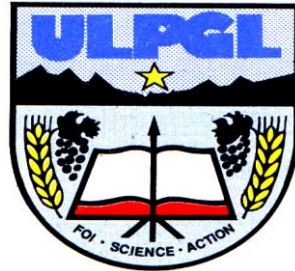


**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET
UNIVERSITAIRE
UNIVERSITÉ LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS (ULPGL
GOMA)**



BP 368 GOMA

**FACULTÉ DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE ET INFORMATIQUE**

**CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UNE PETITE
CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE EN VUE DE L'ALIMENTATION
DU CAMPUS SALOMON ULPGL/GOMA**

Travail de fin de cycle présenté en vue de l'obtention d'un

Diplôme de graduat en génie électrique et informatique

Présenté par : **AMANI MUTOKA Ghislain**

Dirigé par : **Prof. Dr. Techn. Olivier BARAKA MUSHAGE**

Encadré par : **Msc. Janvier KAMUNDALA**

Année académique 2021-2022

ÉPIGRAPHE

« J'ai inventé une lampe de poche qui fonctionne à l'énergie solaire, elle n'a qu'un dernier défaut, elle ne marche qu'en plein soleil. »

André Franquin

DÉDICACE

À nos nièces jumelles Katherine KASONGO et Kethia KASONGO ainsi qu'à notre cadette
Joyce MUTOKA.

AMANI MUTOKA Ghislain

REMERCIEMENTS

Nous adressons nos plus sincères sentiments de reconnaissance et de remerciement envers le bon Dieu, le clément et le miséricordieux, lequel nous a accordé la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous voulons exprimer notre gratitude à notre directeur, Prof. Dr. Techn. Olivier BARAKA MUSHAGE, pour avoir accepté de diriger ce travail malgré ses multiples occupations, et à notre encadreur Msc. Janvier KAMUNDALA pour son soutien, sa disponibilité et ses précieux conseils tout au long de ce travail.

Nous sommes reconnaissances envers nos très chers parents Désiré MUTOKA et Anastasie BAGANDA pour leur confiance, courage et soucis pour la formation de notre personnalité.

Nous exprimons notre reconnaissance aux autorités académiques et administratives de l'ULPGL/GOMA particulièrement ceux de la faculté des sciences et technologies appliquées (F.S.T.A) qui sont dévoués à apporter chacun sa contribution à notre formation.

Nous adressons notre gratitude à notre très cher oncle Abbé BUGORHE BAGANDA Don Pascal et maman COLETTE auprès de qui nous avons obtenus générosité et soutien tout au long de notre parcours académique.

À nos amis, sœurs, beaux-frères et à tout ce dont de près ou de loin nous ont porté assistance activement et passivement nous disons également merci.

Enfin, que toutes les personnes qui ont, de près ou de loin, apporté aide et encouragement trouvent ici leur part indéniable de remerciement.

AMANI MUTOKA Ghislain

SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AC/CA : Alternating Courant/Courant Alternatif

