

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

Centre de Développement des
Energies Renouvelables - CDER



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur

Filière : Electrotechnique
Spécialité : énergie et environnement

Présenté par : KHECHAFI Sofiane
BENLAACHI Salah

Thème

**Calcul et dimensionnement électrique
d'une mini centrale photovoltaïque
autonome**

Soutenu publiquement, le 09 / 07 / 2019 , devant le jury composé de :

Dr. BENNEKROUF Mohammed	MCB	ESSA. Tlemcen	Président
Dr. MALIKI Fouad	MAA	ESSA. Tlemcen	Directeur de mémoire
Dr. BELHAOUAS Nasereddine	MRB	CDER Alger	Co- Directeur de mémoire
Dr. KHERBOUCHE Ep FARADJI Djamila	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur 1
Dr. GHOMRI Amina	MCA	ESSA. Tlemcen	Examineur 2

Année universitaire : 2018/2019



DEDICACE I

Je dédie ce travail à...

A mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance.

J'espère qu'ils trouveront dans ce travail toute ma reconnaissance et tout mon amour.

A mes frères et sœurs: Djamel, Imad, Nadia et Fouzia, Je vous remercie pour votre aide sans égale et votre affection si sincère.

A mon binôme Sofiane Merci pour ton soutien sans limite, pour ta présence et ton amitié sincère.

A tous mes amis et à tous ceux qui me sont chers.

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

BENLAACHI Salah

DEDICACE II

Je dédie ce modeste travail ...

À mes chers parents que dieu les garde et les Protège, pour tous leurs sacrifices, leurs amour, leurs tendresse, leurs soutien et leurs prières tout au long de mes études,

À mes frères, mes sœurs, mon oncle, et toute ma famille pour leurs soutien tout au long de mon parcours,

À tous mes enseignants depuis le primaire jusqu'à ce jour,

À mon binôme Salah pour tous les moments que nous avons passé ensemble tout au long de la réalisation de ce projet,

À tous mes camarades et mes amis,

À tous ce que j'aime et qui m'aiment,

À tous ceux qui me connaissent de près ou de loin.

Merci d'être toujours là pour moi.

KHEKHAFI Sofiane

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous tenons à remercier ALLAH de nous avoir guidés sur la bonne voie, de nous avoir aidés tout au long de nos années d'études.

Nous ne saurions réellement, trouver les expressions éloquentes que mérite nos encadrateurs monsieur MALIKI Fouad, maître assistant au sein de l'école supérieure en sciences appliquées de Tlemcen, et monsieur BELHAOUAS Nasreddine, chercheur au sein du centre de développement des énergies renouvelables de Bouzareañ, pour leurs grande patience, leurs conseils et leurs disponibilité, malgré leurs différentes occupations, nous avons beaucoup appris à leurs côtés, tant sur le plan scientifique que humain. Nous tenons donc à les remercier pour la confiance qu'ils nous ont accordée en nous proposant ce travail et pour avoir contribué activement à sa réalisation. Nous leurs exprimons en particulier notre reconnaissance et gratitude de nous avoir fait bénéficier de leurs compétences scientifiques, leurs qualités humaines et leurs constante disponibilité et nous avoir donné l'occasion d'étudier un sujet si intéressant.

Nous adressons aussi nos remerciements aux différents membres du jury qui nous font l'honneur d'évaluer, d'examiner et d'enrichir ce modeste travail.

Nous tenons également à remercier tous le staff académique de l'école supérieure en sciences appliquées de Tlemcen pour leurs contributions à notre formation.

Enfin nous tenons à remercier tous ceux qui nous ont aidé et contribué de près ou de loin au succès de ce travail.

TABLE DES MATIERES

Dédicace I.....	I
Dédicace II	II
Remerciements	III
nomenclature	VII
LISTE DES FIGURES	IX
Liste Des Tableaux.....	XI
Résumé	XII
Introduction générale.....	XIII
I. Chapitre 1.....	1
1. Introduction	2
2. Le soleil comme une source d'énergie	2
2.1. Bilan radiatif solaire.....	3
2.2. Le rayonnement solaire.....	3
3. Spectre solaire	4
3.1. Rayonnement solaire direct.....	4
3.2. Rayonnement solaire diffus	5
3.3. Le rayonnement réfléchi ou l'albédo du sol.....	5
3.4. Le rayonnement global	5
4. Caractéristiques des ondes électromagnétiques	6
5. L'énergie solaire photovoltaïque.....	6
6. L'histoire de l'énergie solaire photovoltaïque	7
7. Anatomie d'un module photovoltaïque.....	7
7.1. Cellules photovoltaïques.....	8
7.2. Couverte.....	8
7.3. Couches encapsulées.....	9
7.4. Cadre de soutien.....	9
7.5. Protection ultérieure.....	9
7.6. Boite de connexion électrique.....	9
8. Principe de fonctionnement de générateur PV	10
9. Les différentes technologies des cellules solaires.....	11
9.1. Les cellules au silicium cristallin	11
9.2. Les cellules à base de couches minces.....	12
9.3. Les cellules à base de photovoltaïque organique.....	13

10.	Avantages et inconvénients d'une installation PV	15
10.1.	Les avantages	15
10.2.	Les inconvénients	15
11.	Conclusion	16
II.	Chapitre 2	17
1.	Introduction	18
2.	Les différents modèles d'une cellule solaire photovoltaïque	18
2.1.	Modèle à deux diodes	19
2.2.	Modèle à une seule diode	20
3.	Les caractéristiques électriques d'un module solaire	23
3.1.	U_{co} Tension de circuit ouvert	23
3.2.	I_{cc} : Courant de court-circuit	24
3.3.	P_m : Point de puissance maximale	24
3.4.	Puissance-crête (P_c (W_c))	24
3.5.	Facteur de forme FF	24
3.6.	Le rendement d'un photo-générateur	25
12.	Caractéristiques I (V) et P (V) d'un PPV	25
3.7.	Influence d'éclairement solaire	26
3.8.	Influence de la température	27
4.	Protections classiques d'un générateur PV	29
5.	Conclusion	29
III.	Chapitre 3	30
1.	Introduction	31
2.	Composants d'un système photovoltaïque autonome	31
2.1.	Les modules PV	32
2.2.	Les batteries ou banc de batteries (système de stockage)	32
2.3.	Le régulateur de charge	37
2.4.	L'onduleur	38
2.5.	Les câbles	40
3.	Les avantages de l'installation PV autonome :	42
13.	Les conditions et inconvénients d'une installation PV autonome :	42
4.	Conclusion	42
IV.	Chapitre 4	43
1.	Introduction	44
2.	Calculs des différents paramètres électriques	44
2.1.	Les fusibles CC	44

2.2.	Dispositif de coupure et sectionnement (disjoncteur).....	47
2.3.	Les câbles.....	48
3.	Développement d'une interface graphique (GUI) sur Matlab.....	50
4.	Fonctionnement d'une interface utilisateur graphique GUI.....	51
4.1.	Composants (Components).....	51
4.2.	Figures.....	52
4.3.	Rappels au travail (call back).....	52
5.	Création et affichage d'une interface utilisateur graphique.....	52
5.1.	Champs de texte (Static text and edit text).....	54
5.2.	Axes.....	54
5.3.	Pushbuttons.....	54
6.	Calcul des paramètres électrique des composants de protection.....	54
7.	Calcul de la section du câble.....	56
8.	Application du programme sur deux installations PV autonomes au niveau du CDER58	
8.1.	La première installation.....	58
8.2.	La deuxième centrale.....	64
9.	Conclusion.....	69
V.	Conclusion générale.....	70
	REFERENCE.....	72

NOMENCLATURE

CDER : Centre de Développement Des Energies Renouvelables.
SER : Systèmes d'énergie renouvelable.
PV : Photovoltaïque.
 λ : Longueur d'onde (nm).
C : La célérité de la lumière. (m/s).
 ν : La fréquence (Hz).
E : Quantité d'énergie (J).
GPV : Générateur photovoltaïque.
EVA : Copolymère thermoplastique d'acétate de vinyle et d'éthylène.
P : Phosphore.
B : Bore.
PN : Jonction.
Si : Silicium.
Ge : Germanium.
Se : Sélénium.
CdS : Sulfure de cadmium.
CdTe : Tellure de cadmium.
GaAs : Arséniure de gallium.
PPM : Point de puissance maximale.
K : Constante de Boltzman.
T : Température de la cellule ($^{\circ}\text{C}$).
V : Tension au borne de la charge (V).
 I_{PH} : Photo-courant créé par la cellule (A).
 I_{S1} : Courant inverse de saturation de la diode 1 (A).
 I_{S2} : Courant inverse de saturation de la diode 2 (A).
 α : Facteur de qualité de la diode.
 R_S : Résistance série (Ω).
 R_{SH} : Résistance parallèle (Ω).
 U_{CO} : Tension de circuit ouvert (V).
N : Nombre de cellules.
 I_{CC} Courant de court-circuit (A).

P_m : Point maximale (W).

P_c : Puissance crête (Wc).

FF : Facteur de forme.

η : Rendement.

G : Eclairement (W/m^2).

S : Surface du panneau (m^2).

C : Capacité (Ah).

DC : Courant continu.

AC : Courant alternatif.

ΔV : Chute de tension.

ρ : Résistivité ($\Omega.m$).

σ : Conductivité (S).

L : Longueur de câble (m).

S : Section de câble (m^2).

GUI : Interface graphique.

UTE C15-712-1 : Texte réglementaire de référence des installations photovoltaïques.

I_B : Courant maximal d'emploi dans les conducteurs (A).

I_N : Courant nominal de fusible (A).

k : Facteur de correction.

U_N : Tension nominale de fusible (V).

V_A : Tension à l'origine du câble (V).

LISTE DES FIGURES

FIGURE I-1 SCHEMA-BILAN : LE SOLEIL COMME UNE SOURCE D'ENERGIE ESSENTIELLE	3
FIGURE I-2 SCHEMA DES RAYONNEMENTS SOLAIRES.	5
FIGURE I-3 PANNEAU SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE	8
FIGURE I-4 CELLULE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE.....	8
FIGURE I-5 ANATOMIE D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE.	10
FIGURE I-6 ANATOMIE D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE.	11
FIGURE I-7 CELLULE EN SILICIUM MONOCRISTALLIN.	12
FIGURE I-8 CELLULE EN SILICIUM MONOCRISTALLIN.	12
FIGURE I-9 CELLULE EN SILICIUM AMORPHE.	13
FIGURE I-10 CELLULE SOLAIRE ORGANIQUE	13
FIGURE II-1 MODELE A 7 PARAMETRES (2M7P).	19
FIGURE II-2 MODELE A 6 PARAMETRES (2M6P).	20
FIGURE II-3 MODELE A 5 PARAMETRES (L5P).	21
FIGURE II-4 MODELE A 4 PARAMETRES (L4P).	22
FIGURE II-5 MODELE A 3 PARAMETRES (L3P).	23
FIGURE II-6 CARACTERISTIQUES COURANT-TENSION ET PUISSANCE-TENSION D'UN PPV	25
FIGURE II-7 COURBES I(V) D'UN PANNEAU SOLAIRE A DIVERS ECLAIREMENTS.....	26
FIGURE II-8 COURBES P(V) D'UN PANNEAU SOLAIRE A DIVERS ECLAIREMENTS.....	26
FIGURE II-9 COURBE H (T) D'UN PANNEAU SOLAIRE A DIVERS ECLAIREMENTS.	27
FIGURE II-10 COURBES I(V) D'UN PANNEAU SOLAIRE A DIVERS TEMPERATURE.	27
FIGURE II-11 COURBES P(V) D'UN PANNEAU SOLAIRE A DIVERS TEMPERATURE.	28
FIGURE II-12 COURBE H (G) D'UN PANNEAU SOLAIRE A DIVERS ECLAIREMENTS.....	28
FIGURE II-13 PROTECTION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE.....	29
FIGURE III-1 SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME.	31
FIGURE III-2 LE CHAMP PHOTOVOLTAÏQUE.	32
FIGURE III-3 BANC DE BATTERIES POUR UN SYSTEME PV AUTONOME.....	33
FIGURE III-4 REGULTEUR DE LA CHARGE.	38
FIGURE III-5 L'ONDULEUR	39
FIGURE III-6 SYMBOLE D'UN ONDULEUR (CONVERTISSEUR DC-AC).	39
FIGURE III-7 UN CIRCUIT AVEC UNE CHARGE R ET UNE RESISTANCE DE CABLE R.....	40
FIGURE III-8 LES CABLES DE L'INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE.....	42
FIGURE IV-1 UN FUSIBLE EN VERRE.	45

FIGURE IV-2 EMBLACEMENT DES FUSIBLES.....	46
FIGURE IV-3 EMBLACEMENT DES DISPOSITIFS DE COUPURE ET SECTIONNEMENT.....	48
FIGURE IV-4 MODELISATION ELECTRIQUE D'UN CABLE DE LONGUEUR L ET DE SECTION S.....	49
FIGURE IV-5 LA LISTE DES COMPOSANTS (COMPONENTS).....	51
FIGURE IV-6 LA FAÇADE PRINCIPALE DU GUI.....	53
FIGURE IV-7 LA FIGURE PRINCIPALE DU PROGRAMME.....	53
FIGURE IV-8 UNE CAPTURE DE LA PREMIERE PAGE DANS LA PARTIE DU CALCUL DES PARAMETRES DES FUSIBLES ET DISJONCTEURS.....	55
FIGURE IV-9 UNE CAPTURE DE LA PAGE DU RESULTAT DU CALCUL DES FUSIBLES ET DISJONCTEURS.....	56
FIGURE IV-10 LA PREMIERE PAGE DANS LA PARTIE DU CALCUL DE LA SECTION.....	57
FIGURE IV-11 UNE CAPTURE DE LA PAGE DU RESULTAT DU CALCUL DE LA SECTION.....	57
FIGURE IV-12 LA FICHE TECHNIQUE DES PANNEAUX.....	58
FIGURE IV-13 INSTALLATION DU PREMIER CHAMP PV.....	59
FIGURE IV-14 LE CABLAGE DU PREMIER CHAMP PV.....	59
FIGURE IV-15 LA STATION DE MESURE EN TEMPS REEL ET LA BOITE DE JONCTION DU CHAMP PV.	59
FIGURE IV-16 LE REGULATEUR ET L'ONDULEUR UTILISES DANS LE MINI CENTRAL.....	60
FIGURE IV-17 PARC DE BATTERIE.....	60
FIGURE IV-18 UTILISATION DE L'INTERFACE GRAPHIQUE.....	61
FIGURE IV-19 LE RESULTAT FINALE DU CALCUL.....	62
FIGURE IV-20 UN MODELE DE FUSIBLE UTILISE DANS CETTE CENTRALE.....	62
FIGURE IV-21 IMPLANTATION DES DONNEES POUR LE CALCUL DES SECTIONS.....	63
FIGURE IV-22 LE RESULTAT DU CALCUL DES SECTIONS DE CABLE.....	64
FIGURE IV-23 UNE VUE DE FACE DU CHAMP DE LA CENTRALE.....	65
FIGURE IV-24 LES FICHES TECHNIQUES DES MODULES MONOCRISTALLINS ET POLY- CRISTALLINS.....	65
FIGURE IV-25 LA BOITE DE JONCTION ET PARC DES BATTERIES DE LA CENTRALE.....	66
FIGURE IV-26 L'ONDULEUR ET LE REGULATEUR UTILISE DANS LES DEUX CHAMPS.....	66
FIGURE IV-27 CALCUL DES PARAMETRES DE PROTECTION DU CHAMP PV POLY-CRISTALLIN.....	67
FIGURE IV-28 CALCUL DES PARAMETRES DE PROTECTION DU CHAMP PV MONOCRISTALLIN.....	68
FIGURE IV-29 CALCUL DES SECTIONS PROTECTION DU CHAMP PV MONOCRISTALLIN.....	68
FIGURE IV-30 CALCUL DES SECTIONS PROTECTION DU CHAMP PV POLY-CRISTALLIN.....	69

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU I-1 REPARTITION DU RAYONNEMENT SOLAIRE A LIMITE SUPERIEURE DE L'ATMOSPHERE.	4
TABLEAU I-2 REPARTITION DU RAYONNEMENT SOLAIRE A LA SURFACE DE LA TERRE.....	4
TABLEAU I-3 LES DIFFERENTS TYPES DE TECHNOLOGIE DES CELLULES SOLAIRES.	14
TABLEAU III-1 COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES BATTERIES.....	36
TABLEAU IV-1 FACTEUR DE CORRECTION K.	47
TABLEAU IV-2 LES DIFFERENTES VALEURS DE LA CENTRALE.....	67

RESUME

Dans le but de protéger les différents éléments de l'installation photovoltaïque, plusieurs études et travaux sont menés autour du dimensionnement des systèmes PV. Dans notre travail, l'étude qu'on a réalisé au niveau du centre de développement des énergies renouvelables (CDER) de Bouzareah était dirigé dans ce sens, et cela en prenant en compte trois paramètres importants dans une installation photovoltaïque : les câbles, le disjoncteur et les fusibles de protection.

Les mots clés : générateur PV, installation PV, système PV autonome, dimensionnement, système de protection

ABSTRACT

In order to protect the various elements of the photovoltaic installation, several studies and works are carried out on the sizing of PV systems. In our work, the study carried out at the Bouzareah Renewable Energy Development Centre (CDER) was directed in this sense, taking into account three important parameters in a photovoltaic installation: cables, the circuit-breaker and protection fuses.

The keywords: PV generator, PV installation, PV system stand-alone, sizing, protection system.

ملخص

من أجل حماية العناصر المختلفة للنظام الكهروضوئي ، يتم إجراء العديد من الدراسات والأعمال حول تصميم الأنظمة الكهروضوئية. في عملنا هذا ، تم توجيه الدراسة التي أجريت على مستوى مركز تنمية الطاقة المتجددة في بوزريعة في هذا الاتجاه ، مع الأخذ بالاعتبار ثلاثة معايير مهمة في التركيب الكهروضوئي : الاسلاك ، قاطع الدائرة والصمامات الواقية.

الكلمات المفتاحية: مولد PV ، تركيب PV ، نظام PV مستقل ، التحجيم ، نظام الحماية.

