, entre autres, de contrôler la charge de la batterie et de limiter sa décharge. Sa fonction est primordiale, car elle a un impact direct sur la durée de vie de la batterie.

On trouve sur les installations plusieurs technologies de contrôleur de charge :

- Régulation tout ou rien (TOR) par coupure électromécanique. Ce type de régulateur n'est plus commercialisé et est amené à disparaître.
- Régulation MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) avec deux types de couplage sur la batterie.
- Couplage direct appelé régulateur PWM (Pulse With Modulation).
- Couplage par adaptateur d'impédance appelé régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking).

IV-3.4 Fonctionnement

IV-3.5 Régulation PWM (Pulse Width Modulation)

Le régulateur est inséré entre le champ photovoltaïque et la batterie. Il est composé d'un interrupteur électronique fonctionnant en MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) et d'un dispositif anti-retour (diode).

L'ouverture et la fermeture de l'interrupteur électronique s'effectuent à une certaine fréquence, ce qui permet de réguler le courant de charge en fonction de l'état de charge avec précision.

Lorsque la tension batterie est inférieure à la tension de limitation du régulateur, l'interrupteur est

fermé. La batterie se charge alors avec le courant correspondant à l'ensoleillement. On est en phase "Bulk". Lorsque la tension batterie atteint un seuil de régulation prédéterminé, l'interrupteur s'ouvre et se ferme à une fréquence fixe pour maintenir un courant moyen injecté dans la batterie. La batterie est chargée, on est en phase "Floating"



Figure IV-1: Contrôleur de charge

IV-3.6 Dimensionnement de l'onduleur

L'onduleur est un convertisseur de courant elle est dimensionne de la façon suivante :

La tension d'entrée est seul du régulateur ou des batteries, 12,24,48, 96, volt direct courant DC

La tension de sortie varie de selon les besoins 220 ; 230...volt alternative courant AC

De même la fréquence de fonctionnement dépend des besoins 50...Hertz

La puissance nominal (normal) d'un onduleur est sa puissance de fonctionnement est celui des appareils connectes à cet onduleur.

La puissance maximale est 2 à 3 fois la puissance nominal, la capacite de transformation de l'onduleur varie entre 80 à 95%.



Figure IV-2: Onduleurs

IV-4 Type de câble solaire

Il existe des câbles spécifiquement dédiés au raccordement des panneaux photovoltaïques. Ces derniers sont généralement conçus en cuivre multibrin étamé. Le cuivre est le matériau offrant le meilleur rapport qualité/prix du marché. Le multibrin garantit une qualité de connexion optimale entre les éléments. Grâce à cela, on évite au maximum les chutes de tension (qui ne doivent pas dépasser 5%) et les pertes d'énergies engrangées.

IV-4.1 Longueur des câbles photovoltaïques

La longueur des câbles est certainement l'aspect le plus important à considérer. En effet, des câbles trop longs ou trop courts peuvent être à la source de plusieurs dysfonctionnements. Ils peuvent provoquer une surchauffe pouvant endommager votre installation photovoltaïque. Ou encore des chutes de tension qui réduisent votre rendement énergétique. Pour choisir la bonne longueur, il faudra prendre en compte la distance entre les différents éléments de votre installation ainsi que la tension et l'intensité du courant acheminé.

IV-4.2 Section du câble solaire

La section des câbles est calculée en fonction de l'intensité du courant (A) et de la distance à parcourir. La section standard d'un câble solaire est généralement comprise entre 4 et 6 mm². Cela convient pour la plupart des installations. Certaines cependant peuvent nécessiter des sections plus importantes : câble solaire 10mm²... Du fait de sa composition, le câble photovoltaïque nécessite un dénude câble spécifique. En effet, l'isolation multicouche du câble solaire requiert un réglage assez fin pour le dénuder sans abîmer le cuivre.

La section du câble sera donc la valeur supérieure standard la plus près de la valeur calculée. Quelques valeurs standards des sections sont : 1,5 mm², 2,5 mm², 4 mm², 6 mm², 10 mm², 16 mm², 25 mm², 35 mm², 50 mm², 70 mm², 95 mm², 120 mm²...