AH : Angle horaire

AZ : Angle Azimut

CC : Courant continu

Cfr : Confère

CO₂ : Dioxyde de Carbone

DC/AC : Convertisseur continu-alternatif

DC/CC : Courant continu

DC/DC : Convertisseur continu-continu

EPV : Energie photovoltaïque

EnR : Energie renouvelable

Fig : Figure

FSTA : Faculté des Sciences et Technologies Appliquées

GPV : Générateur photovoltaïque

GW_c : Giga Watt crête

HS : Hauteur par rapport au Soleil

I : Courant

I_{cc} : Courant de court-circuit

Kpa : Kilo Pascal

KWh : Kilowatt heure

LAT : Latitude

Max : Maximum

Min : Minimum

Pc : Puissance Crête

PMW : Pulse Width modulation

MPPT : Maximum power Point Tracking

MWc : Méga Watt Crête

PV : Photovoltaïque

RDC : République Démocratique du Congo

Uco : Tension de Circuit Ouvert

ULPGL : Université Libre des Pays des Grands Lacs

V : Tension

VA : Voltampère

W : Watt

°C : Degré Celsius

TABLE DES MATIÈRES

ÉPIGRAPHE.....	i
DÉDICACE.....	ii
REMERCIEMENTS	iii
SIGLES ET ABRÉVIATIONS	iv
TABLE DES MATIÈRES	vi
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	x
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	xi
1. PROBLÉMATIQUE	xi
2. HYPOTHÈSES	xii
3. CHOIX ET INTÉRÊT DU SUJET	xii
4. OBJECTIF DU TRAVAIL	xii
5. OBJECTIFS SPÉCIFIQUES.....	xiii
6. MÉTHODOLOGIES ET TECHNIQUES UTILISÉES	xiii
7. SUBDIVISION DU TRAVAIL	xiii
CHAP. I : GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES.....	1
I.1 INTRODUCTION.....	1
I.2 HISTORIQUE DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE	1
I.3 APERÇU SUR LES ÉNERGIES RENOUVELABLES.....	2
I.4 TYPES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES	3
I.5 CONSTITUTION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE	4
I.5.1 Générateur photovoltaïque.....	4
I.5.1.6 Utilisations des systèmes photovoltaïques (PV).....	9
I.5.2 La batterie	13
I.5.3 Le régulateur de charge	15

I.5.3.1 Différents types de régulateur.....	15
1.5.4 L'onduleur.....	18
1.5.4.1 Onduleurs DC/AC.....	18
I.5.4.3 Onduleurs DC/DC.....	19
1.1 CONCLUSION PARTIELLE.....	20
CHAP. II. PROTECTION ET MAINTENANCE DU SYSTÈME.....	21
II.1 Les dispositifs de sécurité.....	21
II.1.1 La mise à la terre.....	21
II.1.3 Protection contre les courants de fuite et décharges statiques.....	24
II.1.4 Protection contre les défauts d'isolation côté AC.....	24
II.1.5 Protections contre les courts-circuits.....	25
II.2 Procédure de maintenance des panneaux solaires [13] :.....	26
II.2.1 Placement et connexion des panneaux.....	27
II.2.2 Maintenance des batteries.....	28
II.2.3 Maintenances des régulateurs.....	29
II.2.3 Maintenance des onduleurs.....	30
II.2.4 Maintenance des câbles.....	30
CONCLUSION PARTIELLE.....	31
CHAP. III : CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UNE CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE.....	32
III.1 INTRODUCTION.....	32
III.2 PRÉSENTATION DU SITE D'INSTALLATION.....	32
III.3 DIMENSIONNEMENT DES COMPOSANTS.....	33
III.3.1 ÉVALUATION DES BESOINS JOURNALIERS.....	34
III.3.2 DIMENSIONNEMENT DU SYSTÈME PV.....	36
III.3.3 DIMENSIONNEMENT DES RÉGULATEURS.....	40

III.3.4 DIMENSIONNEMENT DES BATTERIES	42
III.3.5 DIMENSIONNEMENT DES ONDULEURS.....	43
III.3.6 DIMENSIONNEMENT DES CÂBLAGES.....	46
III.4 Estimation du coût de l'ensemble de l'installation.....	50
III.5 CONCLUSION PARTIELLE	50
CONCLUSION GÉNÉRALE	51
BIBLIOGRAPHIE	53

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : les éléments d'un système solaire photovoltaïque	4
Figure I.2 : Module au silicium monocristallin.....	5
Figure I.3 : Module au silicium polycristallin.....	6
Figure I.4: Module au silicium amorphe	6
Figure I.5 : PV à couche mince	6
Figure I.6 : Courbes caractéristiques d'un module photovoltaïque en fonction de valeurs différentes de rayonnement	8
Figure I.7 : Courbes caractéristiques d'un module photovoltaïque en fonction de valeurs différentes de température	8
Figure I.8 : Exemple d'une connexion des modules PV en série-parallèle.....	8
Figure I.9 : Schéma idéale d'une cellule photovoltaïque	10
Figure I.10 : Schéma équivalent d'une cellule solaire	11
Figure I.11: Schéma équivalent à une diode sans résistance shunt	11
Figure I.12 : Schéma équivalent à deux diodes.....	12
Figure I.13 : schéma équivalent à deux diodes sans résistance shunt	12
Figure I.14 : Schéma bloc d'une cellule PV.....	12
Figure I.15 : Régulateur série	16
Figure I.16 : Régulateur PWM.....	17
Figure I.17 : Régulateur MPPT	17
Figure II.1 : Onde de tension « normale » du réseau alternatif (exemple ici en 230V entre Phases et Neutre.....	23
Figure II.2 : Une surtension indirecte, de type foudre, vient se superposer à la Tension du réseau.....	23
Figure II.2 : Le parafoudre limite cette surtension à une surtension dite « acceptable ». La vitesse de déclenchement est ultra rapide (quelques nanosecondes) grâce à ses composants intégrés	23

LISTE DES TABLEAUX

Tableau III.1 : Présentation des données météorologiques de l'année 2016 de la ville de Goma [31]	33
Tableau III.2 : Estimation de besoins journaliers d'un auditoire consommant moins d'énergie	34
Tableau III.3 : Estimation de besoins journaliers d'un auditoire consommant plus d'énergie	35
Tableau III.4 : les caractéristiques du module photovoltaïque [32]	37
Tableau III.5 : facteur de correction d'un module [33]	38
Tableau III.6 : données techniques et types [37]	55
Tableau III.7 : Estimation du coût de l'ensemble de l'installation	50

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'énergie solaire photovoltaïque est l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmont Becquerel en 1839.