INTRODUCTION GENERALE

La population mondiale actuelle est de 7,2 milliards d'habitants, qui devrait atteindre 9,6 milliards d'ici 2050, selon un rapport des Nations Unies qui souligne que la croissance se fera principalement dans les pays en développement, dont plus de la moitié en Afrique. Pour assurer à cette population croissante un niveau de vie raisonnable, un développement économique soutenu est essentiel; un tel développement nécessitera une augmentation correspondante de la production d'énergie. En outre, dans le cadre de la prise en compte du concept de développement durable, il convient de prendre en compte les sources d'énergie respectueuses de l'environnement. Ces sources d'énergie sont également appelées sources d'énergie renouvelables ou durables. L'énergie renouvelable est définie par l'énergie obtenue à partir des flux continus d'énergie présente dans l'environnement naturel, comme l'énergie solaire. Ces dernières années, l'utilisation des systèmes d'énergie renouvelable (SER) est devenue très importante en raison des préoccupations environnementales et de la demande croissante d'énergie. L'utilisation des SER peut réduire considérablement les émissions nocives dues à la pollution de l'environnement, tout en offrant des ressources inépuisables d'énergie primaire. [1]

Les sources d'énergie renouvelables sont d'une immense nécessité, aussi bien aujourd'hui qu'à l'avenir. Parmi les différents systèmes d'énergie renouvelables, les systèmes photovoltaïques, c'est-à-dire les systèmes de production d'énergie photovoltaïque qui jouent un rôle très important en tant que source d'énergie propre pour répondre à la demande future d'électricité. Les systèmes PV sont largement utilisés pour produire de l'énergie à partir de l'énergie solaire. De tous les systèmes d'énergie renouvelables, les systèmes photovoltaïques sont la solution énergétique la plus écologique pour produire de l'électricité. [2]

La conversion de l'énergie solaire en électricité s'effectue dans une cellule solaire, qui est un dispositif semi-conducteur. Les cellules solaires disponibles dans le commerce fournissent généralement une quantité relativement faible d'énergie. L'utilisation de l'électricité solaire pour des appareils pratiques nécessite une tension ou un courant particulier pour leur fonctionnement ; un certain nombre de cellules solaires doivent être connectées ensemble pour former un panneau solaire, également appelé module PV. Pour la production d'électricité solaire à grande échelle, les panneaux solaires sont reliés entre eux pour former un réseau solaire. [1]

Les systèmes PV peuvent être classés en deux grandes catégories, selon qu'ils sont connectés ou non au réseau électrique local (ou au réseau). Les systèmes raccordés au réseau sont généralement conçus pour produire leur puissance maximale en tout temps et pour

contribuer à la satisfaction des charges électriques, soit à proximité du système (généralement appelées charges locales), soit via le réseau électrique. Les systèmes PV autonomes fonctionnent indépendamment de l'alimentation du réseau et sont souvent situés là où il n'y a pas de réseau électrique ou lorsque l'accès au réseau est difficile. Dans ce cas, le système est conçu pour fournir la quantité d'électricité requise pour la charge spécifiée, mais ne fournit pas toujours nécessairement la puissance maximale du système. [3]

La performance du système PV qui concerne principalement la production d'énergie, tant en quantité qu'en temps, dépend des conditions de fonctionnement et de la configuration détaillée du système. Les conditions d'exploitation dépendent à leur tour de l'emplacement de l'installation qui régit le rayonnement solaire reçu, de la température ambiante et d'autres aspects liés au climat qui influencent les performances de l'installation. La performance du système PV détermine sa faisabilité technique et économique et s'il s'agit de la meilleure solution en termes de source d'électricité pour une application donnée.

La diminution du coût des centrales photovoltaïques passe nécessairement par le choix d'une technologie adéquate aux besoins de l'utilisateur. Lorsqu'on s'équipe en énergie renouvelable, il est important de respecter un certain nombre d'étapes. Ces dernières permettront, grâce à quelques calculs très simples, de dimensionner la source d'énergie. Une installation d'un système PV nécessite plusieurs étapes dont la première est d'estimer la consommation d'électricité et de déterminer à quel moment on en a besoin. Puis vient le chiffrage de l'énergie solaire récupérable selon l'emplacement et la situation géographique. Avec ces données, il sera alors possible de connaître la quantité de modules photovoltaïques nécessaires, la quantité de batteries, le régulateur ainsi que l'onduleur les mieux adaptés, et enfin le câblage adéquat. Le dimensionnement des centrales PV est donc nécessaire avant tout projet photovoltaïque. [4]

Le présent mémoire a pour objet de contribuer à l'étude et la conception des systèmes photovoltaïques autonomes, Pour mener à bien ce travail, notre mémoire comporte quatre chapitres.

Le premier chapitre a été consacré aux généralités sur l'énergie solaire, dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord, globalement l'énergie solaire, puis on mettra l'accent sur l'énergie solaire photovoltaïque qui nous intéresse particulièrement dans cette étude.

Dans le second chapitre nous allons faire une étude sur le générateur photovoltaïque. En commençons par les différents modèles électriques des cellules solaires PV, ensuite nous allons présenter les caractéristiques et les paramètres électriques d'une cellule solaire, ainsi

que l'influence des différents paramètres métrologiques sur les caractéristiques et les performances du module PV.

Le troisième chapitre est consacré à la présentation du champ photovoltaïque autonome à savoir des différents éléments de l'installation PV (batterie, régulateur et le convertisseur). Ce chapitre est essentiel et sert de base qui permettra de réussir le dimensionnement de notre installation.

Dans le quatrième chapitre, nous allons présenter le calcul des différents paramètres électriques des éléments de protection (fusibles et disjoncteurs), ainsi que les sections des câbles entre les différents composants électriques de l'installation. Ensuite, nous ferons une présentation de notre programme sur Matlab, qui vise à faciliter la mise en place du calcul analytique.

I. CHAPITRE 1

GENERALITE SUR L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE

1. INTRODUCTION

L'énergie renouvelable est un ensemble des sources d'énergie qui sont inépuisables à l'échelle humaine, largement disponible, essentiellement gratuites et compatibles avec un certain respect environnemental.

Dans ce chapitre nous commencerons par la définition de l'énergie solaire puis la construction des cellules photovoltaïques et leur effet ainsi que leur principe de fonctionnement. Puis nous présentons les différentes technologies des cellules photovoltaïques.

2. LE SOLEIL COMME UNE SOURCE D'ENERGIE

Composé de matière gazeuse, essentiellement de l'hydrogène et de l'hélium, et sous forme pseudo-sphérique dont le diamètre atteint 1391000 km, le soleil est une étoile situé à une distance moyenne de 149 598 000 km de la Terre, avec une température de surface de 5.600°C et de cœur atteint 15.000.000°C, l'énergie qui nous vient du soleil représente la quasi-totalité de l'énergie disponible.

Le flux de photons qui arrive tous les jours sur Terre permet de répondre à tous les besoins énergétiques de l'humanité à très long terme et sans limite. Cette énergie est produite par les réactions de fusion thermonucléaire : les noyaux d'hydrogène (protons) s'assemblent en noyaux d'hélium (deux protons + deux neutrons), elle est émise dans l'espace par la surface du Soleil.

D'une saison à l'autre, d'une région à l'autre, d'un pays à l'autre. La quantité d'énergie solaire disponible en extérieur est aussi très variable, Sur une journée complète, le Soleil fournit sur Terre de 0 à 7 kWh/m² de rayonnement incident. Connaitre et quantifier précisément cette énergie lumineuse est indispensable à la maîtrise de l'énergie photovoltaïque.

Disponible, inépuisable, propre..., et dans le sens de la qualité (technologique), et de l'efficacité, l'énergie représente une source « nouvelle » en expansion et est un sujet très convoité ces dernières années. [5] [6]

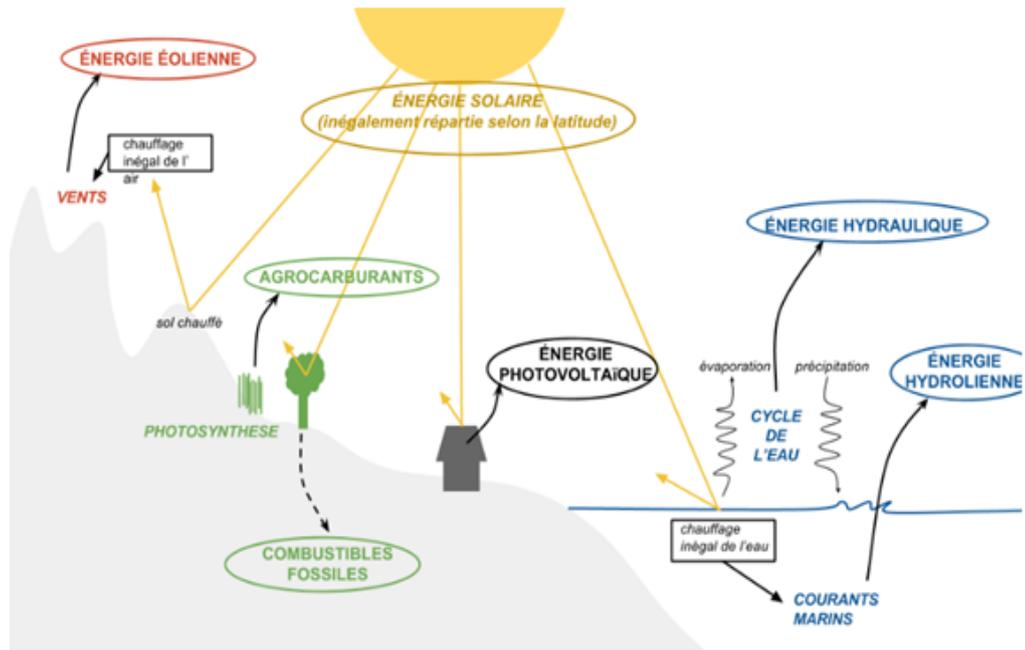


FIGURE I-1 SCHEMA-BILAN : LE SOLEIL COMME UNE SOURCE D'ENERGIE ESSENTIELLE

2.1. BILAN RADIATIF SOLAIRE

Le soleil et les autres étoiles représentent les sources d'énergie radiative les plus puissantes, leur puissance étant estimée à environ $3.9 \cdot 10^{20}$ MW. Même si la Terre ne reçoit qu'un faible pourcentage de ce gigantesque flux ($1/20 \cdot 10^{19}$ partie), soit 1395 W/m^2 . La quantité d'énergie moyenne reçue pendant une année est largement supérieure même aux besoins actuels de consommation de notre planète. [7]

2.2. LE RAYONNEMENT SOLAIRE

On peut définir Le rayonnement solaire comme étant l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Il est composé de toute la gamme des rayonnements, de l'ultraviolet lointain comme les rayons gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible¹. Le rayonnement solaire contient aussi des rayons cosmiques de basse énergie. [8]

La répartition de ce rayonnement à la limite supérieure de l'atmosphère est :

TABLEAU I-1 REPARTITION DU RAYONNEMENT SOLAIRE A LIMITE SUPERIEURE DE L'ATMOSPHERE.

Répartition (%)	Longueur d'onde λ (nm)	Lumière
9	$\lambda < 400$	Ultraviolet
47	$400 < \lambda < 800$	Visible
44	$800 < \lambda < 3000$	Infrarouge proche

A la surface de la terre, la nouvelle répartition est :

TABLEAU I-2 REPARTITION DU RAYONNEMENT SOLAIRE A LA SURFACE DE LA TERRE.

Répartition (%)	Longueur d'onde λ (nm)	Lumière
0,25	$280 < \lambda < 315$	Ultraviolet moyen
4,75	$315 < \lambda < 400$	Ultraviolet proche
44	$400 < \lambda < 800$	Visible
51	$800 < \lambda < 2350$	Infrarouge

3. SPECTRE SOLAIRE

En traversant l'atmosphère, il est nécessaire de connaître le spectre du rayonnement solaire reçu sur sol, afin de quantifier l'énergie développée par le générateur photovoltaïque dans une application donnée. En effet, quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature:

3.1. RAYONNEMENT SOLAIRE DIRECT

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire atteignant directement la surface terrestre depuis le soleil. Il dépend de l'épaisseur de l'atmosphère que la radiation solaire doit traverser et de l'inclinaison des rayons par rapport au sol. Le pyréliomètre est l'instrument qui permet de mesurer l'intensité du rayonnement direct. Le pyréliomètre doit être muni d'un dispositif chargé de l'orienter en permanence vers le soleil. [9]

3.2. RAYONNEMENT SOLAIRE DIFFUS

Le rayonnement diffus est aussi appelé rayonnement indirect. C'est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire global par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages et les aérosols. Autre définition, le rayonnement diffus représente la partie du rayonnement solaire qui a touché au moins une particule de gaz atmosphérique en modifiant l'angle d'incidence et qui, cependant, atteint le sol car il est dirigé vers elle. Une partie du rayonnement diffus est de retour vers l'espace. [10]

3.3. LE RAYONNEMENT REFLECHI OU L'ALBEDO DU SOL

C'est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. L'albédo est le coefficient de réflexion « c », ses valeurs comprises généralement entre 0 et 1 ou sont exprimées en pourcentage. Il est donné par la relation entre l'énergie rayonnante réfléchie par une surface par rapport à l'énergie incidente. La Terre a une valeur moyenne de 40% ($c = 0,4$). Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige, etc...). [11]

3.4. LE RAYONNEMENT GLOBAL

Le rayonnement global est subdivisé en rayonnements directs, diffus et réfléchi par le sol. Dans la figure ci-dessous représente l'ensemble des rayonnements solaires reçu sur une surface terrestre.

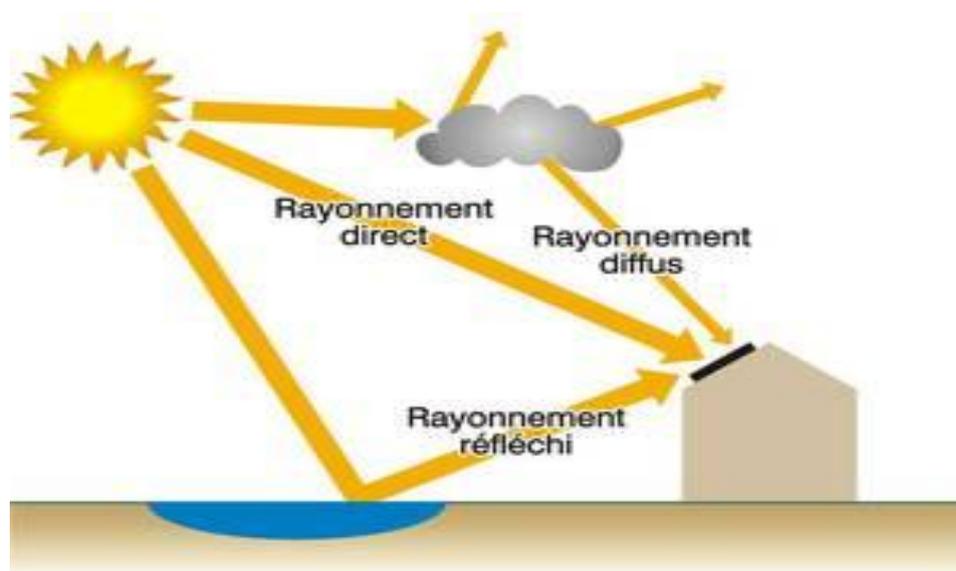


FIGURE I-2 SCHEMA DES RAYONNEMENTS SOLAIRES.

4. CARACTERISTIQUES DES ONDES ELECTROMAGNETIQUES

Une onde électromagnétique, soit une oscillation périodique, caractérisée par sa longueur d'onde λ ou sa fréquence ν avec une relation inversement proportionnelle entre eux, plus la fréquence est élevée, plus la longueur d'onde est faible et inversement, la relation entre eux est donnée par

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

Tel que « C » est la célérité de la lumière. [1]

Cette onde est aussi caractérisée par sa quantité d'énergie, qui dépend de leur longueur d'onde, selon la formule de Louis de Broglie (1924) :

$$E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

La longueur d'onde et la fréquence sont importantes pour déterminer leur énergie, leur visibilité et leur pouvoir de pénétration. Toutes les ondes électromagnétiques se déplacent dans le vide à une vitesse de 299,792 km / s. [12]

5. L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

Le mot photovoltaïque est composé du terme photo, qui signifie le photon de la lumière et de voltaïque dont l'origine est le nom de l'inventeur de la pile électrique Volta. En d'autre terme c'est le synonyme de photopile. La technologie photovoltaïque (PV) offre une méthode pratique pour la conversion de la lumière du soleil disponible en abondance pendant une grande partie de l'année directement en électricité. Cette technique de conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule solaire et se base sur le principe photovoltaïque, qui consiste à produire une force électromotrice lorsqu'elle est exposée à la lumière.

La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale.

Le courant produit à la sortie d'une cellule photovoltaïque est de type continu. Dans le cas d'une installation domestique, un onduleur doit donc transformer celui-ci en courant alternatif. [5] [11] [13]

6. L'HISTOIRE DE L'ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

L'effet photovoltaïque a été observé pour la première fois par Becquerel en 1839, quand il a dirigé la lumière du soleil sur l'une des électrodes d'une cellule électrolytique, Mais même malgré la découverte de l'effet du sélénium photovoltaïque en 1877 par Adams et Day, il a fallu attendre jusqu'à 1955 pour que les chercheurs de Bell Telephone Laboratories (aux Etats-Unis) puissent réaliser et produire une cellule qui au moins un rendement de 6% de conversion énergétique, qui a été rapidement améliorée et augmentée à 10 %. Cet effet a surtout été utilisé pendant les exploitations dans l'univers, qu'elles aussi commençaient à se développer; Mais en exploitant toujours de plus en plus le charbon, les industriels du pétrole et du nucléaire en développement ne s'intéressaient pas sérieusement aux possibilités de l'énergie solaire avant la crise pétrolière de 1973. Les années 70 peuvent être considérées comme le berceau de l'énergie solaire (photovoltaïque).

Aussi que, l'augmentation de la consommation mondiale de l'énergie a amené de nouveau à développer et utiliser des sources renouvelables pour fournir de l'énergie, Par la suite, les applications terrestres de l'énergie solaire photovoltaïque ont retenu l'attention. [11] [13]

7. ANATOMIE D'UN MODULE PHOTOVOLTAÏQUE

Un module photovoltaïque ou un panneau solaire photovoltaïque est le convertisseur d'énergie lumineuse des photons compris dans les rayonnements solaires en énergie électrique, le module formé de plusieurs cellules photovoltaïques mises en série et en parallèle pour obtenir la tension désirée.

La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé, sa disposition, la température et le vieillissement de la cellule. Dans le processus de fabrication des panneaux PV, un contrôle de qualité très strict est mis en place, car ils sont exposés pendant de nombreuses années aux intempéries dans des conditions de chaleur extrêmes à glaciers froids, vent, humidité, etc. [14] [15]



FIGURE I-3 PANNEAU SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

7.1. CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES

Les cellules photovoltaïques sont les éléments les plus importants du panneau photovoltaïque. Ce sont des dispositifs à semi-conducteurs capables de produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire.

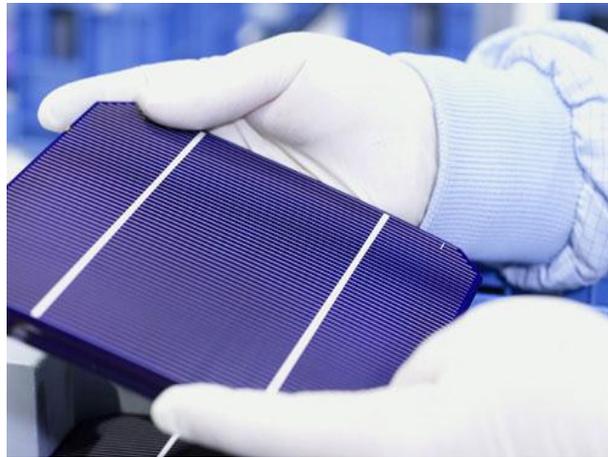


FIGURE I-4 CELLULE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

7.2. COUVERTE

Constituée de verre trempé à faible teneur en fer, la face avant du panneau PV a une fonction principalement protectrice car elle est soumise à des actions des agents et des impacts atmosphériques. Bien que la présence de la couverture soit nécessaire pour protéger les cellules PV, en fonction de la qualité du verre protecteur, elle peut réduire l'énergie du panneau solaire.

7.3. COUCHES ENCAPSULEES

Avec des matériaux qui fournissent une excellente transmission au rayonnement solaire, ces couches sont responsables de la protection des cellules solaires et de leurs contacts, généralement les constructeurs utilisent EVA qui est un copolymère thermoplastique d'acétate de vinyle et d'éthylène, car il agit comme un isolant thermique transparent qui permet aux cellules PV d'absorber la lumière du soleil. Assure aussi la cohésion du panneau dans son ensemble en remplissant le volume existant entre les couvercles avant et arrière, atténuant ainsi les vibrations et les impacts qui peuvent se produire.

7.4. CADRE DE SOUTIEN

Fait habituellement d'aluminium, le cadre de support d'un panneau solaire permet son insertion dans des structures qui regroupe les modules de la cellule, il représente donc la partie qui donne toute la robustesse mécanique au panneau, d'où l'importance de le construire avec un matériau résistant aux différentes conditions météorologiques.

7.5. PROTECTION ULTERIEURE

Les matériaux utilisés dans cette partie sont souvent transparent, cela favorise la performance du panneau en raison de la réflexion qu'il produit pour les cellules. Leur rôle consiste fondamentalement à protéger les cellules contre les agents atmosphériques, cela en exerçant une barrière insurmontable contre l'humidité.