IV-4.3 Connecteurs

Les câbles solaires peuvent intégrer des connecteurs afin de garantir une connexion parfaite lors de leur raccordement. Si tel est le cas, il est important de s'assurer qu'ils soient d'une qualité irréprochable, toujours dans le but d'éviter les chutes de tension et autres dysfonctionnements. Les connecteurs se doivent d'être résistants aux intempéries, aux températures extrêmes et aux rayons UV. Le modèle de référence est actuellement le connecteur MC4.



Figure IV-3: Câble solaire

IV-5 Dimensionnement du parc de batteries

Pour que les systèmes autonomes fonctionnent en l'absence de la lumière du soleil il faut un stockage permanent.

On dimensionne le parc de batterie de la manière suivante :

- Calculer l'énergie consommée par les différents récepteurs (E_C)
- Déterminer le nombre de jours d'autonomie nécessaire
- Déterminer la profondeur de charge acceptable pour le type de batterie choisie
- Calculer la capacité de la batterie

$$C_B = \frac{E_C N}{UD} \quad (IV-9)$$

C_B capacité du champ de batterie

N Nombre de jour d'autonomie

D Décharge maximal admissible, 0,8 pour les batteries au plomb

U tension de la batterie en volt V

IV-5.1 Nombre de batterie en série

$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_{batterie}} \quad (IV-10)$$

V_{ch} tension du champ

$V_{Batterie}$ tension d'une batterie

IV-5.2 Nombre de batterie en parallèle

$$N_p = \frac{C_{ch}}{C_{Batterie}} \quad (IV-11)$$

C_{ch} Capacité total du champ

$C_{Batterie}$ Capacité d'une seule batterie



Figure IV-4: Batterie solaire

IV-6 Installation photovoltaïque

Au cours du stage nous avons installé :

IV-6.1 Pompage solaire immergé



Figure IV-5: Pompe solaire et boîtier de contrôle

Nous avons monté la pompe solaire dans un bassin d'eau, nous l'avons installé avec un panneau solaire polycristallin de 100 et 250 Wc.

Nous avons procédé à la vérification du matériel, inspection des panneaux de pompe du câblage le nettoyage ...etc.



Figure IV-6: Panneaux solaire polycristalline de 250 WC

IV-6.2 Système de 12 volts

Nous avons installé premièrement un système 12 volts pour un alimentation basique, avec un système 12V, vous pourrez alimenter des équipements de télécommunication de taille moyenne,

des systèmes de surveillance avancés, pour charger des batteries dans des bâtiments isolés et faire fonctionner l'éclairage public (lampadaires solaires).



Figure IV-7: Contrôleur MPPT de 12-24V

Comment faire :

- Nous avons installé les panneaux les ont orient de 35° degré vers le sud a 4,98 de longitude de 470 m au niveau de la mer qui est les coordonnes de m'sila
 - Câblage rouge pour le positif et noir pour la négative
 - Utilise un nodulaire de 500 W de conversion DC-AC
- Avec un éclairage de 370 w/m2

Nous avons utilisé des batteries de 12v dans nos installations



Figure IV-8: un multimètre basique

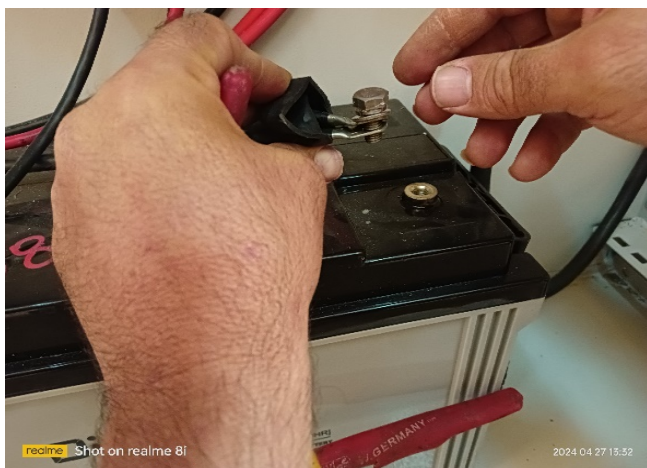


Figure IV-9: Batterie de 12 volts



Figure IV-10: kit solaire pour une l'installation autonome de 12 volts

IV-6.3 Système de 24 volts

Nous avons installé un système 24 volts pour un alimentation basique ou plus, avec un système 24V, vous pourrez alimenter des équipements de télécommunication de taille moyenne, des systèmes de surveillance avancés, pour charger des batteries dans des bâtiments isolés et faire fonctionner l'éclairage public (lampadaires solaires).