Par définition le mot " photovoltaïque " vient du grec " photo " qui signifie lumière et de " voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754 -1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la lumière électricité [1] [2].

Selon les estimations l'énergie rayonnée par le soleil représenterait chaque année 40 000 fois les besoins énergétiques que l'humanité consomme sous forme d'énergies fossiles. Malgré cela, l'énergie solaire reste un domaine assez peu exploité. Néanmoins la prise de conscience collective en fait une énergie douce d'avenir (même si elle est connue et utilisée depuis des millénaires) [3].

Le but des panneaux solaires est de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique. L'unité de base d'un panneau solaire photovoltaïque est la cellule photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs. Ceux-ci sont capable de transformer l'énergie fournit par le soleil en charge électrique donc en électricité car la lumière du soleil excite les électrons de ces matériaux [3].

1. PROBLÉMATIQUE

Depuis plusieurs années, l'insuffisance d'énergie électrique permanant dans les auditorios de ULPGL (Université libre des pays des grands lacs), en particulier ceux du campus Salomon, a toujours été un problème pour un bon déroulement des cours.

Cela nous a poussé à concevoir une petite centrale photovoltaïque autonome qui sera bénéfique aux autorités académiques afin de minimiser certaines dépenses et garantir des bonnes conditions d'étude aux étudiants et à ces derniers de l'utiliser lorsqu'ils en ont besoin.

Indéniablement, l'énergie solaire communément appelée énergie photovoltaïque est une source d'énergie capable d'apporter une solution à notre problème.

Ainsi, les questions suivantes méritent d'être posées, notamment :

- Est-il possible de concevoir et dimensionner une centrale photovoltaïque à un prix raisonnable pour le campus Salomon ?
- Est-il possible d'alimenter en permanence les auditorios du campus Salomon ?

2. HYPOTHÈSES

A la fin de ce travail nous espérons arriver à concevoir et dimensionner une centrale photovoltaïque autonome qui permettrait :

- De fournir l'énergie suffisante dans le campus Salomon,
- Répondre aux besoins de deux parties (Autorités académiques et étudiants)
- D'offrir la possibilité d'avoir l'énergie électrique à tout moment.

3. CHOIX ET INTÉRÊT DU SUJET

Notre étude s'est portée sur une centrale photovoltaïque parce qu'elle présente plusieurs avantages entre autres :

- Faciliter aux autorités académiques de minimiser certaines dépenses et garantir une bonne condition d'étude aux étudiants.
- La possibilité d'utiliser l'énergie électrique lorsque les étudiants en ont besoin pour une meilleure formation académique.

Une fois réalisé, ce système va contribuer à l'amélioration des résultats des étudiants et leur donnant accès à l'énergie électrique à tout moment.

4. OBJECTIF DU TRAVAIL

L'électricité, énergie non renouvelable représente un budget conséquent au sein des foyers, entreprises, ... Pour cela, la pose de système photovoltaïque peut être le remède pour diminuer de façon conséquente les factures d'électricité.

A part diminuer de façon conséquente les factures d'électricité, ce travail vise aussi à présenter les spécifications techniques d'un système photovoltaïque capable de fournir en électricité les auditorios du campus Salomon de l'ULPGL GOMA.

5. OBJECTIFS SPÉCIFIQUES

Ce travail a comme objectifs spécifiques de :

- i. L'évaluation des besoins énergétiques des auditoires ;
- ii. Dimensionner le champs PV utile ;
- iii. Choisir les modules PV ;
- iv. Dimensionner les unités de stockage ;
- v. Dimensionner et choisir les convertisseur et régulateurs de charge ; ...
- vi. Dimensionner les câbles

6. MÉTHODOLOGIES ET TECHNIQUES UTILISÉES

Afin de bien mener notre étude, bien de méthodes et techniques des recherches scientifiques ont été utilisées :

- La technique d'expérimentation : c'est une démarche qui nous permet de contrôler la validité de nos hypothèses.
- La méthode analytique : c'est la méthode qui nous permet de trouver le bon endroit approprié pour poser nos modules PV et de bien faire les choix des composants de notre système.
- La technique documentaire : elle nous facilite de faire l'usage des documents pour l'avancement de notre travail.