7.6. BOITE DE CONNEXION ELECTRIQUE

Deux fils sortent de la boîte de connexion électrique, l'un positif et l'autre négatif. C'est l'endroit où il y a continuité dans le circuit électrique. Certains modules photovoltaïques ont une connexion à la terre, qui devrait être utilisée dans les installations de forte puissance. [16]



FIGURE I-5 ANATOMIE D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE.

8. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DE GENERATEUR PV

Basé sur l'effet photovoltaïque (la conversion de l'énergie lumineuse des photons en électricité) qui est l'origine du phénomène, la cellule solaire ou la photopile est un composant électronique, qui permet à l'exposition de la lumière de générer un courant électrique.

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, l'une dopée « N » par l'adjonction d'atomes de phosphore (P), Contient donc plus d'électrons qu'une couche de silicium pur et l'autre dopée « P » par l'adjonction d'atomes de bore (B), Contient donc moins d'électrons qu'une couche de silicium pur, créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. La différence de potentielle entre les deux couches se crée lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, car ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P).

Le champ électrique obtenu ne permet le passage du courant que dans un seul sens : les électrons peuvent passer de la région P vers la région N, inversement les trous ne passent pas de N vers P.

En somme, une cellule photovoltaïque est l'équivalent d'un générateur de courant auquel on a adjoint une diode. [14] [16] [17]

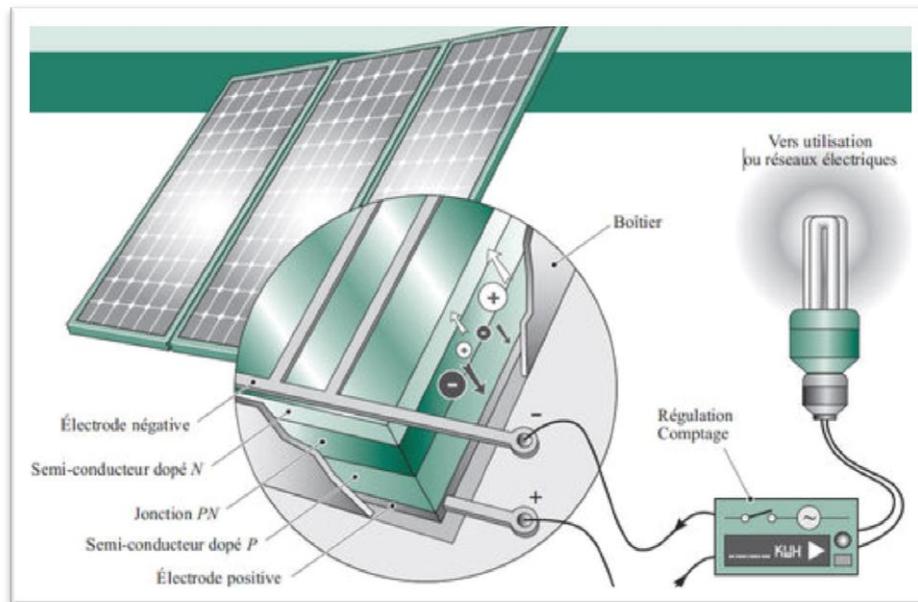


FIGURE I-6 ANATOMIE D'UN PANNEAU PHOTOVOLTAÏQUE.

9. LES DEFERENTES TECHNOLOGIES DES CELLULES SOLAIRES

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), de sulfure de cadmium (CdS), de tellure de cadmium (CdTe) ou d'arséniure de gallium (GaAs). actuellement le silicium est le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules, ce matériau est très abondant dans la nature et on le trouve sous la forme de pierre de silice (sable, grés), le choix se pose également sur la durabilité et le prix des cellules. Le choix peut par ailleurs varier en fonction de l'ensoleillement du projet, de sa situation géographique ou tout simplement de son orientation.

On peut distinguer trois grandes familles des cellules photovoltaïques :

9.1. LES CELLULES AU SILICIUM CRISTALLIN

9.1.1. LE SILICIUM MONOCRISTALLIN

Les cellules qui en sont composées sont les plus performantes sur le marché : elles présentent un bon rendement à fort et moyen éclairément. Toutefois, leur prix reste élevé. Le silicium monocristallin est un matériau pur à 99,999 % et se présente sous la forme d'un cristal unique de grandes dimensions. Il affiche les meilleurs rendements sur le marché des produits actuellement disponibles. [12]



FIGURE I-7 CELLULE EN SILICIUM MONOCRISTALLIN.

9.1.2. LE SILICIUM MULTI CRISTALLIN (POLY-CRISTALLIN) :

Leur conception étant plus facile, leur coût de fabrication est moins important, cependant leur rendement est plus faible. [12]

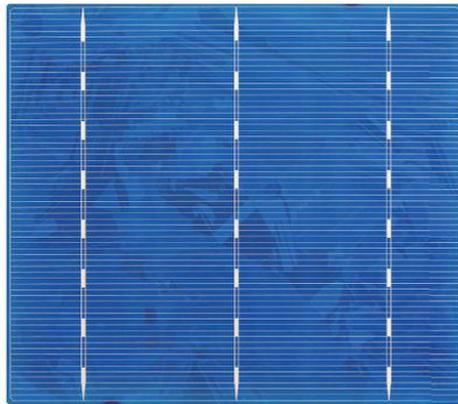


FIGURE I-8 CELLULE EN SILICIUM MONOCRISTALLIN.

9.2. LES CELLULES A BASE DE COUCHES MINCES

9.2.1. SILICIUM AMORPHE

Nettement moins puissant au soleil que les deux précédents, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et un coût peu élevé. Elles sont donc utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres..

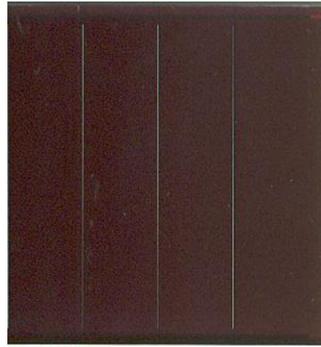


FIGURE I-9 CELLULE EN SILICIUM AMORPHE.

9.2.2. CUINSE2 (CIS) ET CUINGASE (CIGS)

À cause de difficultés d'industrialisation et surtout en raison du cadmium qu'elle contient (matériau dangereux), cette technologie est assez peu commercialisée, cependant, elle possède une bonne propriété électronique. De plus, elle bénéficie des mêmes commodités de fabrication que le silicium amorphe. [17]

9.2.3. CDTE

Le CdTe est une technologie qui permet d'augmenter le rendement des panneaux solaires, tout en diminuant leur coût. Mais, Il est important de noter que Ce type de cellules photovoltaïques n'est pas fabriqué à partir de silicium. Son composant de base est le tellure de cadmium. Ainsi que Le principal inconvénient de cette technologie réside dans la toxicité des produits utilisés à la fabrication de ce type de cellules.

9.3. LES CELLULES A BASE DE PHOTOVOLTAÏQUE ORGANIQUE

Cette technologie progresse également, elle est caractérisée par leur faible cout avec un faible rendement d'ordre de 3 à 5 %, aussi elle a un point faible qui est leur durée de vie limitée. [13]

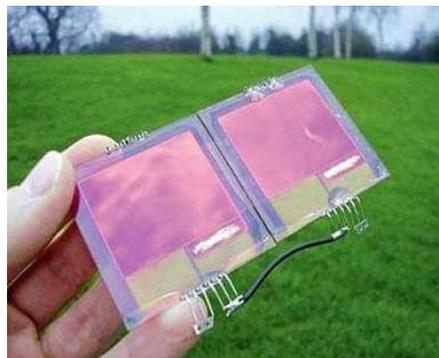


FIGURE I-10 CELLULE SOLAIRE ORGANIQUE

Nous regrouperons les différents types de technologie dans le tableau suivant [13] [17]:

TABLEAU I-3 LES DIFFERENTS TYPES DE TECHNOLOGIE DES CELLULES SOLAIRES.

Type de cellules	Rendement des cellules(%)			Domaines d'application
	théorique	En labo	disponible	
Silicium monocristallin	27	24.7	14-16	modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faibles puissances, espace (satellites)
Silicium poly cristallin	27	19.8	12-14	modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (reliés réseau ou sites isolés)
Silicium amorphe	25	13	6-8	appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre.) modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Arséniure de Gallium GaAs	29	27.5	18-20	systèmes de concentrateur, espace (satellites).
CIS	27.5	18.2	10-12	appareils de faibles puissances, modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment)
Tellurure de Gadmuim CdTe	28.5	16	9-11	modules de grandes dimensions (intégrations dans le bâtiment)

10. AVANTAGES ET INCONVENIENTS D'UNE INSTALLATION PV

En tant que source d'énergie, un système photovoltaïque offre des avantages mais aussi des inconvénients.

10.1. LES AVANTAGES

- Les systèmes photovoltaïques sont fiables : aucune pièce employée n'est en mouvement. Les matériaux utilisés (silicium, verre, aluminium), résistent aux conditions météorologiques extrêmes.
- un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant jusqu'au *MégaWatt*.
- combinable avec d'autres sources d'énergie pour augmenter le rendement du système.
- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologiques car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'énergie électrique à moindre coût. [18][19]

10.2. LES INCONVENIENTS

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15%.
- l'énergie issue du générateur photovoltaïque est continue, donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- Le stockage de l'énergie électrique par des batteries est nécessaire, par conséquent le coût du système photovoltaïque augmente.
- Les panneaux contiennent des produits toxiques et la filière de recyclage n'est pas encore existante.
- Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux problèmes. [4] [18]

11. CONCLUSION

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes notions qui entrent dans l'énergie solaire et la constitution d'un générateur photovoltaïque et nous avons exploré le principe de la conversion photovoltaïque et les technologies utilisées ainsi que les différents types des cellules photovoltaïques. Ensuite on a terminé par les avantages et les inconvénients de l'énergie solaire.

II. CHAPITRE 2

LE GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE

1. INTRODUCTION

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériau semi-conducteur, qui en présence de lumière, ou plus exactement de photons, elle est capable d'orienter les électrons de façon à créer une différence de potentiel et transformer directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant tension $I-V$ non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM). Cette caractéristique dépend de plusieurs paramètres, tel que, le niveau d'éclairement ainsi la température et le type des matériaux utilisés dans la fabrication des cellules.

Avant de passer à la modélisation mathématique de la cellule solaire, on peut définir cette notion comme étant une opération par laquelle nous serons capables de présenter un système complexe, sous forme d'un modèle formel. La modélisation mathématique d'une cellule photovoltaïque est représentée généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés à partir des caractéristiques courant-tension en fonction de l'ensoleillement et de la température.

Après avoir établi en détail les différents modèles de la cellule PV, nous allons aborder également dans ce chapitre les différents paramètres électriques de la cellule PV, ainsi les paramètres métrologiques qui influents sur les caractéristiques du GPV.

2. LES DIFFERENTS MODELES D'UNE CELLULE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE

La modélisation mathématique d'une cellule photovoltaïque est représentée généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés à partir des caractéristiques courant-tension en fonction de l'ensoleillement et de la température.

La modélisation est divisée en deux grandes perspectives, modèle à deux diodes et l'autre bien sur modèle à une seule diode, dans la suite on va voir les différents modèles électriques ainsi que leurs représentations.

2.1. MODELE A DEUX DIODES

2.1.1. MODELES A SEPT PARAMETRES (2M7P)

Il est connu par le nom 2M7P (2 Mechanism model with 7 Parameters), le schéma électrique équivalent est représenté dans la figure suivant.

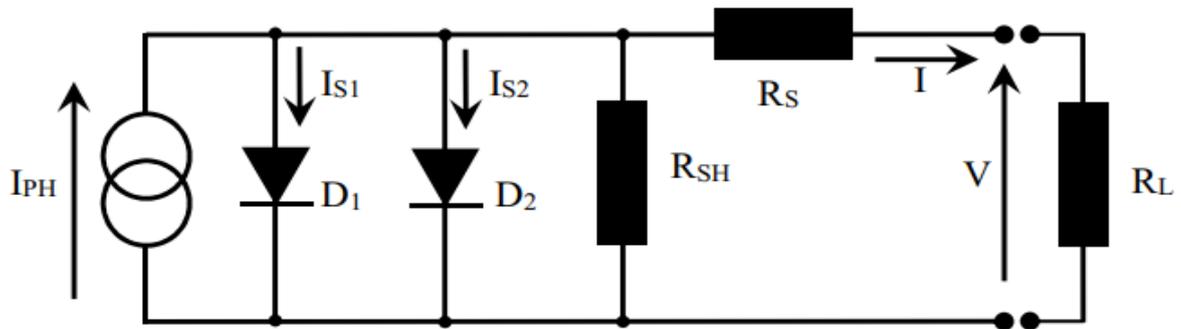


FIGURE II-1 MODELE A 7 PARAMETRES (2M7P).

La résistance série R_S représente de la résistivité du matériau utilisé, i.e. le contact entre le semi-conducteur et le métal. Pour limiter son influence sur le courant de la cellule elle doit être la plus faible possible, dans le cas idéal elle nulle.

La résistance parallèle (shunt) R_{SH} représente la présence d'un courant de fuite, causé par un défaut dans la phase de fabrication. Cette valeur devra être la plus élevée possible.

Ce modèle à deux diodes nous donne une équation implicite du courant $I(V)$ qui ne peut être résolue qu'à l'aide de méthodes itératives. Cette équation caractéristique $I(V)$ est représentée par

$$I = I_{PH} - I_{S1} \cdot \left(\exp\left(\frac{q \cdot (V + R_S \cdot I)}{\alpha_1 \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right) - I_{S2} \cdot \left(\exp\left(\frac{q \cdot (V + R_S \cdot I)}{\alpha_2 \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_S \cdot I}{R_{SH}}$$

Tel que :

- k : la constante de Boltzman.
- T : la température de la cellule.
- V : la tension au borne de la charge.
- I_{PH} : le photo-courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident).
- I_{S1} : courant inverse de saturation de la diode 1.

- I_{S2} : courant inverse de saturation de la diode 2.
- α_1 : le facteur de qualité de la diode 1.
- α_2 : le facteur de qualité de la diode 2.
- R_S : la résistance série.
- R_{SH} : la résistance parallèle.

2.1.2. MODELES A SIX PARAMETRES (2M6P)

Pour ce modèle on considère la résistance shunt infinie ($R_{SH} \rightarrow \infty$), le nombre de paramètres à déterminer devient 6 et le nom du modèle dans ce cas est 2M6P (2 Mechanism model with 6 Parameters). Cette simplification est justifiée par le fait que la résistance shunt est d'habitude beaucoup plus grande que les autres résistances, donc le courant qui la traverse est négligeable.

Le circuit électrique de la cellule pour ce modèle est représentée par le schéma électrique suivant

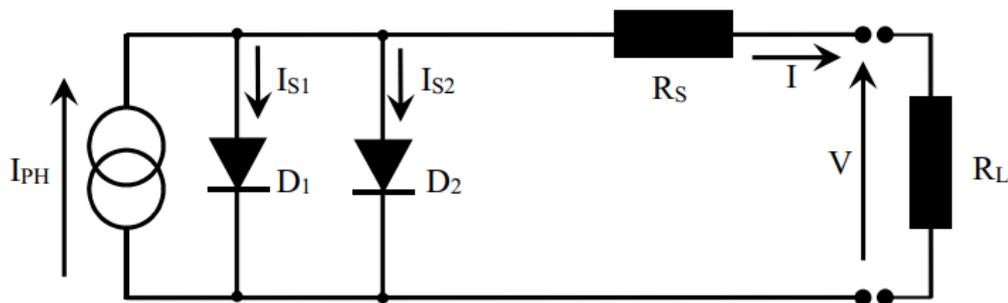


FIGURE II-2 MODELE A 6 PARAMETRES (2M6P) .

La relation courant-tension pour ce circuit est de la forme suivante

$$I = I_{PH} - I_{S1} \left(\exp\left(\frac{q \cdot V}{\alpha_1 \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right) - I_{S2} \left(\exp\left(\frac{q \cdot V}{\alpha_2 \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right)$$

2.2. MODELE A UNE SEULE DIODE

Ce modèle est considéré comme le **modèle standard**, il décrit le fonctionnement d'un module photovoltaïque. Il se généralise au modèle des panneaux photovoltaïques considérés comme un ensemble de cellules identiques branchées en série ou parallèle. Une description plus simple est obtenue à partir du modèle à une seule exponentielle. Ce

modèle contient une diode de moins par rapport au modèle à deux exponentielles, ce qui implique que ce modèle comporte dans l'équation de la caractéristique courant-tension une exponentielle de moins, cela implique une équation plus simple. [12]

Ce modèle à une diode est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante). [20]

2.2.1. MODELE A CINQ PARAMETRES (L5P)

Ce modèle est connu aussi sous le nom L5P (Lumped, 1Mechanism model with 5 Parameters). La cellule photovoltaïque se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, les pertes sont modélisées par les deux résistances, une résistance shunt et une résistance série. [12]

Le circuit électrique de la cellule est représentée par le schéma électrique suivant

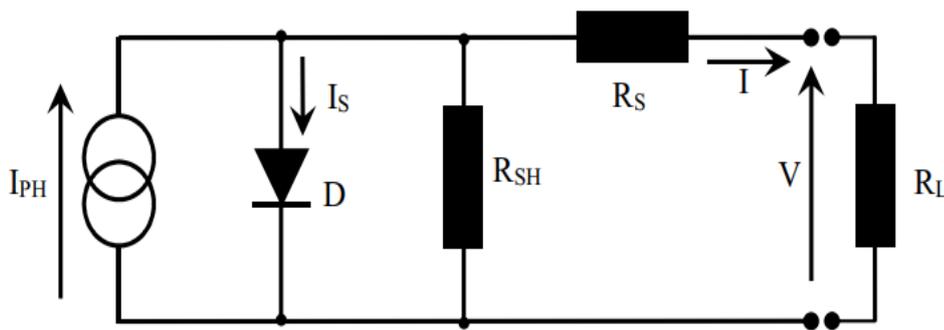


FIGURE II-3 MODELE A 5 PARAMETRES (L5P).

Tel que les cinq paramètres sont :

- I_{PH} : le courant photonique.
- I_S : courant de saturation.
- α : facteur de qualité de la diode.
- R_S : la résistance série.
- R_{SH} : la résistance parallèle.

L'équation du courant-tension est déterminée à partir de la loi de Kirchhoff, elle est donnée par

$$I = I_{PH} - I_S \left(\exp \left(\frac{q \cdot (V + R_S \cdot I)}{\alpha \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right) - \frac{V + R_S \cdot I}{R_{SH}}$$

2.2.2. MODELE A QUATRE PARAMETRES (L4P)

Ce modèle traite la cellule photovoltaïque comme une source de courant, dépendante de l'éclairement, connectée en parallèle avec une diode et en série avec une résistance série R_S . Il est connu par le modèle à quatre paramètres, il est largement utilisé. Ce modèle est connu aussi sous le nom L4P (Lumped, 1Mechanism model with 4 Parameters). Il est représenté par le schéma électrique suivant

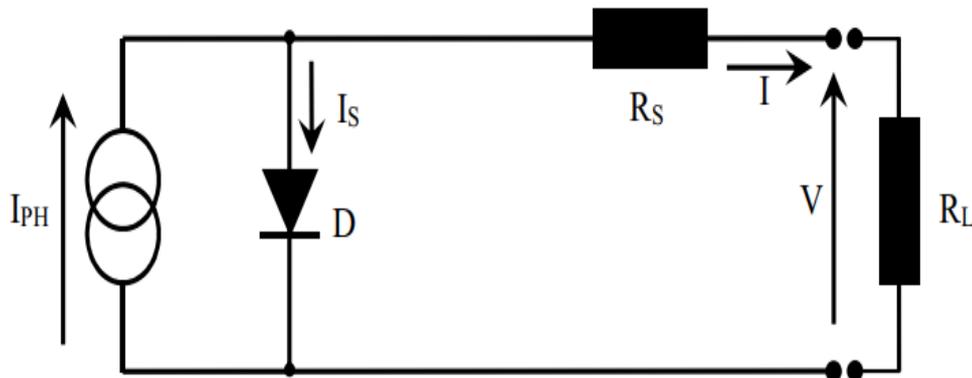


FIGURE II-4 MODELE A 4 PARAMETRES (L4P) .