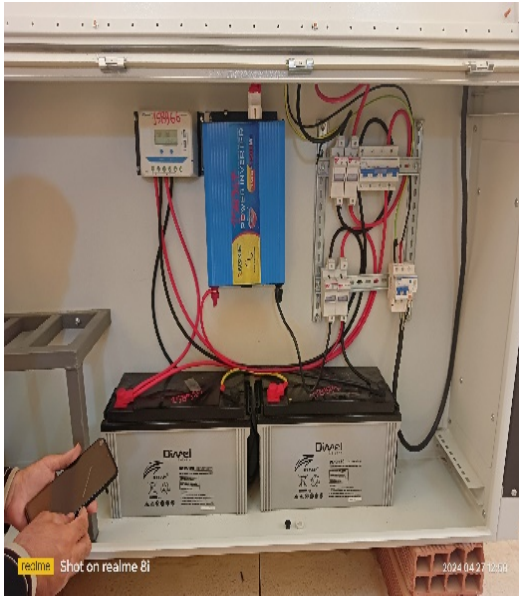


Figure IV 11: Système de 24 volts

Conclusion générale

Conclusion générale

L'énergie solaire qui atteint la terre chaque année représente près de 10000 fois l'énergie consommée. En effet, la surface du globe reçoit annuellement de l'énergie solaire avec une puissance allant de 85 à 290 W/m². Bien que la ressource ait toujours existé, son utilisation est assez récente dans l'histoire de l'humanité.

Au cours des différentes recherches sur les développements du photovoltaïque a permis d'apporter de nombreux changements positifs à la suite desquels plusieurs pays s'orientent maintenant vers cette technologie, mais il convient de noter que dans certaines régions de la planète certaines conditions ne permettent pas le bon fonctionnement des panneaux solaires. Cependant, l'Afrique dispose de toutes les conditions nécessaires à leur bon fonctionnement, notre idée est donc de développer les régions africaines et de transporter l'énergie produite vers le reste du monde.

Une connaissance précise de la répartition de l'irradiation solaire dans les régions africaines à un emplacement géographique particulier est d'une importance vitale pour le développement des systèmes photovoltaïques, ainsi que pour l'évaluation de leurs performances.

En ce sens, nous avons présenté les notions fondamentales concernant le principe de l'effet photovoltaïque, les méthodes de fabrication des cellules solaires et les paramètres essentiels qui permettent de calculer le rendement d'une cellule solaire à partir de la caractéristique courant-tension et des différents constituants de base d'une cellule photovoltaïque conventionnelle.

Nous avons fait une estimation du rayonnement solaire, une évaluation de l'énergie solaire photovoltaïque en Afrique. Nous avons réalisé une étude prévisionnelle d'un projet d'installation de systèmes photovoltaïques par logiciel PVSyst de quelques sites africains .

Nous avons démontré l'approche de base de l'exécution d'un projet de simulation sur PVSyst en utilisant un exemple, en partant des spécifications du projet, en enregistrant le projet, en exécutant et en analysant les résultats sur le rapport, et en ajoutant des détails supplémentaires à la variante du projet.

Et nous avons établi une étude de comparaison de la production d'électricité sur les différents pays africains, ce qui nous a permis de mieux comprendre la distribution solaire sur le continent africain.

L'étude du continent africain pour sa capacité énergétique vis-à-vis de l'énergie photovoltaïque nous a donné de très bons résultats, notamment dans les régions subsahariennes, qui ont des taux annuels d'éclairage et d'irradiation élevés, ce qui est très recherché par les investisseurs dans le monde de l'énergie.