7. SUBDIVISION DU TRAVAIL

Excepté l'introduction et la conclusion, notre travail porte sur les chapitres ci-après :

1. CHAPITRE 1 : Généralité sur le système photovoltaïque ;
2. CHAPITRE 2 : Protection et maintenance du système
3. CHAPITRE 3 : Conception et dimensionnement d'une centrale photovoltaïque

CHAP. I : GÉNÉRALITÉS SUR LES SYSTÈMES PHOTOVOLTAÏQUES

I.1 INTRODUCTION

L'énergie solaire est propre et renouvelable. La Terre reçoit sous forme de lumière du Soleil plus de 10 000 fois l'énergie que l'humanité consomme. En effet, la surface du globe reçoit annuellement de l'énergie solaire ayant une puissance allant de 85 à 290 W/m². Et cette énergie est inépuisable car elle est entretenue par les réactions nucléaires qui ont lieu dans le soleil. Bien que la ressource ait toujours existé, son utilisation est assez récente dans l'histoire de l'humanité. On voit apparaître les premières réalisations technologiques solaires au XIX^e siècle mais c'est véritablement pendant la deuxième partie du XX^e siècle que l'énergie solaire commence à apparaître comme une source d'énergie électrique importante, particulièrement avec le développement du photovoltaïque. Puis peu à peu, à partir des années 1970, l'énergie photovoltaïque prend place dans l'industrie terrestre [4].

I.2 HISTORIQUE DE L'ÉNERGIE PHOTOVOLTAÏQUE

L'histoire du photovoltaïque montre que l'utilisation de cette énergie est très ancienne [5] car en :

- 1839 : le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.
- 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque [6].
- 1954 : trois chercheurs américains Chapin, Pearson et Prince fabriquent une cellule photovoltaïque.
- 1958 : une cellule solaire avec un rendement de 9 % à mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace les années 60.
- 1973 : la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques était construite à l'Université de Delaware [7].

- 1983 : la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie [6].
- 2013 : la production mondiale des modules photovoltaïques est passé de 5 MWc en 1982 à 18GWc en 2013.
- 2013 : le groupe algérien Condor électronique, a lancé la production des panneaux photovoltaïques dont la puissance varie entre 70 W et 285 W.
- 2019 : la production d'énergie photovoltaïque est à la disposition de l'industrie, entreprises et des particuliers, incluant les applications domestiques.

I.3 APERÇU SUR LES ÉNERGIES RENOUVELABLES

Les énergies renouvelables (EnR) sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Elles proviennent de phénomènes naturels cycliques ou constants induits par les astres : le Soleil essentiellement pour la chaleur et la lumière qu'il génère, mais aussi l'attraction de la Lune (marées) et la chaleur générée par la Terre (géothermie). Leur caractère renouvelable dépend d'une part de la vitesse à laquelle la source est consommée, et d'autre part de la vitesse à laquelle elle se renouvelle.

L'expression « énergie renouvelable » est la forme courte et usuelle des expressions « sources d'énergie renouvelables » ou « énergies d'origine renouvelable » qui sont plus correctes d'un point de vue physique.

La part des énergies renouvelables dans la consommation finale mondiale d'énergie était estimée en 2018 à 17,9 %, dont 6,9 % de biomasse traditionnelle (bois, déchets agricoles, etc.) et 11,0 % d'énergies renouvelables « modernes » : 4,3 % de chaleur produite par les énergies renouvelables thermiques (biomasse, géothermie, solaire), 3,6 % d'hydroélectricité, 2,1 % pour les autres renouvelables électriques (éolien, solaire, géothermie, biomasse, biogaz) et 1 % pour les biocarburants ; leur part dans la production d'électricité était estimée en 2018 à 26,4 % [8].

I.4 TYPES D'ÉNERGIES RENOUVELABLES

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables, produites à partir de sources différentes [8].

A. Énergie solaire

Ce type d'énergie renouvelable est issu directement de la captation du rayonnement solaire. On utilise des capteurs spécifiques afin d'absorber l'énergie des rayons du soleil et de la rediffuser selon deux principaux modes de fonctionnement :

- a. Solaire photovoltaïque (panneaux solaires photovoltaïques) : l'énergie solaire est captée en vue de la production d'électricité.
- b. Solaire thermique (chauffe-eau solaire, chauffage, panneaux solaires thermiques) : la chaleur des rayons solaires est captée et rediffusée, et plus rarement sert à produire de l'électricité

B. Énergie éolienne

Dans le cas de l'énergie éolienne, l'énergie cinétique du vent entraîne un générateur qui produit de l'électricité. Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables éoliennes : les éoliennes terrestres, les éoliennes off-shore, les éoliennes flottantes... Mais le principe reste globalement le même pour tous ces types d'énergies renouvelables.