Tel que les quatre paramètres de ce modèle sont :

- I_{PH} : le courant photonique.
- I_S : courant de saturation.
- α : facteur de qualité de la diode.
- R_S : la résistance séries.

Ces paramètres ne sont pas des quantités mesurables et ne sont pas généralement inclus dans les données des fabricants. Par conséquent, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations $I(V)$ pour différents points de fonctionnement donnés par les fabricants.

L'équation du courant-tension décrivant ce modèle est donnée comme suivant :

$$I = I_{PH} - I_S \left(\exp \left(\frac{q \cdot (V + R_S \cdot I)}{\alpha \cdot k \cdot T} \right) - 1 \right)$$

2.2.3. MODELE A TROIS PARAMETRES (L3P)

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant I_L proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à la jonction P-N de la cellule. Il est connu aussi sous le nom L3P (Lamped, 1Mechanism model with 3Parameters). Pour un générateur photovoltaïque idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode.

La cellule photovoltaïque pour ce modèle est représenté par le schéma électrique suivant

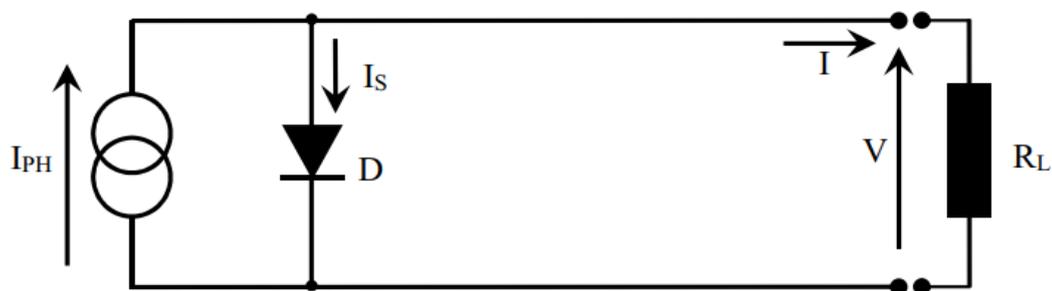


FIGURE II-5 MODELE A 3 PARAMETRES (L3P).

L'équation du courant-tension pour ce modèle est donnée par :

$$I = I_{PH} - I_S \left(\exp\left(\frac{q \cdot V}{\alpha \cdot k \cdot T}\right) - 1 \right)$$

3. LES CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES D'UN MODULE SOLAIRE

3.1. U_{CO} TENSION DE CIRCUIT OUVERT

Comme son nom l'indique, c'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie.

On la mesure à l'aide d'un voltmètre. Cette tension est de l'ordre de 0,7 V pour une cellule élémentaire (elle varie avec la technologie et l'éclairement). Un photo-générateur étant une association de cellules élémentaires, la tension à vide U_{co} sera typiquement égale à :

$$U_{co} = n \times 0,7 \text{ V}$$

Où n est le nombre de cellules. [17] [21]

3.2. ICC : COURANT DE COURT-CIRCUIT

À l'inverse du point de circuit ouvert .Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule. Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

C'est le courant que l'on peut mesurer en branchement direct sur un ampèremètre. [22]

3.3. PM : POINT DE PUISSANCE MAXIMALE

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à alimenter une charge sous la tension maximale et à un courant maximal. En effet, suivant la formule $P = UI$, pour que la puissance soit maximale, il faut être dans les conditions où le produit UI est maximal. C'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale P_m . On a coutume d'appeler U_m et I_m la tension et le courant correspondant à ce point $P_m = U_{pm} \cdot I_{pm}$. [17]

3.4. PUISSANCE-CRETE (P_c (WC))

La puissance maximale est fonction de l'éclairement. Lorsqu'il s'agit de la puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC (1 000 W/m², 25 °C, spectre solaire AM 1,5), on parle alors de watts-crête (Wc) ou de puissance-crête. [17]

3.5. FACTEUR DE FORME FF

Un paramètre important souvent utilisé à partir de la caractéristique $I(V)$ pour qualifier la qualité d'une cellule ou d'un générateur PV : c'est le facteur de remplissage ou « fill factor (FF) ». C'est le rapport entre la puissance maximale que peut fournir une cellule et la puissance qu'il est théoriquement possible d'obtenir (puissance optimale). [4]

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

3.6. LE RENDEMENT D'UN PHOTO-GENERATEUR

Le rendement η des cellules PV est la propriété la plus importante d'une cellule solaire. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente.

$$\eta = \frac{P_{\max x}}{P_{in}} = \frac{P_{\max}}{G \cdot S} = \frac{FF \cdot I_{cc} V_{co}}{P_{in}}$$

Comme toute la surface du module n'est pas recouverte de cellules solaires (par exemple, les cadres et l'espace entre les cellules solaires individuelles ne sont pas des surfaces actives), la valeur de rendement du module est inférieure à celle de la cellule individuelle

On peut calculer ce rendement pour différents éclairagements, mais le plus souvent, c'est dans les conditions STC qu'il est donné. On le calcule donc avec la puissance crête.

$$\eta = \frac{P_c}{1000 \cdot S}$$

12. CARACTERISTIQUES I (V) ET P (V) D'UN PPV

Pour des conditions d'éclairage et de température donnés, nous obtenons une caractéristique plus au moins standard de $i=f(v)$ de laquelle nous pouvons extraire une autre caractéristique aussi importante $p=f(v)$ en utilisant un multiplicateur $v \cdot i$. L'importance de cette deuxième caractéristique c'est qu'elle met en relief un point de fonctionnement à puissance maximum MPP.

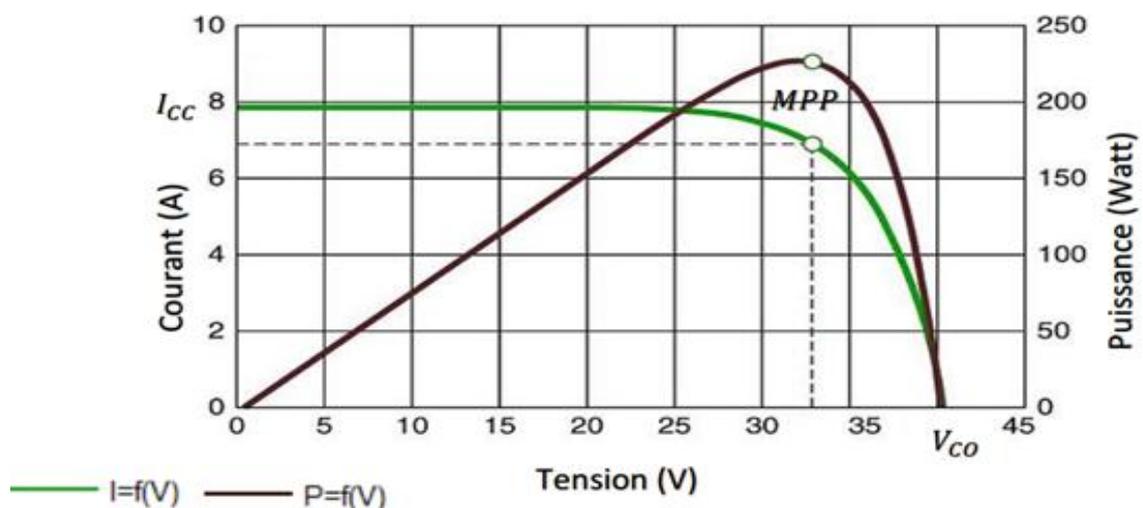


FIGURE II-6 CARACTERISTIQUES COURANT-TENSION ET PUISSANCE-TENSION D'UN PPV

3.7. INFLUENCE D'ÉCLAIREMENT SOLAIRE

L'énergie électrique produite par une cellule photovoltaïque dépend de l'éclairement qu'elle reçoit sur sa surface.

La figure suivante représente la caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque à une température constante.

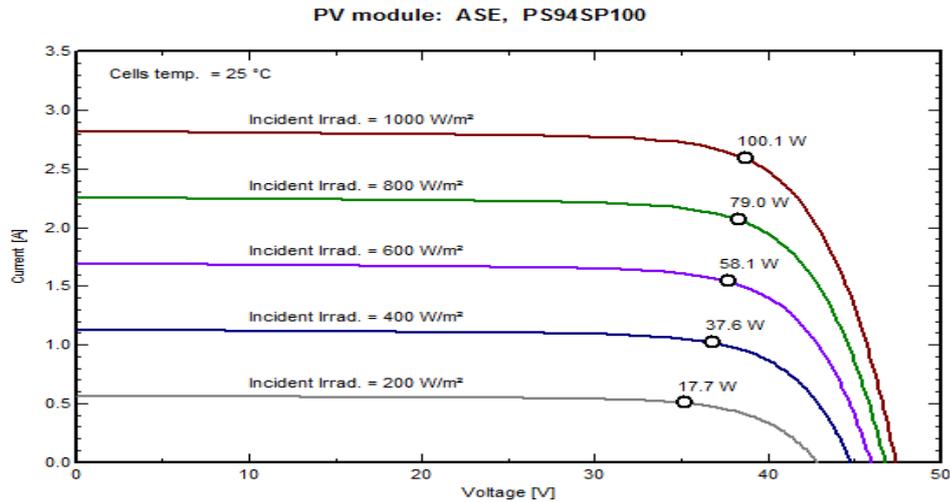


FIGURE II-7 COURBES I (V) D'UN PANNEAU SOLAIRE A DIVERS ECLAIREMENTS.

A température constante, la caractéristique $I = f(v)$ dépend évidemment de l'éclairement : sur la courbe précédente, on remarque que le courant de court-circuit augmente avec l'éclairement alors que la tension à vide varie peu.

La figure suivante représente la caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque à une température constante.

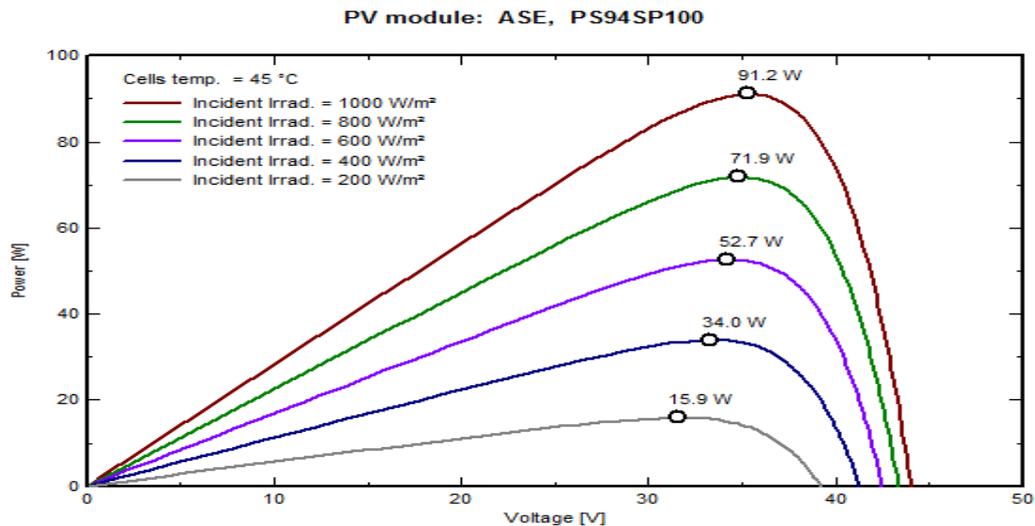


FIGURE II-8 COURBES P (V) D'UN PANNEAU SOLAIRE A DIVERS ECLAIREMENTS.

On constate également que le courant est directement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairage et la tension n'est pas dégradée.

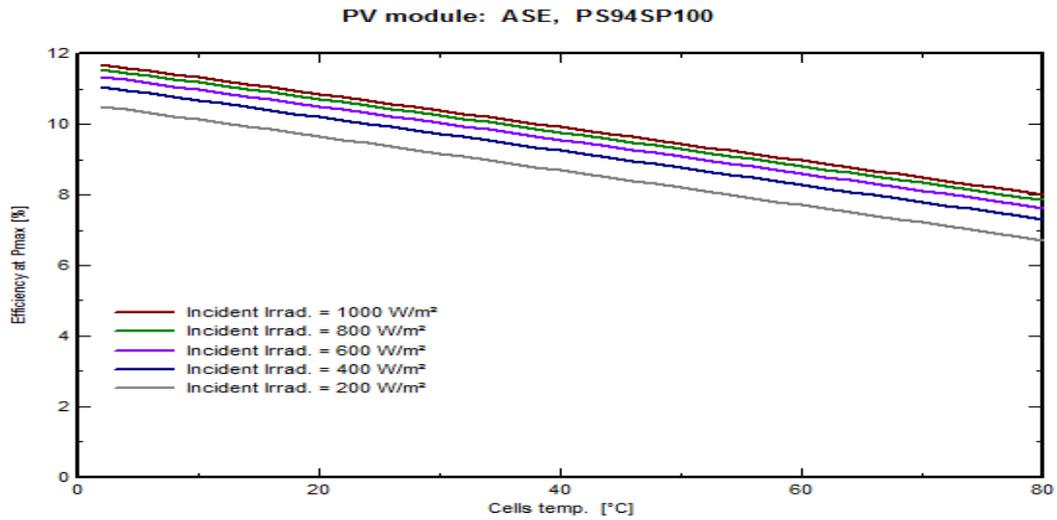


FIGURE II-9 COURBE H (T) D'UN PANNEAU SOLAIRE A DIVERS ECLAIREMENTS.

Cette fois la figure ci-dessus représente l'effet de la densité d'éclairage sur le rendement du panneau dont laquelle on remarque qu'il y a une relation proportionnelle entre ces deux paramètres.

3.8. INFLUENCE DE LA TEMPERATURE

La température est un paramètre important puisque les modules sont exposés au rayonnement solaire. Les courbes suivantes représentent l'évolution du courant et de la tension en fonction de la température de la cellule durant le même éclairage.

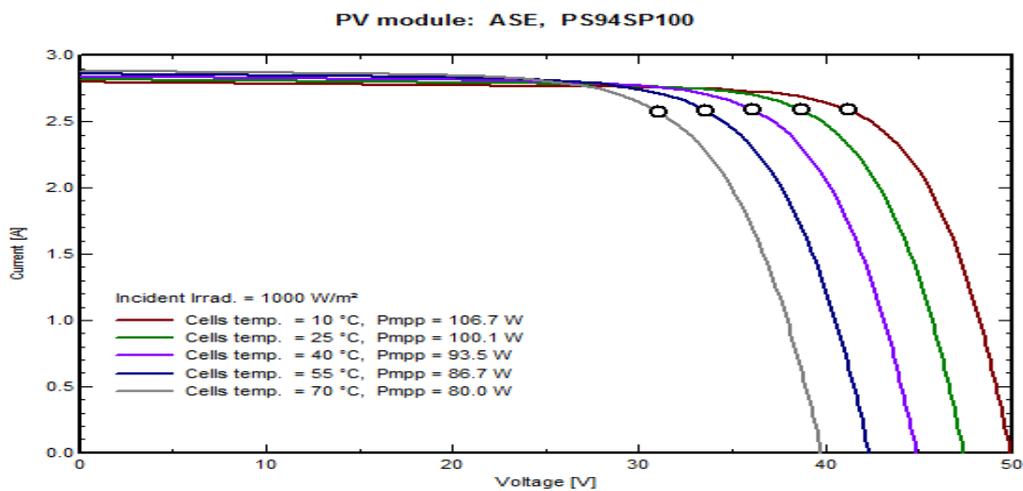


FIGURE II-10 COURBES I (V) D'UN PANNEAU SOLAIRE A DIVERS TEMPERATURE.

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules PV ; Nous remarquons que le courant augmente avec la température; par contre la tension de circuit ouvert diminue. Ceci entraîne une diminution de la puissance maximale disponible.

La figure suivante représente la caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque à une température constante.

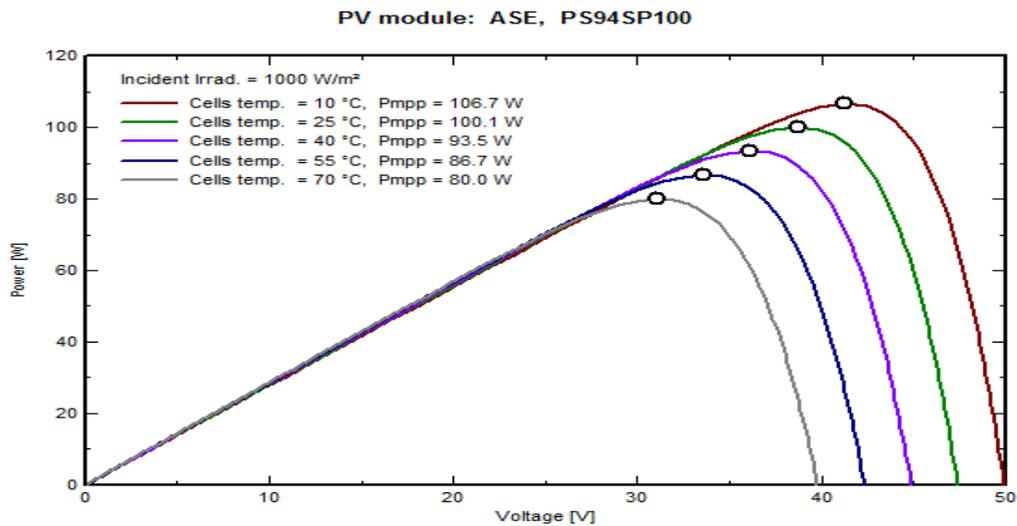


FIGURE II-11 COURBES P (V) D'UN PANNEAU SOLAIRE A DIVERS TEMPERATURE.

On constate également que le courant est inversement proportionnel au rayonnement à ces niveaux d'éclairément et la tension n'est pas dégradée.

La dernière figure représente l'effet de la température sur le rendement, par laquelle on remarque que la variation du rendement est inversement proportionnelle avec la variation de la température.

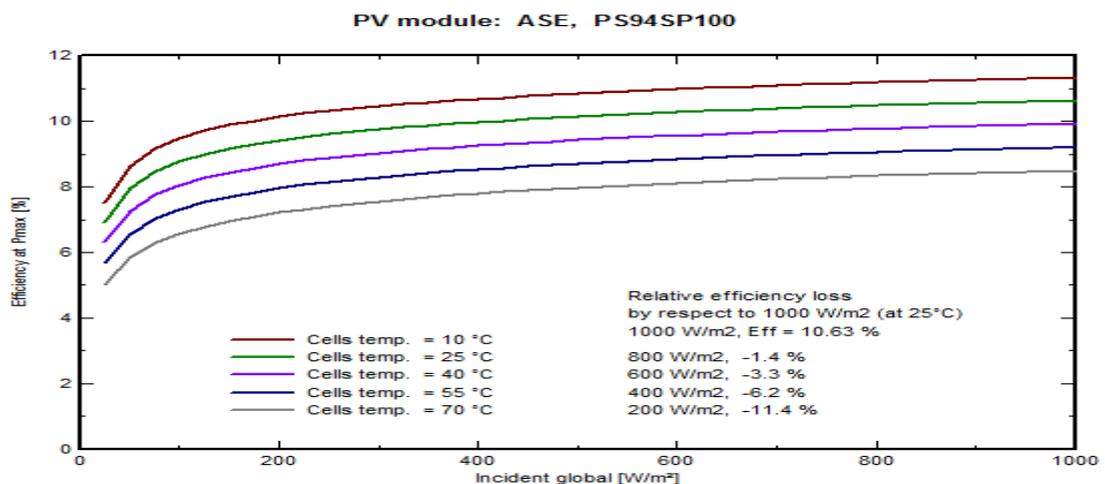


FIGURE II-12 COURBE H (G) D'UN PANNEAU SOLAIRE A DIVERS ECLAIREMENTS.