La recherche de l'autonomie des sites isolés par l'installation de petites centrales solaires photovoltaïques est un moyen de mieux couvrir les demandes énergétiques d'un point de vue qualité-prix de plus, le monde d'aujourd'hui s'oriente vers une résolution des usages des énergies vertes et renouvelables, c'est pourquoi il est important de faciliter l'accessibilité pour le développement de nouveaux projets d'électrification avec des énergies renouvelables.

ملخص :

هذا البحث هو مساهمة لتقدير واستغلال الطاقة الشمسية في مناطق مختلفة من قارة أفريقيا عبر دراسة مشروع كهروضوئي باستخدام برنامج PVsyst
أجرينا دراسة مفصلة حول المفاهيم الأساسية للطاقة الشمسية ونخص منها، الفعل الكهروضوئي، كمية الطاقة الشمسية ومختلف
تكنولوجيا تصنيع الخلايا الشمسية.
قمنا بدراسة مقارنة لإنتاج الطاقة الكهربائية لبعض مناطق أفريقيا ، لأجل معرفة أحسن تواجد لاستغلال الطاقة الشمسية.
بينت حسابات برنامج PVsyst ، أن أعظم طاقة كهربائية منتجة هي في مناطق جنوب السودان بمقدار 700 وات ساعي.
الكلمات المفتاحية: الطاقة الشمسية، مشروع كهروضوئي، مناطق أفريقيا، برنامج PVsyst .

Abstract :

This work is a contribution to the evaluation of photovoltaic solar energy in different African countries and the study of a photovoltaic project in typical regions, we used the PVsyst software. We carried out a detailed study on solar energy, we presented the fundamental notions concerning the principle of the photovoltaic t-effect, the solar potential and the different technologies of solar cells.

And we established a study comparing electricity production in different African countries, which allowed us to better understand solar distribution on the African continent.

The estimate by the PVsyst software of the maximum annual power of energy supplied for operations is equal to 700 kwh for regions of South Sudan.

Keywords: Solar Energy, Photovoltaics, African Regions, Pvsyst.

Résumé :

Ce travail est une contribution à l'évaluation de l'énergie solaire photovoltaïque dans différents pays africains et l'étude d'un projet photovoltaïque dans des régions type, on a utilisé le logiciel PVsyst.

Nous avons fait une étude détaillée sur de l'énergie solaire, nous avons présenté les notions fondamentales concernant le principe de l'effet t photovoltaïque, le potentiel solaire et les différentes technologies des cellules solaires.

Et nous avons établi une étude de comparaisons de production électrique sur les différents pays africains, ce qui nous a permis de mieux comprendre la répartition solaire sur le continent africain.

L'estimation par le logiciel PVsyst de la puissance maximale annuelle de l'énergie fournie pour l'exploitation est égale 700 kwh pour des régions de soudan du sud .