4. PROTECTIONS CLASSIQUES D'UN GENERATEUR PV

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leur fonctionnement en cas d'ombrage.

Pour cela, deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles :

- La protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (diode anti-retour).
- La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass) et éviter les points chauds. [10]

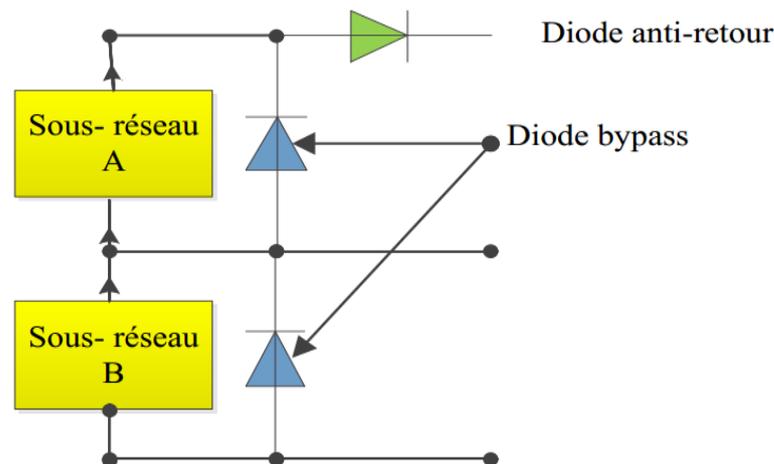


FIGURE II-13 PROTECTION D'UN GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

5. CONCLUSION

Nous avons présenté au cours de ce chapitre les différents modèles de la cellule PV, ensuite nous avons considérés les différents paramètres du circuit équivalent qui permettent de tracer la caractéristique I(V) où nous avons remarqués que les performances d'un GPV sont fortement influencées par des conditions métrologiques tel que l'éclairement et la température ainsi par les paramètres internes (résistance série et parallèle).

III. CHAPITRE 3

PRESENTATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE AUTONOME

1. INTRODUCTION

Les systèmes photovoltaïques (PV) peuvent être regroupés en systèmes autonomes et en systèmes connectés au réseau. Dans les systèmes autonomes, le rendement énergétique solaire est adapté à la demande d'énergie. Etant donné que le rendement énergétique solaire ne coïncide souvent pas dans le temps avec la demande d'énergie des consommateurs raccordés, des systèmes de stockage supplémentaires (batteries) sont généralement utilisés. Si le système PV est alimenté par une source d'énergie supplémentaire, par exemple, un générateur éolien ou diesel, on parle d'un système photovoltaïque hybride.

Pour protéger les systèmes de stockage (batteries) et obtenir une plus grande disponibilité et une plus longue durée de vie, il est essentiel d'utiliser un régulateur de charge approprié en tant qu'unité de gestion de l'alimentation. Par conséquent, un système autonome typique comprend les principaux éléments suivants : les modules PV, généralement connectés en parallèle ou en série, le régulateur de charge, les batteries ou banc de batteries, l'onduleur dont les systèmes fournissant du courant alternatif (CA) et la charge.

Il existe actuellement une très grande variété de systèmes autonomes. Les exemples vont des calculatrices et montres solaires aux systèmes de contrôle de la circulation en passant par les systèmes capables d'alimenter en électricité un ou plusieurs bâtiments dans des zones reculées. Il peut s'agir de systèmes à courant continu avec ou sans batterie de stockage, ou de systèmes à courant alternatif avec onduleur. [3] [23]

2. COMPOSANTS D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME

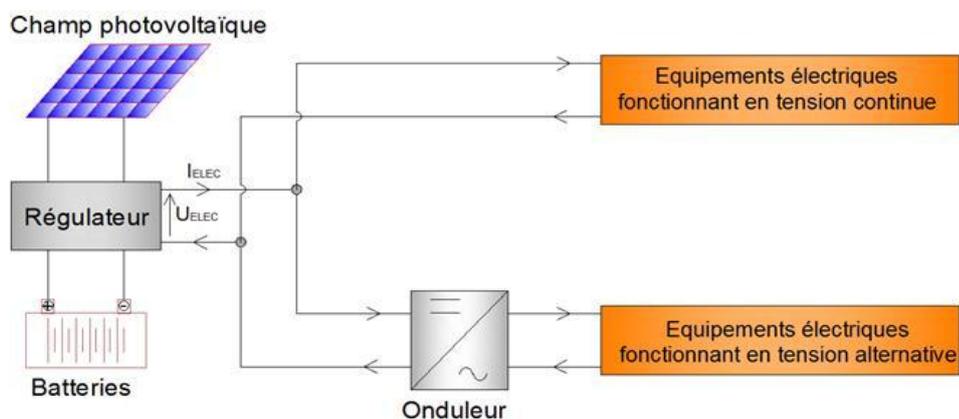


FIGURE III-1 SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE AUTONOME.

2.1. LES MODULES PV

Les modules des panneaux photovoltaïques dans les systèmes autonomes sont généralement configurés pour fournir des tensions continues nominales de 12V, 24V et, dans les systèmes plus grands, 48V. Cela signifie que les modules sont généralement connectés en série. Afin de faciliter l'interconnexion des modules, il est préférable d'utiliser des modules avec boîtes de jonction plutôt que des modules avec câbles enfichables (comme c'est le cas pour configurer les longues chaînes utilisées dans les réseaux connectés au réseau). La plupart des systèmes autonomes sont 24V. [24]



FIGURE III-2 LE CHAMP PHOTOVOLTAÏQUE.

2.2. LES BATTERIES OU BANC DE BATTERIES (SYSTEME DE STOCKAGE)

La plupart des systèmes solaires autonomes sont équipés de batteries, car la production et la consommation d'énergie ne se coïncident généralement pas. Le type de batterie le plus courant que l'on trouve dans les systèmes solaires autonomes comprend les batteries rechargeables au plomb-acide. Ce sont les plus rentables et peuvent gérer des courants de charge petits et grands avec une grande efficacité. Dans les systèmes PV, les capacités de stockage se situent généralement entre 0.1 kWh et 100 kWh, bien que quelques systèmes de l'ordre du MWh aient déjà été mis en œuvre. Les autres types de piles rechargeables disponibles dans le commerce sont les suivants les piles nickel-cadmium, nickel-métal hydrure et lithium-ion. [3]

Pour les systèmes de petite puissance, une tension de 12 V est préférée, les récepteurs alimentés en 12 V étant plus fréquents. Mais au-delà de 2.5 kWh stocké, on passera en 24 V ou plus pour limiter les pertes ohmiques en gardant des sections de

câble raisonnables. Les batteries sont commercialisées en cellules de 2V, de 200 Ah à 3000 Ah ou en ensemble 12 V jusqu'à 400 Ah. On évitera si possible de mettre en parallèle des batteries. [25] [26]



FIGURE III-3 BANC DE BATTERIES POUR UN SYSTEME PV AUTONOME.

2.2.1. CARACTERISTIQUES DES BATTERIES

- **La capacité (C en Ampère Heure -Ah-)** : est la quantité d'électricité qu'un accumulateur peut fournir dans un axe de temps. Plus une batterie est chargée ou déchargée avec un courant faible, plus sa capacité est importante. [3]
- **L'état de charge** : est défini comme la quantité d'énergie en pourcentage de l'énergie stockée dans une batterie. [27]
- **Autonomie** : nombre de jours pendant lesquels la batterie doit fournir la puissance requise sans être recharger ni subir de dommage.
- **Courant de surcharge** : une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelque instant, c'est à dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV.
- **Stabilisation de la tension** : une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée.

- **Cycle, durée de vie, profondeur de décharge et courants de décharge maximaux** : généralement, les batteries des systèmes PV sont chargées chaque jour par le générateur PV, puis déchargées par la charge chaque nuit (bien que ce ne soit pas toujours le cas dans les grands systèmes où certaines charges sont également alimentées pendant la journée). Chaque période de charge ainsi que la période de décharge suivantes sont appelées " cycle ".
- **Durée de vie nominale** : durée de vie nominale d'une batterie (qui doit être mentionnée par le fabricant) : est le nombre de cycles qu'une batterie est prévue pour durer avant que sa capacité se réduit à 80 % de sa capacité nominale initiale.

Notez que la durée du cycle est déterminée par la profondeur moyenne de décharge par cycle ; une batterie cyclée à 30 % durera plus longtemps qu'une batterie cyclée à 70 % - ainsi que par sa température moyenne.

Notez également qu'une batterie à cycle profond a une durée de vie beaucoup plus courte qu'une batterie à cycle court. La durée de vie réelle d'une batterie est considérablement raccourcie par des mauvais traitements tels qu'une décharge profonde, une température élevée et des taux de décharge élevés. Une différence de température de 10 °C peut réduire de **moitié** la durée du cycle.

- **Profondeur de décharge (DoD i.e. Depth of discharge)** : est un autre terme utilisé par les fabricants pour exprimer la quantité de batteries déchargées au cours d'un cycle avant qu'elles ne soient rechargées. Une batterie à 20 % DoD est la même qu'une batterie à 80 pour cent d'état de charge. Une batterie à 75 % DoD est à 25 pour cent d'état de charge. Les batteries à cycle peu profond ne doivent pas être déchargées régulièrement à moins de 20 % de leur capacité nominale (80 % de leur état de charge). Même les batteries à décharge profonde ne doivent pas être régulièrement déchargées à moins de 60 % de leur capacité nominale (40 % de leur état de charge).
- **Cycle de décharge profonde** : est un cycle au cours duquel une batterie est presque complètement déchargée. Cela se produit généralement pendant les longues périodes nuageuses ou lorsque la charge est beaucoup plus importante que la charge solaire.
- **Courant de décharge maximum** : fait référence au courant maximum qui peut être prélevé d'une batterie à n'importe quel moment sans réduire de manière

significative la durée de vie de la batterie. Cela peut poser un problème, en particulier lorsque de gros onduleurs sont connectés à des batteries.

- **Autodécharge** : si elles ne sont pas déchargées, toutes les batteries perdent lentement leur charge par un processus appelé " autodécharge ". Cela se produit à cause des réactions à l'intérieur des cellules de la batterie (par exemple, les voitures laissées inutilisées pendant plusieurs mois ne démarrent souvent pas à cause des batteries auto-déchargées.

La vitesse à laquelle les batteries s'autodéchargent dépend de la température, du type de batterie, de son âge et de son état. Au fur et à mesure que les batteries vieillissent, les taux d'autodécharge augmentent. De plus, les températures ambiantes élevées augmentent le taux d'autodécharge. Normalement, les batteries neuves ne se déchargent pas de plus de 5 % par mois.

2.2.2. LE CHOIX DE LA MEILLEURE BATTERIE

Lors du choix de votre batterie, on doit tenir en compte des éléments suivants :

- Prix. En générale les batteries ont des coûts très élevés dans l'installation PV,
- Capacité. Le choix de la taille de batterie adaptée aux besoins est important,
- Durée de vie du cycle. En général, plus la batterie est bonne, plus la durée du cycle est longue.
- Remplacement et disponibilité. Il est sage de choisir une batterie disponible localement. Lorsque vient le temps de remplacer l'ensemble, il est plus probable que vous serez en mesure de trouver un type similaire. Le transport de batteries dans le monde entier est coûteux, long et énergivore.
- Maintenance. Choisissez une batterie qui répond à vos besoins d'entretien et à vos capacités. S'il est peu probable que les batteries soient maintenues, pensez à dépenser un peu plus pour des appareils " sans entretien ". Mais aucune batterie n'est vraiment " sans entretien " parce que le système doit être géré sinon il ne fonctionnera pas bien,
- Taille. Soyez conscient de la taille physique de la batterie et de l'endroit où elle va être placée.

- Mobilité. Si votre batterie doit être déplacée (non recommandée mais parfois nécessaire), choisissez un type qui ne sera pas endommagé par les vibrations et l'inclinaison. [17]

Le tableau suivant compare les caractéristiques techniques de différentes batteries [20] [26] :

TABLEAU III-1 COMPARAISON DES CARACTERISTIQUES TECHNIQUES DES BATTERIES.

Technologie	Plomb	Ni/Cd	Ni/MH	Li/Ion
Rendement (%)	>80	75	70	>95
Tension de cellule	2 V	1.2	1.2	3.6
Taux d'autodécharge mensuel	5%	20%	30%	<5%
Nombre de cycle	500-1000	800	750-1200	1000
Durée de la charge	8–16 h	1 h	2–4 h	<1 h
Fréquence des besoins d'entretien	Tous les 3-6 mois	Tous les 30 à 60 jours	Tous les 60 à 90 jours	Pas nécessaire
Avantages	Faible coût	Fiabilité Performances à froid	Très bonne densité d'énergie	Excellente puissance et énergie
Inconvénient	Durée de vie	Toxicité	Comportement en température	Le coût élevé

2.3. LE REGULATEUR DE CHARGE

Il est très important de charger et de décharger les batteries à des niveaux de tension et de courant appropriés afin d'assurer une longue durée de vie aux batteries. Une batterie est un dispositif électrochimique qui nécessite un faible potentiel de surcharge pour être chargé. Cependant, les batteries ont des limites de tension strictes, qui sont nécessaires à leur fonctionnement optimal. [28]

De plus, la quantité de courant envoyée à la batterie par le générateur PV et le courant circulant dans la batterie pendant la décharge doivent être dans des limites bien définies pour le bon fonctionnement de la batterie. D'autre part, le générateur PV réagit dynamiquement aux conditions ambiantes telles que le rayonnement, la température et d'autres facteurs tels que l'ombrage. Ainsi, le couplage direct entre la batterie et le générateur PV et les charges est préjudiciable à la durée de vie de la batterie.

Il faut donc un dispositif qui contrôle les courants circulant entre la batterie, le générateur PV et la charge, afin de s'assurer que les paramètres électriques présents dans la batterie sont conformes aux spécifications données par le fabricant de la batterie. Ces tâches sont effectuées par un régulateur de charge, qui a plusieurs fonctionnalités différentes, selon le fabricant. Nous discuterons des fonctionnalités les plus importantes.

Lorsque le soleil atteint les heures de pointe de l'été, la puissance PV produite excède la charge. L'énergie excédentaire est envoyée à la batterie. Lorsque la batterie est complètement chargée et que le générateur PV est toujours connecté à la batterie, la batterie peut surcharger, ce qui peut causer plusieurs problèmes comme la formation de gaz, la perte de capacité ou la surchauffe. Ici, le régulateur de charge joue un rôle essentiel en découplant le générateur PV de la batterie.

De même, pendant les journées hivernales (en hiver) sévères à faible éclairage énergétique, la charge dépasse la puissance générée par le générateur PV, de sorte que la batterie est fortement déchargée. Une décharge excessive de la batterie a un effet négatif sur la durée de vie du cycle. Le régulateur de charge empêche la batterie d'être trop déchargée en déconnectant la batterie de la charge.

Si aucune diode de blocage n'est utilisée, il est même possible que la batterie puisse "charger" le générateur PV lorsqu'il fonctionne à très basse tension. Cela signifie que la batterie imposera une polarisation vers l'avant sur les modules PV et les fera consommer l'énergie de la batterie, ce qui entraîne le réchauffement des cellules solaires.

Traditionnellement, des diodes de blocage sont utilisées au niveau du panneau PV ou de la chaîne pour empêcher la décharge de la batterie à travers le champ PV. Cependant, cette fonction s'intègre facilement dans le régulateur de charge. [28]



FIGURE III-4 REGULATEUR DE LA CHARGE.

D'autre part, la température joue un rôle essentiel dans le fonctionnement de la batterie. Non seulement la température affecte la durée de vie de la batterie, mais elle modifie également ses paramètres électriques de manière significative. Ainsi, les régulateurs de charge modernes sont équipés d'une sonde de température qui est fixée au dos de la batterie. Ce capteur permet au contrôleur de charge d'ajuster les paramètres électriques de la batterie, tels que la tension de fonctionnement, à la température. Le régulateur de charge maintient ainsi la plage de fonctionnement de la batterie dans la plage de tension optimale. [3]

2.4. L'ONDULEUR

Les panneaux solaires produisent de l'électricité en courant continu, mais la plupart des appareils domestiques et industriels ont besoin de courant alternatif.

Un onduleur, est un dispositif permettant de transformer une énergie électrique de type continue en type alternatif. La fonction principale de cet dispositif est de créer au niveau de sa sortie une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace à partir d'une tension continue en entrée. [29] [30]



FIGURE III-5 L'ONDULEUR

Un onduleur est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde.

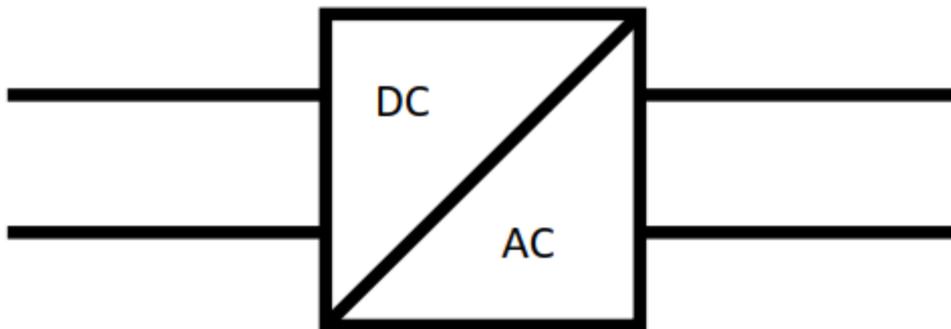


FIGURE III-6 SYMBOLE D'UN ONDULEUR (CONVERTISSEUR DC-AC).

Les caractéristiques principales d'un onduleur autonome sont les suivantes :

- La tension d'entrée (12V, 24V ou 48 V)
- La tension de sortie 230V AC à 50 Hz (parfois la forme d'onde est sinusoïdale, plus souvent carrée ou pseudo sinusoïdale ce qui se traduit par une augmentation des pertes quand la charge est un moteur)
- La puissance nominale et la puissance en pointe (typiquement 50% de plus que la valeur nominale)
- Le rendement (généralement > à 90% mais donné en fonctionnement nominal, et donc beaucoup plus mauvais pour une puissance inférieure)
- Les protections (court-circuit charge, chute de tension côté batterie)
- Le prix (très variable selon le type et la puissance des charges utilisées). [25]

2.5. LES CABLES

La performance globale des systèmes PV dépend fortement du choix correct des câbles. Les systèmes PV contiennent généralement des pièces DC et AC. Pour installer correctement un système PV, il est important de connaître les conventions de couleur.

Pour les câbles CC :

- le rouge est utilisé pour connecter les contacts + des différents composants du système,
- Le noir est utilisé pour le raccordement des contacts - et pour l'interconnexion des modules entre eux.

L'indication de polarité se fait par l'utilisation de connecteurs dédiés avec des marquages de polarité.

Pour le câblage CA, différentes conventions de couleurs sont utilisées dans le monde entier.

Par exemple, dans l'Union européenne, le bleu est utilisé pour le neutre, le vert-jaune est utilisé pour la terre de protection et le brun (ou une autre couleur comme le noir ou le gris) est utilisé pour la phase.

Aux États-Unis et au Canada, l'argent est utilisé pour le neutre, le vert-jaune, le vert ou un conducteur nu est utilisé pour la terre de protection, et le noir (ou une autre couleur) est utilisé pour la phase.

Il est donc très important de vérifier les normes du pays dans lequel le système PV va être installé.

Les câbles doivent être choisis de telle sorte que les pertes résistives soient minimales. Pour estimer ces pertes, nous examinons un système très simple qui est illustré à la figure suivante :

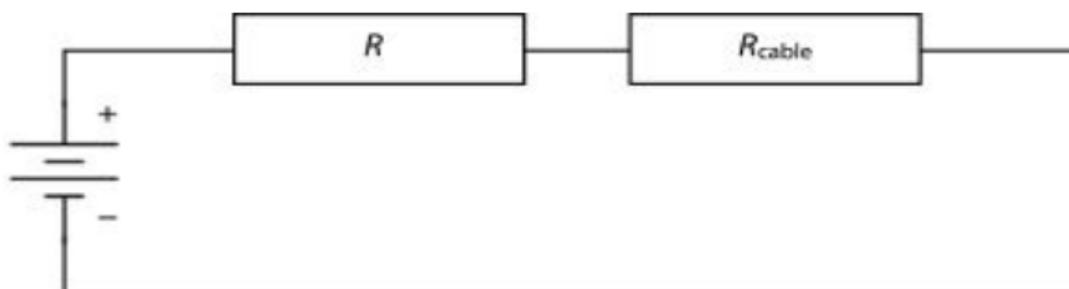


FIGURE III-7 UN CIRCUIT AVEC UNE CHARGE R ET UNE RESISTANCE DE CABLE R.

Le système se compose d'une source d'énergie et d'une charge à résistance R, et les câbles ont un câble à résistance R, qui est également illustré. La puissance dissipée au niveau des câbles est indiquée comme suite :

$$P \text{ câble} = I * \Delta V \text{ câble}$$

Où ΔV câble est la chute de tension à travers le câble, qui est donnée comme suite :

$$\Delta V \text{ câble} = V \frac{R \text{ câble}}{R + R \text{ câble}}$$

En utilisant :

$$V = I (R + R \text{ câble})$$

On trouve :

$$P \text{ câble} = I^2 . R \text{ câble}$$

Ainsi, quand le courant double, quatre fois plus de chaleur sera dissipée aux câbles. Il est maintenant évident pourquoi les modules modernes ont toutes les cellules connectées en série.

Calculons maintenant la résistance d'un câble de longueur L et de section S. Il est clair que si L est doublé, le câble R double aussi. En par contre, si S double, R câble moitié. La résistance est donc donnée par

$$R \text{ câble} = \rho \frac{L}{S} = \frac{1}{\sigma} \frac{L}{S}$$

Où ρ est la résistance ou résistivité spécifique et σ est la conductance ou conductivité spécifique. Si L et S sont tous deux donnés en mètres, leurs unités sont $[\rho] = 1/[\sigma]$ et $[\sigma] = S/m$, où S désigne l'unité de conductivité, qui est siemens. Notez que la résistivité dépend également de la température.

Pour les câbles électriques, il est pratique d'avoir L en mètres et S en mm². [28]

Les sections habituelles des câbles sont 1,5 mm², 2,5 mm², 4 mm², 6 mm², 10 mm², 16 mm², 25 mm², 35 mm², etc. Pour les chaînes de modules PV connectées en série, on utilise le plus souvent des câbles de 4 mm². Les câbles CC doivent généralement être

certifiés pour des tensions allant jusqu'à 1 kV ; en outre, ils doivent être blindés avec un matériau résistant aux UV, car ils sont souvent exposés au rayonnement solaire.



FIGURE III-8 LES CABLES DE L'INSTALLATION PHOTOVOLTAÏQUE.

3. LES AVANTAGES DE L'INSTALLATION PV AUTONOME :

- Avoir accès à l'électricité dans des endroits isolés non raccordés au réseau
- Produire et consommer sa propre énergie propre!
- Ne pas dépendre du réseau électrique pour le rachat de l'électricité produite
- Avoir la possibilité de tester une petite installation à faible coût

13. LES CONDITIONS ET INCONVENIENTS D'UNE INSTALLATION PV AUTONOME :

- La nécessité d'un dimensionnement approprié de son système afin de ne jamais manquer d'électricité
- La dépendance au soleil
- La nécessité de maîtriser sa consommation électrique
- Le coût des batteries [31]

4. CONCLUSION

Les installations photovoltaïques doivent être dimensionnées pour qu'elles puissent fournir de l'énergie dans les conditions les plus défavorables, ce qui nous permet d'aboutir à une meilleure optimisation des installations photovoltaïques, dans ce chapitre nous avons présenté les principaux éléments d'une installation solaire photovoltaïque telle que les générateur PV, les batteries, l'onduleur, le régulateur et les câbles, ce qui est une bonne introduction au calcul des différents paramètres des composants électriques de l'installation PV. Développement

IV. CHAPITRE 4

CALCUL ELECTRIQUE ET DEVELOPPEMENT D'UNE INTERFACE GRAPHIQUE GUI

1. INTRODUCTION

Après avoir présenté les différents éléments d'une installation PV autonome, nous allons passer au dimensionnement électrique de cette installation, dont laquelle on a développé une interface graphique (GUI) permettant de calculer les différents paramètres électriques et d'afficher les résultats dans une interface interactive entre le programme et l'utilisateur.

Dans ce chapitre, nous présentons le calcul des différents paramètres électriques des éléments de protection (fusibles et disjoncteurs), ainsi que les sections des câbles entre les différents composants électriques de l'installation. Ensuite, nous ferons une présentation de notre programme sur Matlab, qui vise à faciliter la mise en place des calculs analytiques.

2. CALCULS DES DIFFERENTS PARAMETRES ELECTRIQUES

La partie électrique d'une installation photovoltaïque autonome doit répondre à certaines contraintes réglementaires et certaines normes permettant de garantir la protection des biens et des personnes ainsi que d'assurer de bonnes conditions d'exploitation. Pour cela on a suivi le guide de l'UTE C15-712-1 qui est le texte réglementaire de référence des installations photovoltaïques.

2.1. LES FUSIBLES CC

Dans une installation photovoltaïque, le rôle des fusibles est de protéger les modules photovoltaïques contre les risques de surintensité générés par une défaillance de la charge électrique.

Dans la partie CC, des surintensités apparaissent sous forme de courant retour. Lorsqu'ils sont trop importants, les courants retours peuvent endommager les modules photovoltaïques.

De façon générale, les modules photovoltaïques peuvent supporter un courant retour maximal égal à $2 \times I_{cc}$, mais cela dépend de chaque fabricant.

Pour protéger les modules contre les courants retours, il existe plusieurs solutions ; parmi ses solutions l'utilisation des diodes de découplage au niveau de chaque chaîne pour empêcher le courant de circuler en sens inverse. Ce procédé coûte cher et produit

des chutes de tension singulières au niveau des diodes ; une autre méthode pratique consiste à installer des disjoncteurs et des fusibles avec un calibre adapté.

Les fusibles utilisés doivent présenter les caractéristiques suivantes :

- Etre spécifique à une application en courant continu,
- à fusion rapide,
- Etre indépendantes du sens de passage du courant,
- Présenter une tension assignée U_N supérieure à la tension maximale du système.

[7]

2.1.1. MODE DE FONCTIONNEMENT DES FUSIBLES CC

Le fusible doit assurer le rôle de conduction du courant dans l'état de fonctionnement normal. Lors de l'apparition d'un défaut électrique un courant anormalement élevé par rapport au courant nominal de conduction apparaît, le fusible qui se présente sous la forme d'un ruban ou d'un fil métallique, assure alors le rôle de coupure, fond puis se vaporise en raison de l'apport d'énergie par le défaut électrique qu'il doit interrompre. [7]



FIGURE IV-1 UN FUSIBLE EN VERRE.

NB : à partir de trois chaînes en parallèle, le courant retour est susceptible de dépasser la valeur du courant IRM. Il est donc nécessaire d'installer des fusibles à partir de 3 chaînes en parallèle, avec ce type de module.

2.1.2. EMBLACEMENT DES FUSIBLES

Selon les normes d'installation photovoltaïque et le guide l'UTE C15-712-2, la présence de fusible est **toujours** obligatoire pour chacune des chaînes photovoltaïques, et ce afin de protéger les modules photovoltaïques et les câbles des courants pouvant s'écouler du parc de batteries vers les panneaux dans le cas où le dispositif anti-retour du

régulateur est inopérant, notamment en période d'obscurité où la batterie est en mesure de se décharger à travers le champ photovoltaïque. [32]

La figure suivante schématise la disposition des différents fusibles :

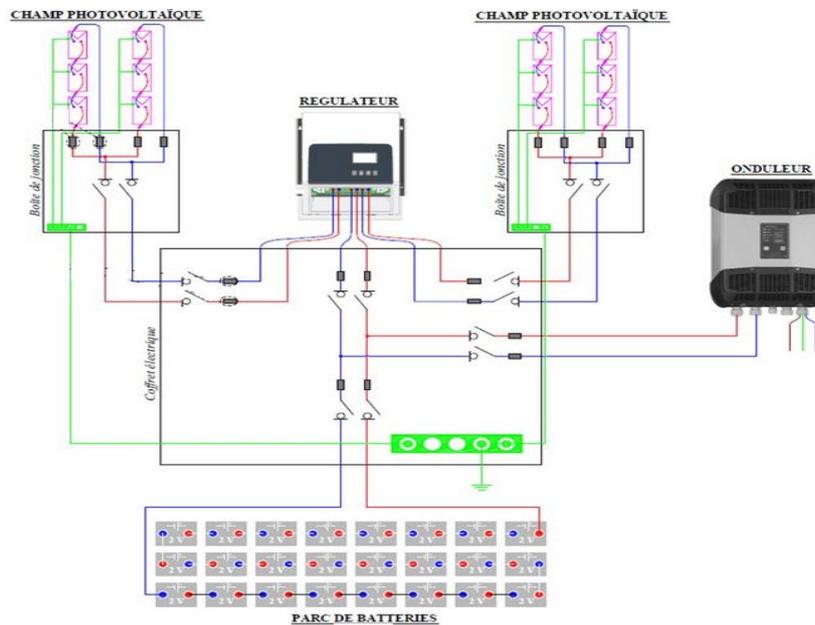


FIGURE IV-2 EMBLACEMENT DES FUSIBLES.

2.1.3. CALIBRAGE DES FUSIBLES

Dans le cadre de la protection contre les surintensités produites par les courants retours, le guide de l'UTE C15-712-1 préconise une valeur du courant d'emploi $I_B = 1.4 \times I_{CC}$.

Tel que I_B est le courant maximal d'emploi dans les conducteurs. Pour les applications photovoltaïques, il existe également des fusibles dites "fusible à fusion rapide".

Le courant assigné I_N (courant nominal du fusible) devra respecter la condition suivante, selon la norme du guide de l'UTE C15 712-2,

$$1.1 * 1.25 * I_{cc} \leq I_N \leq 2 * I_{cc}$$

De plus, il convient d'effectuer le calibrage en tension. Pour cela, il convient que la tension assignée U_N des fusibles soit supérieure à la tension maximale du système. La tension maximale du système est égale à la tension à vide U_{CO} du champ photovoltaïque multipliée par le coefficient multiplicateur k (Facteur de correction qui est dépend de température).

$$U_N \geq k * U_{co}$$

Pour des technologies de module monocristallin ou poly cristallins, le facteur de correction à prendre en compte est précisé ci-dessous. En l'absence d'information complémentaire de température on prend $K=1,2$. [1]

TABLEAU IV-1 FACTEUR DE CORRECTION K.

Température ambiante minimale °C	Facteur de correction K
24 à 20	1.02
19 à 15	1.04
14 à 10	1.06
9 à 5	1.08
4 à 0	1.10
-1 à -5	1.12
-6 à -10	1.14
-16 à -20	1.16
-21 à -25	1.18
-25 à -26	1.20
-26 à -30	1.21
-31 à -35	1.23
-35 à -40	1.25

2.2. DISPOSITIF DE COUPURE ET SECTIONNEMENT (DISJONCTEUR)

Afin de garantir la sécurité lors des opérations de maintenance ultérieure, et en respectant les normes et le guide de l'UTE C15-712-2 concernant les dispositifs de coupure et de sectionnement, nous devons installer des interrupteur-sectionneur dans les boîtes de jonction ainsi que dans le coffret électrique (voir la figure ci-dessous).

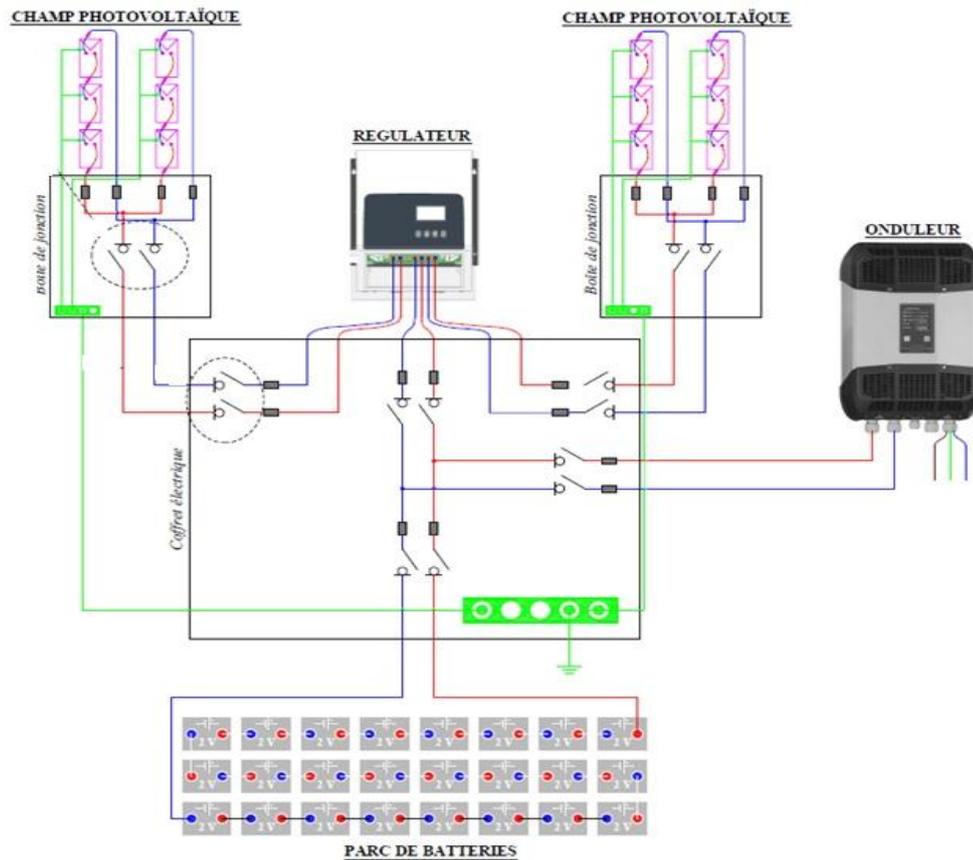


FIGURE IV-3 EMBLACEMENT DES DISPOSITIFS DE COUPURE ET SECTIONNEMENT.

Les interrupteurs-sectionneurs doivent être calibrés :

- En courant : le courant assigné doit être au moins égal à $1.25 \times I_{CC}$.
- En tension : la tension assignée doit être au moins égale à la tension à vide U_{CO} du circuit multipliée par le coefficient multiplicateur k .

$$U_N \geq k * U_{CO}$$

2.3. LES CABLES

Une installation électrique est un ensemble cohérent d'appareillage, câbles, circuits et récepteurs, les câbles sont considérés comme les piliers d'une installation électrique. Pour cela le dimensionnement d'une installation électrique implique le choix optimal des sections de câbles, des éléments de l'appareillage et les récepteurs, afin de garantir un fonctionnement normal des équipements sans dégradation ou échauffement. [33]

La figure suivante représente un modèle électrique d'un câble de longueur L et de section S :

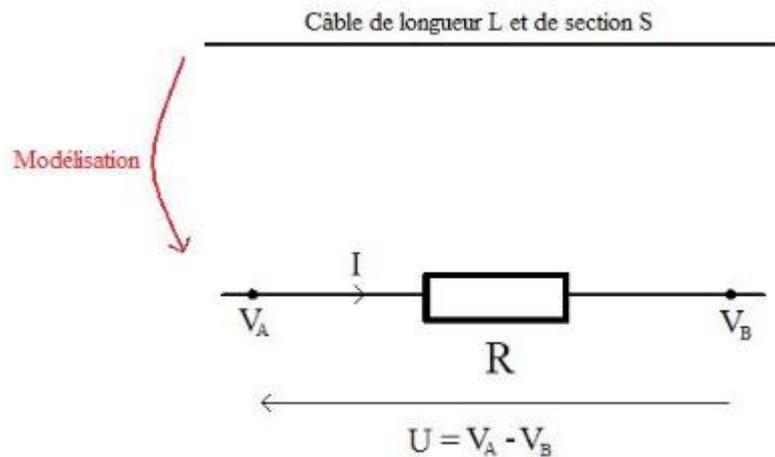


FIGURE IV-4 MODELISATION ELECTRIQUE D'UN CABLE DE LONGUEUR L ET DE SECTION S.

Le guide de l'UTE C15-712 relatif aux installations photovoltaïques indique que la chute de tension dans la partie DC devrait être inférieure à 3%, idéalement 1%. Cela signifie :

$$\frac{U_C}{V_A} = \frac{V_A - V_B}{V_A} < 3\%$$

2.3.1. CALCUL DE LA SECTION DU CABLE

Si on considère que (ε) est la chute de tension au niveau du câble, donc par définition :

$$\varepsilon = \frac{U_C}{V_A} = \frac{V_A - V_B}{V_A}$$

D'autre part :

$$U_C = R_C \cdot I$$

En remplaçant la valeur de U_C , On obtient :

$$\varepsilon = \frac{R_C \cdot I}{V_A} = \frac{\rho \cdot L \cdot I}{S \cdot V_A}$$

Dans la pratique, la longueur des câbles est connue. Dès lors, on calcule la section de ces câbles sous la contrainte d'une chute de tension maximale de 3 %.

Ainsi, la section des câbles se calcule par la formule suivante :

$$S = \frac{\rho \cdot L \cdot I}{\varepsilon \cdot V_A}$$

Avec :

- ρ : Résistivité du matériau conducteur (cuivre ou aluminium) en service normal. Conformément au guide de l'UTE C15-712-1, $\rho = 1.25 \times \rho_0$ où ρ_0 est la résistivité du conducteur à 20°C. On exprimera la résistivité en $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.
- L : Longueur du câble (m).
- S : Section du câble (mm^2).
- I : Courant circulant dans le câble (A).
- ε : chute de tension, $\varepsilon = 0.03$.
- V_A : Tension à l'origine du câble (V).

3. DEVELOPPEMENT D'UNE INTERFACE GRAPHIQUE (GUI) SUR MATLAB

MATLAB est l'un des programmes les plus importants pour fournir un environnement logiciel de haut niveau et un environnement de simulation pour différents systèmes d'ingénierie. Récemment, un grand nombre d'outils ont été développés dans le cadre de ce programme.

Ce programme est également considéré comme l'un des logiciels les plus utilisés et fondamentaux pour les études universitaires et la recherche scientifique. Il a été adopté pour l'étude en tant que matière de base pour la construction d'une pensée logique appropriée pour les ingénieurs dans de nombreuses universités.