Mots clés : Energie Solaire, Photovoltaïque, Régions Africains, PVsyst

Bibliographiques

- [1] C. VIANNEY Comprendre l'énergie solaire L'Histoire du photovoltaïque PUBLIÉ LE 13 SEPTEMBRE 2018
- [2] A. Bella Bac, M.Salmi, Y. Menin, S. Ghafourian, M. Sadeghzadeh , and Mohammad International Journal of Photo Energy Volume 2020, Article ID 8817440, 8 pages publié par Ghalandari.
- [3] G. Jingchao Long1, Z. Lu, Paul A. Miller, J. Pongratz ,D Guan ,B. Smith,Zhiwei Zhu, J. Xu, & Q. Zhang Large-scale photovoltaic solar farms in the Sahara affect solar power generation potential
- [4] C.Yang , F. Sun, Y. Zou , Z. v3, L. Xue1, C. Jiang 1, S. Liu 4,B. Zhao 5 and H. Cui 1 C A Survey of Photovoltaic Panel Overlay and Fault Detection Methods
- [5] M. SALMi, S. FETAH Modelling of Global Solar Radiation in Algeria Based on Geographical and all Climatic Parameters Publié par :
- [6] W.; Ma, T.; Ahmed, S.; Zhang, Y.; Peng, J. A comprehensive review and outlook of bifacial photovoltaic (bPV) technology.*Energy Convers.Manag.***2020**, *223*, 113283.
- [7] Verlinden, P.J. Future challenges for photovoltaic manufacturing at the terawatt level. *J. Renew. Sustain. Energy* **2020**, *12*, 053505.
- [8] European Commission, European Green Deal. Available online: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/european-green-deal_en (consulte le 20 avril 2024).
- [9] Z.; Brodzińska, K.; Szadziun, M. Photovoltaic Farms—Economic Efficiency of Investments in North-East Poland. *Energies* **2021**, *14*, 2087
- [10] K.; Kryszk, H.; Bielski, S. Location and Technical Requirements for Photovoltaic Power Stations in Poland. *Energies* **2022**, *15*, 2701.
- [11] H.; HegedúsnéBaranyai, N.; Vincze, A.; Háber, I.; Pintér, G. Economic and Technical Aspects of Flexible Storage Photovoltaic Systems in Europe. *Energies* **2018**, *11*, 1445.
- [12] K.; Kougias, I.; Jäger-Waldau, A.; Taylor, N.; Szabó, S. A high-resolution geospatial assessment of the rooftop solar photovoltaic potential in the European Union.*Renew. Sustain. Energy Rev.* **2019**, *114*, 109309.
- [13] B.; Flisikowski, K.; Pietrzak, M.B.; Kielkowska, U.; Skrzatek, M.; Zyadin, A.; Natarajan, K. Renewable Energy in the Pomerania Voivodeship—Institutional, Economic, Environmental and Physical Aspects in Light of EU Energy Transformation. *Energies* **2021**, *14*, 8221.
- [14] c-Pierzecka, E.; Kokieli, A.; Rogozińska-Mitrut, J.; Sobczak, A.; Soboń, D.; Stasiak, J. Analysis and Evaluation of the Photovoltaic Market in Poland and the Baltic States. *Energies* **2022**, *15*, 669.
- [15] M. Azza, A.A.; Youssef, K.; Abdelrahman, M. Analysis of Photovoltaics in Egypt using SWOT and PESTLE.*International J. Appl. Energy Syst.* **2020**, *2*, 11–14.

- [16] B.; Skrzatek, M.; Kujawski, W.; Cichosz, M.; Buczkowski, R. SWOT analysis of renewable energy sector in Mazowieckie Voivodeship (Poland): Current progress, prospects and policy implications. *Environ. Dev. Sustain.* **2022**, *24*, 77–111.
- [17] Wozniak, R.; Skotnicka-Zasadzie' n, B. Development of Photovoltaic Energy in EU Countries as an Alternative to Fossil Fuels. *Energies* **2022**, *15*, 662.
- [18] M-Bielska, R.; Bielski, S.; Pik, K.; Kurowska, K. The Importance of Renewable Energy Sources in Poland's Energy Mix. *Energies* **2020**, *13*, 4624.
- [19] https://fr.wikipedia.org/wiki/Histoire_de_l%27%C3%A9nergie_solaire consulté le 12 avril 2024
- [20] J.M Chassériau, Conversion thermique du rayonnement solaire ; Dunod, 1984.
- [21] R. Bernard ; G. Menguy ; M. Schwartz, Le rayonnement solaire conversion thermique et applications ; Technique et documentation Lavoisier, 2ème édition 1980.
- [22] C. Chauliaguet : L'énergie solaire dans le bâtiment, Editions Ayrolle 1981 P22, 32 et p147-148.
- [23] M. Capderou, Atlas solaire de l'Algérie, Tome 1, Vol. 1 et 2 ; OPU, 1987.
- [24] <http://web.laghuniv.dz/web/fr/doc/publications/ouvrage/techno/Mesri.pdf> consulter le 2 avril 2024
- [25] A. BECKMAN W. A., Solar energy thermal processes, John Wiley and Sons, New York,1974.
- [26] Domaine Environnement Sous-domaine Météorologie Organisme Ecole nationale de la météorologie (ENM) université de Toulouse Ville Toulouse Région Midi Pymées Lien :<http://expositions-virtuelles.univtoulouse.fr/expos/retour-vers-le-futur/voyage-dans-letemps-meteorologie/abri-meteorologique>.
- [27] https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_solaire_en_Afrique consulter le 31 avril 2024
- [28] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Semi-conducteur> consulter le 31 avril 2024