Le problème rencontré par les utilisateurs de Matlab était sa faible capacité à afficher et à mettre en évidence le travail, tant de programmeurs compté sur Matlab pour calculer, implémenter et résoudre des problèmes mathématiques et ensuite utiliser ses résultats dans d'autres programmes tels que Visual Basic, par exemple. [15]

Dans les versions modernes de Matlab, l'idée d'introduire le processus de construction de façades dans Matlab, connu sous le nom d'interface utilisateur graphique GUI, est apparue. Ces interfaces ont fait de Matlab un programme intégré en termes de facilité de programmation, de résolution de problèmes et de création d'un environnement interactif entre le programme et l'utilisateur. Donc Matlab n'est pas seulement un logiciel de calcul et de traçage ; c'est un outil polyvalent et flexible qui permet aux

utilisateurs, même les plus débutants, de produire des graphiques sophistiqués. Le niveau de sophistication n'est limité que par les besoins, la curiosité et l'imagination. [35] [36]

4. FONCTIONNEMENT D'UNE INTERFACE UTILISATEUR GRAPHIQUE GUI

Une interface utilisateur graphique GUI fournit à l'utilisateur un environnement familier dans lequel il peut travailler. Cet environnement contient des boutons de commande, des boutons de basculement, des listes, des menus, des zones de texte, etc., qui sont tous déjà familiers à l'utilisateur, de sorte qu'il ou elle peut se concentrer sur l'utilisation de l'application plutôt que sur les mécanismes impliqués dans les choses. Cependant, les interfaces graphiques sont plus difficiles pour le programmeur parce qu'un programme basé sur une interface graphique doit être préparé pour les clics de souris (ou éventuellement la saisie au clavier) pour n'importe quel élément d'interface graphique à tout moment. [37]

Les trois principaux éléments requis pour créer une interface utilisateur graphique MATLAB sont les suivants :

4.1. COMPOSANTS (COMPONENTS)

Chaque élément d'un GUI MATLAB (boutons de commande, étiquettes, boîtes d'édition, etc.) est un composant graphique. Les types de composants comprennent les contrôles graphiques boutons de commande, boîtes d'édition, listes, curseurs, etc.



FIGURE IV-5 LA LISTE DES COMPOSANTS (COMPONENTS).

4.2. FIGURES.

Les composants d'une interface graphique doivent être disposés à l'intérieur d'une figure, qui est une fenêtre sur l'écran de l'ordinateur.

4.3. RAPPELS AU TRAVAIL (CALL BACK)

Enfin, il doit y avoir un moyen d'effectuer une action si un utilisateur clique avec la souris sur un bouton ou tape des informations sur un clavier. Un clic de souris ou une pression de touche est un événement, et le programme MATLAB doit répondre à chaque événement pour que le programme puisse exécuter sa fonction. Par exemple, si un utilisateur clique sur un bouton, cet événement doit provoquer l'exécution du code MATLAB qui implémente la fonction du bouton. Le code exécuté en réponse à un événement est connu sous le nom de rappel au travail (call back). Il doit y avoir un rappel pour implémenter la fonction de chaque composant graphique sur l'interface graphique. [37]

5. CREATION ET AFFICHAGE D'UNE INTERFACE UTILISATEUR GRAPHIQUE

Les interfaces graphiques MATLAB sont créées à l'aide d'un outil appelé guide, l'environnement de développement d'interface graphique. Cet outil permet au programmeur de mettre en page l'interface graphique, en sélectionnant et en alignant les composants de l'interface graphique à y placer.

La grande zone blanche avec des lignes de grille est la zone de mise en page, où un programmeur peut mettre en page l'interface graphique. La fenêtre de l'éditeur de modèle à un palais de composants graphiques sur le côté gauche de la zone de modèle. Le haut de la fenêtre comporte une barre d'outils avec une série d'outils utiles qui permettent à l'utilisateur de distribuer et d'aligner des composants graphiques, de modifier les propriétés des composants graphiques, d'ajouter des menus aux interfaces graphiques, etc.

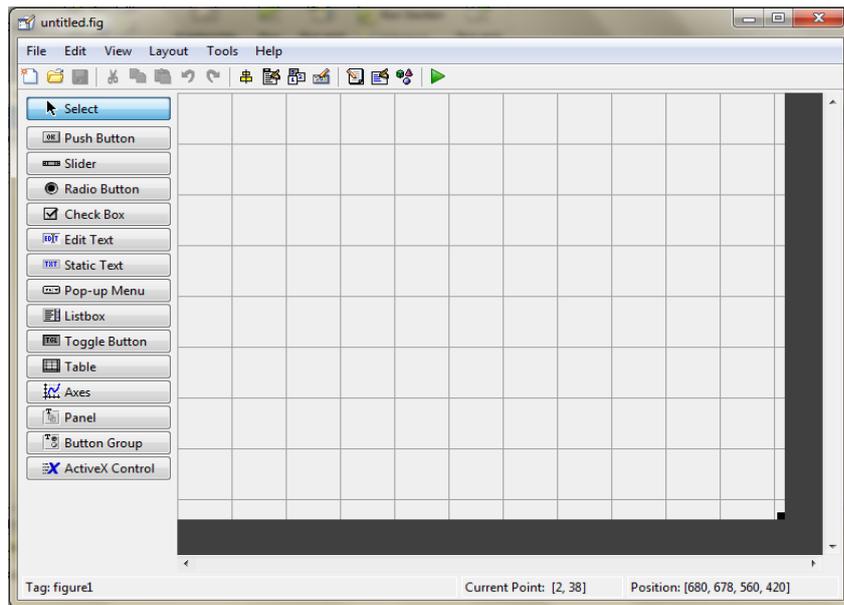


FIGURE IV-6 LA FAÇADE PRINCIPALE DU GUI.

Notre programme d'interface graphique se compose d'une partie principale contient un master GUI sous le nom **T00**, qui est le maître des autres programmes (T01, T02, TS01 et TS02), i.e. le programme contrôleur des autre programme ou figure, car chaque programme affiche une figure qui porte les informations et qui est le transit entre l'utilisateur et le programme. Lorsque nous faisons des programmes sur un guide, nous aurons deux fichiers dépendants l'un de l'autre, Un fichier T00.m et l'autre T00.fig.

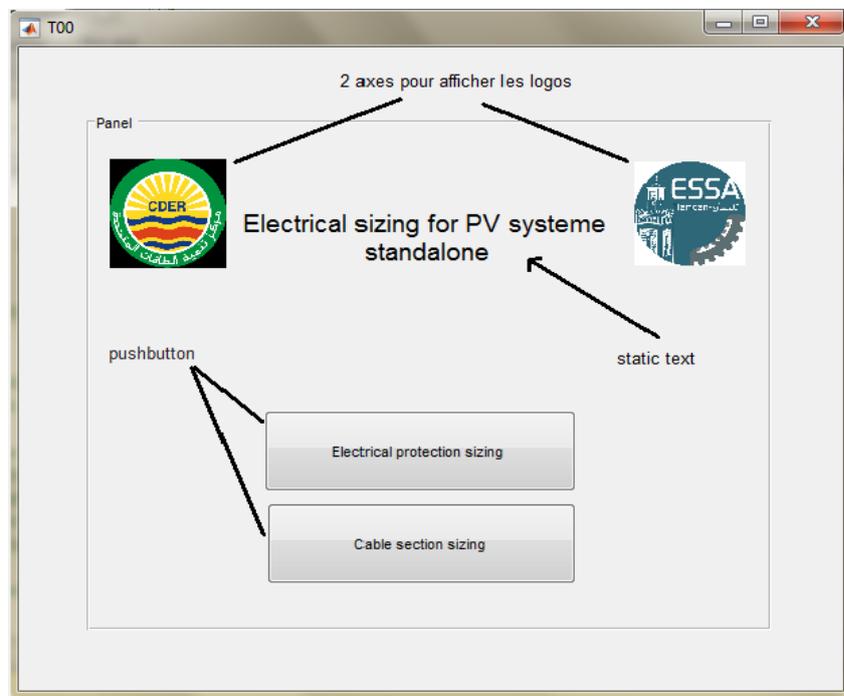


FIGURE IV-7 LA FIGURE PRINCIPALE DU PROGRAMME.

Dans ce programme on a utilisé :

5.1. CHAMPS DE TEXTE (STATIC TEXT AND EDIT TEXT)

Un champ texte est un objet graphique qui affiche une chaîne de texte. Un champ de texte peut être ajouté à une interface graphique à l'aide de l'outil texte de l'éditeur de modèle. Les champs texte ne créent pas de rappel (callback), mais la valeur affichée dans le champ texte peut être mise à jour dans une fonction de rappel en modifiant la propriété Chaîne du champ texte.

Une boîte d'édition (edit text) est un objet graphique qui permet à un utilisateur de saisir une chaîne de caractères. La boîte d'édition génère un rappel (callback) lorsque l'utilisateur clique sur la touche Entrée après avoir tapé une chaîne dans la boîte.

Une boîte d'édition (edit box) peut être ajoutée à une interface graphique en utilisant l'outil de boîte d'édition dans l'éditeur de modèle. Lorsqu'un utilisateur tape une chaîne de caractères dans la zone d'édition, il appelle automatiquement la fonction `EditBox_Callback`. Cette fonction localise la boîte d'édition à l'aide de la structure des poignées et récupère la chaîne tapée par l'utilisateur. Ensuite, il localise le champ texte et affiche la chaîne dans le champ texte. [37]

5.2. AXES

On utilise cette composante pour afficher les logos, de l'école (ESSAT) et du centre (CDER), Les deux images doivent être dans le même dossier où se trouve le programme.

5.3. PUSHBUTTONS

Un bouton de commande est un composant sur lequel un utilisateur peut cliquer pour déclencher une action spécifique. Le bouton de commande génère un rappel lorsque l'utilisateur clique dessus avec la souris.

6. CALCUL DES PARAMETRES ELECTRIQUE DES COMPOSANTS DE PROTECTION

Cette partie est aussi divisée en deux, la première page (figure) pour saisir les données nécessaires et la deuxième pour faire le calcul et afficher les résultats. Quand on appuie sur le bouton Electrical protection sizing (Pushbotums), le code de la première

page dans la partie du calcul des paramètres des fusibles et disjoncteurs page (figure) T01 doit être compilé par Matlab, la figure suivante représente le résultat obtenu :

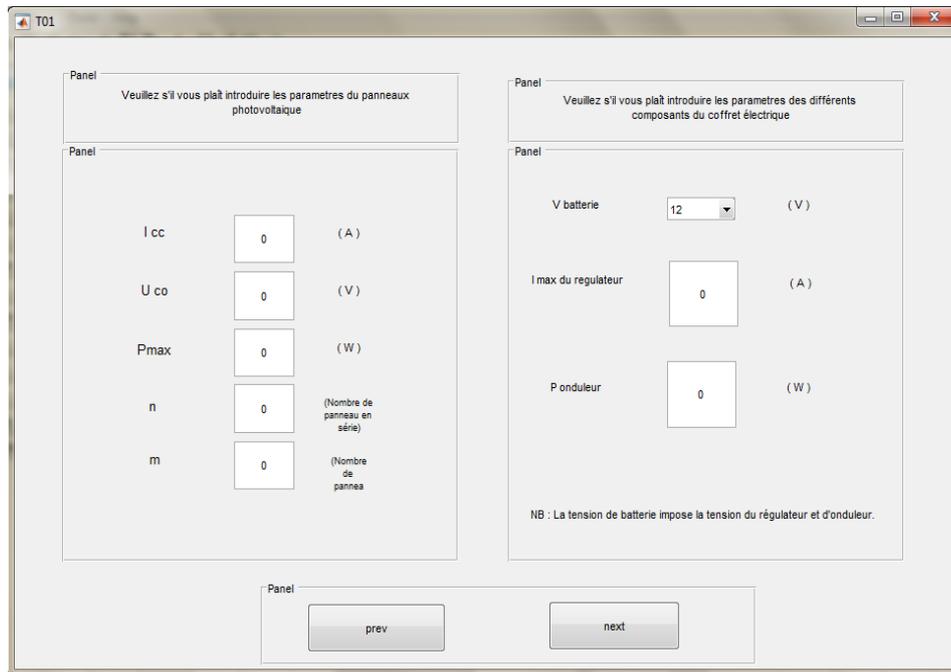


FIGURE IV-8 UNE CAPTURE DE LA PREMIERE PAGE DANS LA PARTIE DU CALCUL DES PARAMETRES DES FUSIBLES ET DISJONCTEURS.

La figure précédente est divisée en quatre panels (panneau) ; Un texte statique apparaît pour informer les utilisateurs, ainsi que plusieurs cases d'une forme d'édit texte pour obtenir des données et les sauvegardés.

Et un autre panel contient deux Pushbuttons, l'une pour aller à la figure de calculs et affichage des résultats, et l'autre pour revenir à la page principale.

Dans cette figure on a utilisé un utile pour limité le choix de l'utilisateur, cette utile a un code spéciale, connu sous le nom **Popup Menu** qui est un objet graphique qui permet à un utilisateur de sélectionner l'une des options d'une liste mutuellement exclusive. La liste des options parmi lesquelles l'utilisateur peut choisir est spécifiée par un ensemble de chaînes de caractères. Un menu pop-up peut être ajouté à une interface graphique en utilisant l'outil de menu pop-up dans l'éditeur de modèle.

La page suivante ou bien la figure suivant du programme est apparue quand on appuie sur le bouton **Next**, la figure suivante est une capture de ce dernier :

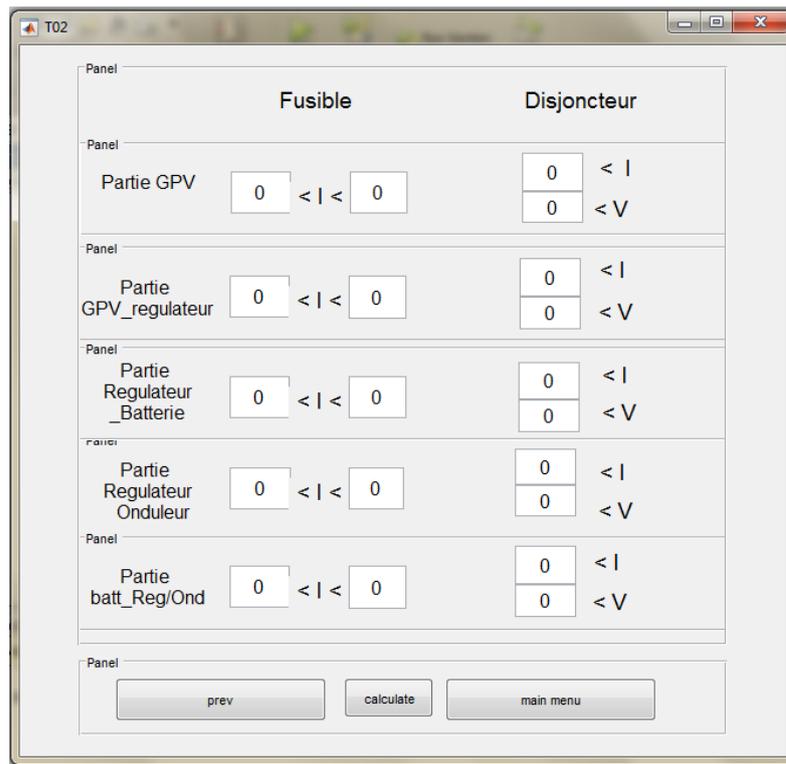


FIGURE IV-9 UNE CAPTURE DE LA PAGE DU RESULTAT DU CALCUL DES FUSIBLES ET DISJONCTEURS.

Dans cette page on trouve trois boutons (Pushbuttons), **prev** pour revenir à la page précédente, **main menu** pour aller à la page principale, et **calculate** pour faire le calcul nécessaire et afficher le résultat dans la case illustrée dans la figure précédente.

7. CALCUL DE LA SECTION DU CABLE

Dans la fenêtre principale i.e. T00, si on appuie sur le bouton **Cable section sizing** (Pushbotums), le code de la troisième page (figure) TS01.fig (la première page dans la partie du calcul de la section) doit être compilé par Matlab. Cette partie du programme est aussi divisée en deux, la première page (figure) pour l'implantation des données nécessaires, et la deuxième pour faire le calcul et afficher le résultat.

La figure suivante représente une capture du résultat de la compilation du code du script TS01.m

FIGURE IV-10 LA PREMIERE PAGE DANS LA PARTIE DU CALCUL DE LA SECTION.

Dans cette figure on a des 'edit box' porte des variables, des textes statiques pour facilite l'utilisation du programme, Pop-up menu pour sélectionner le type du câble utilisé, et deux boutons (Pushbotums) **Prev** pour revenir à la page principale (main menu), et **Next** pour aller à la page suivante.

Si l'utilisateur appuie sur **Next** la deuxième page de la partie calcul de la section de câble doit apparaitre comme l'illustration dans la figure suivante :

FIGURE IV-11 UNE CAPTURE DE LA PAGE DU RESULTAT DU CALCUL DE LA SECTION.

Dans cette page on a trois boutons (Pushbuttons), **prev** pour revenir à la page précédente, **main menu** pour aller à la page principale, et **calculate** pour faire le calcul nécessaire et afficher le résultat dans.

Dans la partie suivante du programme, on va calculer la section commerciale qui exist dans le marché Sc correspond à la section calculé dans la partie précédente. Les sections habituelles des câbles sont 1,5 mm², 2,5 mm², 4 mm², 6 mm², 10 mm², 16 mm², 25 mm², 35 mm², 50 mm², 70 mm², 95mm², 120mm², 150mm², 185mm², 240mm². [23]

8. APPLICATION DU PROGRAMME SUR DEUX INSTALLATIONS PV AUTONOMES AU NIVEAU DU CDER

Dans cette partie on va appliquer ce programme pour dimensionné électriquement deux installations photovoltaïques autonomes au niveau du CDER (Centre de développement des énergies renouvelables à Bouzareah), pour cela on a besoin des différents données.

8.1. LA PREMIERE INSTALLATION

8.1.1.

Elle est composée de Vingt panneaux photovoltaïques, chaque panneau à une puissance maximale de 75 WC, leurs paramètres électriques sont illustrés dans la figure suivante :



FIGURE IV-12 LA FICHE TECHNIQUE DES PANNEAUX.

- $P_{max} = 75$.
- $I_{sc} = 4,67$ A.
- $V_{oc} = 21,6$ V.
- $I_{mp} = 4,34$ A.
- $V_{mp} = 17,3$ V.

Le champ photovoltaïque est représenté par la figure suivante :



FIGURE IV-13 INSTALLATION DU PREMIER CHAMP PV.

Ces panneaux sont reliés entre eux pour former cinq chaînes, soit $n = 4$, et $m = 5$, ce qui donne un champ PV de 20 panneaux.



FIGURE IV-14 LE CABLAGE DU PREMIER CHAMP PV.



FIGURE IV-15 LA STATION DE MESURE EN TEMPS REEL ET LA BOITE DE JONCTION DU CHAMP PV.

Cette station a pour but de prendre les valeurs de l'éclairement G, la vitesse de vent, la température, l'humidité et la quantité de pluie.

Chaque string (chaîne PV parallèle) est protégé par deux fusibles, un pour le câble de polarité négative (-) et l'autre pour le positive (+), ces fusibles ont un calibre calculé par le programme (T00.m).

Le régulateur qu'on a utilisé dans cette installation supporte un courant maximal d'une valeur égale à $I_{r \max} = 60 \text{ A}$, et une tension de sortie de (16V/24V/36V/48V), et une tension d'entrée maximale de 150 V continue ; le régulateur est représenté dans la figure suivante



FIGURE IV-16 LE REGULATEUR ET L'ONDULEUR UTILISER DANS LA MINI CENTRALE.

L'onduleur utilisé dans cette centrale supporte une tension d'entrée de 48 V, et a une puissance max de 1200 W.

Le parc de batterie est illustré dans la figure suivante :



FIGURE IV-17 PARC DE BATTERIE.

Toutes les valeurs nécessaires pour les introduire dans le programme et pour faire le calcul sont

- $I_{cc} = 4.67 \text{ A}$
- $U_{co} = 21.6 \text{ V}$
- $P_{max} = 75 \text{ W}$
- $n = 4$
- $m = 5$
- $V_{batt} = 48 \text{ V}$

Il faut introduire ces valeurs dans le programme Matlab, comme le montre la figure suivante :

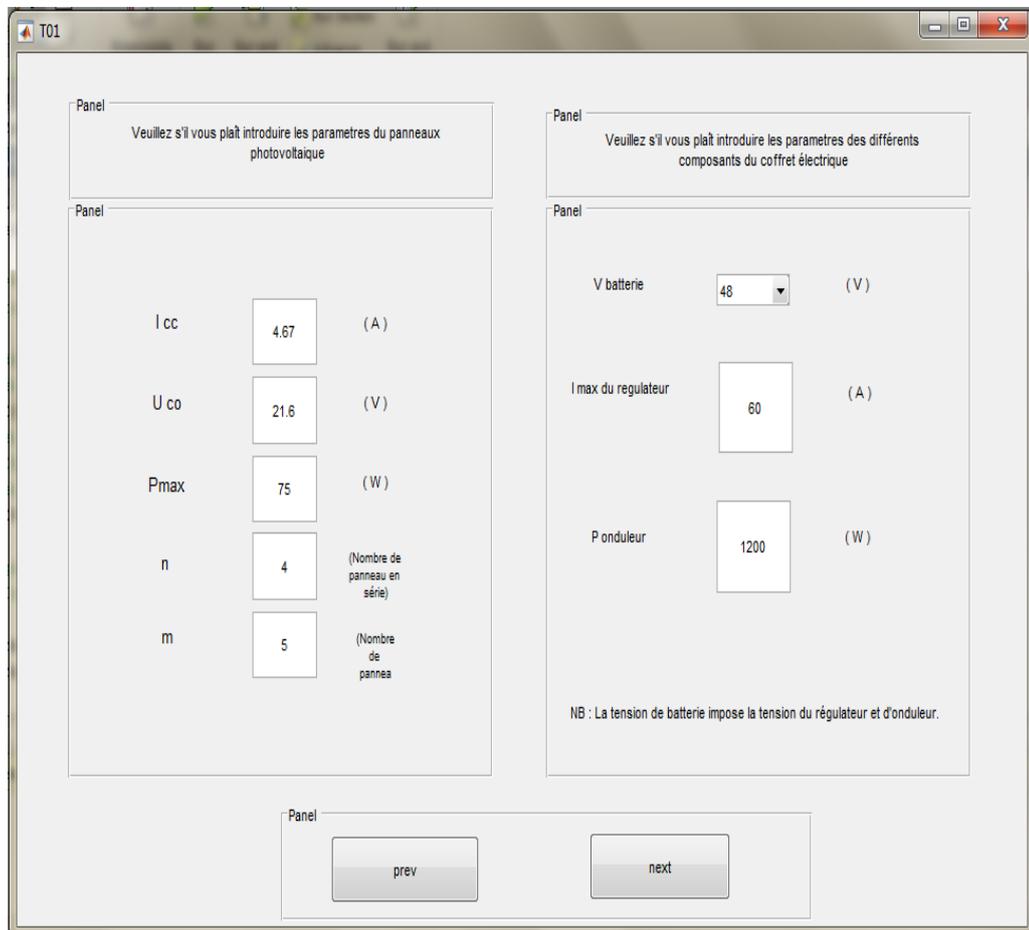


FIGURE IV-18 UTILISATION DE L'INTERFACE GRAPHIQUE.

Finalement, le résultat du calibrage des fusibles et des disjoncteurs est présenté dans la figure suivante :

The screenshot shows a software window titled 'T02' with a table of calculation results for a panel. The table is organized into two columns: 'Fusible' and 'Disjoncteur'. Each row represents a different part of the panel, with input values in boxes and calculated results in boxes. At the bottom, there are three buttons: 'prev', 'calculate', and 'main menu'.

	Fusible	Disjoncteur
Partie GPV	6.4212 < I < 9.34	29.187 < I 98.496 < V
Partie GPV_regulateur	32.106 < I < 46.7	29.187 < I 98.496 < V
Partie Regulateur_Batterie	82.5 < I < 120	75 < I 54.72 < V
Partie Regulateur Onduleur	34.375 < I < 50	42.968 < I 54.72 < V
Partie batt_Reg/Ond	82.5 < I < 120	75 < I 54.72 < V

FIGURE IV-19 LE RESULTAT FINALE DU CALCUL.



FIGURE IV-20 UN MODELE DE FUSIBLE UTILISE DANS CETTE CENTRALE.

Maintenant, on calcul la section des câbles utilisé, on utilisant la deuxième partie du programme.

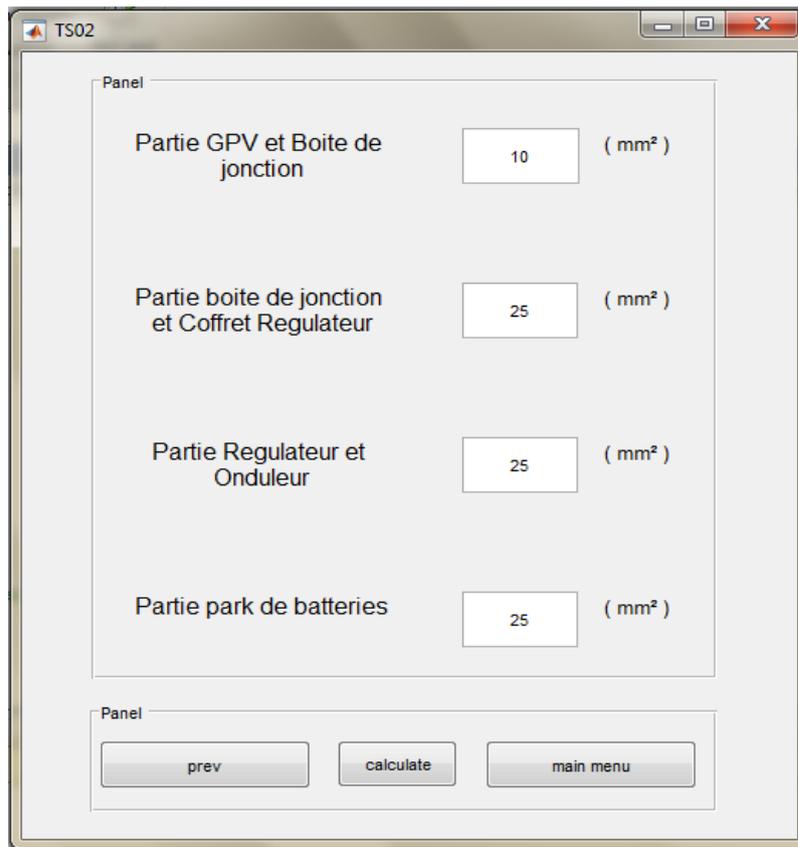


FIGURE IV-22 LE RESULTAT DU CALCUL DES SECTIONS DE CABLE.

8.1.2. DISCUSSION DES RESULTATS

Les résultats obtenus montrent que le calibrage des fusibles et des sections des câbles de l'installation sont bien adaptés aux valeurs utilisées dans la pratique, même le calibrage en tension des disjoncteurs.

Malgré le fait que nous avons à respecter les équations des normes, les résultats obtenus montrent aussi qu'il y a un sous-dimensionnement dans le calibrage en courant des disjoncteurs.

8.2. LA DEUXIEME CENTRALE

8.2.1.

La deuxième installation est composée de deux champs indépendants, le premier champ contient 12 panneaux solaires monocristalline de 36 cellules, ces panneaux sont reliés entre eux pour trois string, i.e. le nombre de panneaux en série est 4 ($n=4$), et le nombre des panneaux en parallèle est 3 ($m=3$);

Le deuxième champ contient 12 panneaux solaires de type poly-cristallin de 36 cellules connectées de la même façon que le premier champ; Chaque champ a une boîte

de jonction, un régulateur et un onduleur, mais ils sont les mêmes dans la partie électrique, le tout forme une centrale autonome présentée dans les figure suivantes :



FIGURE IV-23 UNE VUE DE FACE DU CHAMP DE LA CENTRALE.

Les panneaux sont installés horizontalement de façon pour minimiser l'effet de l'ombrage.



FIGURE IV-24 LES FICHES TECHNIQUES DES MODULES MONOCRISTALLINS ET POLY-CRISTALLINS.



FIGURE IV-25 LA BOITE DE JONCTION ET PARC DES BATTERIES DE LA CENTRALE.



FIGURE IV-26 L'ONDULEUR ET LE REGULATEUR UTILISE DANS LES DEUX CHAMPS.

Puisque cette centrale est divisée en deux champs indépendants, le calcul des paramètres des fusibles, disjoncteurs et la section de câble se fait en considérant chaque champ comme une installation, donc le calcul est effectué deux fois. Toutes les valeurs à introduire dans le programme sont présentées dans le tableau suivant :

TABLEAU IV-2 LES DIFFERENTES VALEURS DE LA CENTRALE.

	Panneaux de type monocristallin	Panneaux de type polycristallin
I _{cc} (A)	9,03	8,59
U _{co} (V)	23	22,9
P _{max} (W)	155	150
U _{mpp} (V)	19,54	18,5
I _{mpp} (A)	8,45	8,11
n	4	4
m	3	3
U _{batterie} (V)	48	48
I _{max reg} (A)	70	70
P (W)	3000	3000
L1 (m)	5	5
L2 (m)	10	10
L3 (m)	1	1

Finalement, on trouve le résultat illustré dans les figures suivantes :

Panel	Fusible	Disjoncteur
Partie GPV	11.811 < I < 17.18	32.212 < I 104.42 < V
Partie GPV_regulateur	35.433 < I < 51.54	32.212 < I 104.42 < V
Partie Regulateur_Batterie	96.25 < I < 140	87.5 < I 54.72 < V
Partie Regulateur Onduleur	85.937 < I < 125	107.42 < I 54.72 < V
Partie batt_Reg/Ond	96.25 < I < 140	87.5 < I 54.72 < V

Buttons: prev, calculate, main menu

FIGURE IV-27 CALCUL DES PARAMETRES DE PROTECTION DU CHAMP PV POLY-CRISTALLIN.

Composant	Fusible (I < I < I)	Disjoncteur (I < I, V < V)
Partie GPV	12.416 < I < 18.06	33.862 < I 104.88 < V
Partie GPV_regulateur	37.248 < I < 54.18	33.862 < I 104.88 < V
Partie Regulateur_Batterie	96.25 < I < 140	87.5 < I 54.72 < V
Partie Regulateur Onduleur	85.937 < I < 125	107.42 < I 54.72 < V
Partie batt_Reg/Ond	96.25 < I < 140	87.5 < I 54.72 < V

FIGURE IV-28 CALCUL DES PARAMETRES DE PROTECTION DU CHAMP PV MONOCRISTALLIN.

Section	Section (mm²)
Partie GPV et Boite de jonction	6 (mm²)
Partie boite de jonction et Coffret Regulateur	10 (mm²)
Partie Regulateur et Onduleur	10 (mm²)
Partie park de batteries	10 (mm²)

FIGURE IV-29 CALCUL DES SECTIONS PROTECTION DU CHAMP PV MONOCRISTALLIN.

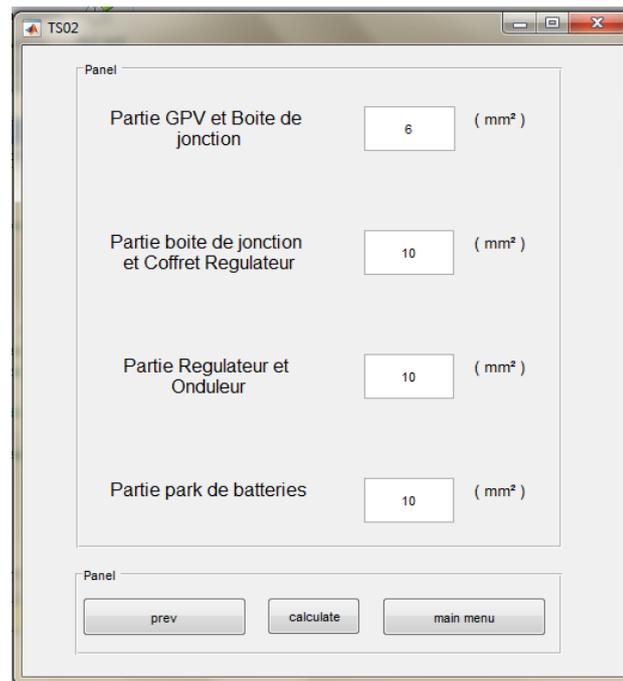


FIGURE IV-30 CALCUL DES SECTIONS PROTECTION DU CHAMP PV POLY-CRISTALLIN.

8.2.2. DISCUSSION DES RESULTATS

Les résultats obtenus dans cette centrale photovoltaïque autonome indiquent que le calibrage des fusibles et le calcul des sections de l'installation est bien adaptés aux valeurs utilisées dans la pratique, y compris le calibrage en tension des disjoncteurs.

Malgré le fait que nous avons à respecter les équations des normes, les résultats obtenus montrent aussi qu'il y a un sous-dimensionnement dans le calibrage en courant des disjoncteurs.

9. CONCLUSION

Ce chapitre est divisé en trois parties, la première partie est consacrée pour le calcul analytique des différents paramètres électrique des disjoncteurs et des fusibles, aussi le calcul des sections de câbles d'une installation photovoltaïque autonome.

La deuxième partie est consacrée pour la présentation de notre interface graphique GUI, cette interface permet de faciliter le calcul analytique lourd, il suffit juste d'introduire les différentes paramètres de la centrale.

Dans la troisième partie du chapitre on a présenté une application pratique sur deux centrales photovoltaïques autonomes au niveau du centre du développement des énergies renouvelables de Bouzareah, dans lequel on a discuté les différents résultats obtenus.

V. CONCLUSION GENERALE

L'énergie photovoltaïque (PV) est une source d'énergie renouvelable, inépuisable et non polluante. Pour qu'elle soit utilisée pour différentes applications et pour satisfaire les contraintes économiques, la conception et la réalisation des systèmes PV sont nécessaires et posent actuellement de nombreux problèmes. Le système PV réalisé doit être robuste, fiable et présentant un rendement élevé.

La performance d'un système PV dépend fortement des conditions météorologiques, telles que le rayonnement solaire et la température. Pour fournir l'énergie continuellement durant toute l'année, un système PV doit donc être correctement dimensionné. Ce qui exige une étude assez rigoureuse dans le but de faire le meilleur choix, le plus performant et au moindre coût.

D'autre part la photovoltaïque offre aux consommateurs la possibilité de produire de l'électricité de manière propre, silencieuse et fiable. Les systèmes photovoltaïques sont composés de cellules photovoltaïques, des dispositifs qui convertissent directement l'énergie lumineuse en électricité. Parce que la source de lumière est généralement le soleil, on les appelle souvent des cellules solaires.

Dans le but de protéger les différents éléments de l'installation photovoltaïque, plusieurs études et travaux sont menés autour du dimensionnement des systèmes PV. Dans notre travail, l'étude qu'on a réalisé était dirigé dans ce sens, et cela en prenant en compte trois paramètres importants dans une installation photovoltaïque : les câbles, le disjoncteur et les fusibles de protection.

REFERENCE

- [1] UNION TECHNIQUE DE L'ELECTRICITE, « Installations photovoltaïques raccordées au réseau public de distribution », GUIDE PRATIQUE, 2010.
- [2] Chinmay Garanayak, « DESIGN AND ANALYSIS OF STANDALONE PV SYSTEM », 2015.
- [3] Zrinski, Yvonne Booth « Planning and Installing Photovoltaic Systems », A guide for installers, architects and engineer, second edition, 2008.
- [4] M. Nkouimi, «Outil d'aide au dimensionnement des systèmes photovoltaïques domestiques», Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur de conception, École National Supérieur Polytechnique de Yaoundé, 2010.
- [5] Michel Viloz, « Installations photovoltaïques, Conception et dimensionnement d'installations raccordées au réseau », 5e édition, 2012.
- [6] Michael Boxwell, « Solar Electricity Handbook A simple » practical guide to solar energy: how to design and install photovoltaic solar electric systems, 2012.
- [7] URL : <http://www.africmemoire.com/part.3-chapitre-1-le-rayonnement-solaire-951.html> Consulté le 11mars 2019.
- [8] URL : https://www.memoireonline.com/02/11/4239/m_Production-de-lenergie-photovoltaique--la-societe-Nova-Diffusion8.html Consulté le 02 mars 2019.
- [9] URL : <https://www.edfenr.com/lexique/rayonnement-direct/> Consulté le 02 mars 2019.
- [10] M. SLAMA Fateh, « Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique », Mémoire de Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF, 2011.
- [11] Bc. Monika Kokrdová, «L'énergie solaire », mémoire de Master, 2011.
- [12] M. MUSTAPHA BELARBI, « Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome », Thèse de Doctorat, UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN, 2015.
- [13] N. D. Kaushika, « Solar Photovoltaics Technology, System Design, Reliability and Viability », 2018.
- [14] Angel Cid Pastor, « Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, 2006.

- [15] URL :<https://lenergie-solaire.net/energie-solaire-photovoltaique/panneau-photovoltaique/structure> Consulté le 25mars 2019.
- [16] URL : http://www.composelec.com/cellule_photovoltaique.php Consulté le 10 mars 2019.
- [17] JEAN-PAUL BRAUN, 'Cellules solaires Les bases de l'énergie photovoltaïque', éditions techniques et scientifique françaises, 2010.
- [18] AMARA Karima, « Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension », mémoire de magister, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, 2015.
- [19] BOUKHERS Djamil, « OPTIMISATION D'UN SYSTEME D'ENERGIEPHOTOVOLTAIQUE APPLICATION AU POMPAGE ».
- [20] Salaheddine MANSOUR, « Etude de Dimensionnement optimal d'une station solaire autonome en site isolé », MEMOIRE DE FIN D'ETUDE Pour l'obtention du Diplôme de Master, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMCCEN, 2014.
- [21] B.Tebboub, « Étude conceptuelle des systèmes photovoltaïques à double et triple jonction », mémoire de magister, UMMTO, 2013-2014.
- [22] M^{elle} DEBILI Narimene, « Etude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage Photovoltaïque », thèse de magister, université de Constantine, 2015.
- [23] Mark Hankins, « Stand-Alone Solar Electric Systems », Earthscan, 2010.
- [24] Sandia National Laboratories operated for the United States « stand-alone photovoltaic systems », a hand book of recommended disign practice, 1995.
- [25] V.Boitier, « Dimensionnement d'un Système Photovoltaïque », CETSIS'2005, Nancy, 25-27 octobre 2005.
- [26] Mazouz Karim, « Etude d'une batterie de stockage dans un système photovoltaïque », Mémoire de master, Université Abderrahmane mira Bejaia, 2012.
- [27] B.Radha Krishna Varma, « SIMULATION AND ANALYSIS OF STAND ALONE PV SYSTEM WITH SINGLE PHASE AND THREE PHASE LOAD ».
- [28] Arno HM Smets, « Solar energy, The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems », 2016.

- [29] Philippe Barrade, « électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaire », press polytechnique et universitaires, 1ère édition, 2006.
- [30] Ibrahim Tahraoui, « Dimensionnement et Etude d'une installation photovoltaïque pour une habitation domestique », mémoire de Master, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID TLEMCEN, 2016/2017
- [31] URL :<https://info-solaire.fr/blog/installations-photovoltaiques-autonomes/le-système-photovoltaïque-autonome.html> Consulté le 10 juin 2019.
- [32] Aurian Arrigoni, « Conception et dimensionnement des installations photovoltaïques raccordées au réseau », Editions Eyrolles, 2011.
- [33] Parimita Mohanty, « Solar Photovoltaic System Applications », A Guidebook for Off-Grid Electrification, 2015.
- [34] Adnan shahin, « Matlab for engineers », (الماتلاب للمهندسين), 2008.
- [35] Patrick Marchand, « Graphics and GUIs with MATLAB », 2003.
- [36] Brian Hahn, « ESSENTIAL MATLAB FOR ENGINEERS AND SCIENTISTS », 1997.
- [37] Refaat Yousef Al Ashi, « Introduction to Graphical User Interface (GUI) », IEEE UAEU STUDENT BRANCH.