C. Énergie hydraulique

L'énergie cinétique de l'eau (fleuves et rivières, barrages, courants marins, marées) actionne des turbines génératrices d'électricité.

D. Biomasse

L'énergie est issue de la combustion de matériaux dont l'origine est biologique (ressources naturelles, cultures ou déchets organiques). On en distingue trois catégories principales : Le bois, le biogaz, les biocarburants.

E. Géothermie

L'énergie est issue de la chaleur émise par la Terre et stockée dans le sous-sol. Selon la ressource et la technologie mise en œuvre, les calories sont exploitées directement ou converties en électricité.

I.5 CONSTITUTION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE

Les systèmes solaires photovoltaïques fonctionnent comme suit :

La lumière solaire entre par la surface des modules photovoltaïques, où elle est convertie en énergie électrique de courant continu (**générateur photovoltaïque**). Plus tard, cette énergie est collectée et conduite au système de régulation de charge (**régulateur**) dont la fonction est d'envoyer cette énergie de manière totale ou partielle au système de cumul (**batterie**), où elle est stockée avec la précaution de ne pas excéder les limites de surcharge et de décharge profondes. Cette énergie stockée est utilisée pour le ravitaillement des charges pendant la nuit, en jours de faible ensoleillement ou lorsque le système photovoltaïque est incapable de satisfaire la demande lui-même [14].

Quand les charges à alimenter sont de courant continu, elles s'alimentent de manière directe. Quand les charges sont de courant alternatif, l'énergie s'envoie à un inverseur de courant où elle est convertie en courant alternatif (**onduleur**).

Ainsi la figure 1:1 nous présente les éléments d'un système solaire photovoltaïque, qui sont les suivants :

- Générateur photovoltaïque
- Batterie
- Régulateur
- Onduleur

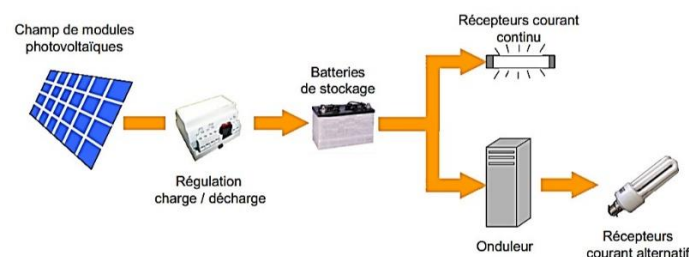


Figure I.1 : les éléments d'un système solaire photovoltaïque [15]

I.5.1 Générateur photovoltaïque

Les panneaux solaires photovoltaïques, parfois appelés photoélectriques, transforment la lumière en électricité. Ces panneaux sont donc les plus répandus mais aussi les plus complexes.

Ces panneaux sont tout simplement un assemblage de cellules photovoltaïques, chacune d'elles délivrant une tension de 0.5V à 0.6V. Elles sont donc assemblées pour créer des modules photovoltaïques de tension normalisée comme 12V.

Un panneau constitué de 20 cellules photovoltaïques va donc délivrer une tension U de 12V, et cela quel que soit l'ensoleillement. Mais pour faire fonctionner des appareils électriques, c'est la puissance P (en Watt) qui détermine l'énergie électrique. Et $P=U \times I$, c'est donc l'intensité du panneau qui va déterminer l'énergie électrique. Et c'est l'intensité qui varie en fonction de l'ensoleillement [13].

I.5.1.1 Technologies de modules photovoltaïques

A. Module au silicium monocristallin

Cellules de couleur bleu nuit, uniforme par un monocristallin avec un meilleur rendement. Le rendement maximal obtenu dans le laboratoire est de 24.7 %, et de 16 % dans les modules commercialisés.

Utilisations : modules de grandes dimensions pour toits et façades, appareils de faible puissance, espace [15] La figure 1 :11 nous le présenté ci-dessous :



Figure I.2 : Module au silicium monocristallin [42]

B. Module au silicium polycristallin :

Cellules de couleur bleu avec des motifs, et formé par plusieurs cristaux avec un rendement meilleur comme montre la figure 1 :12 ci-dessous. Ils sont très reconnaissables visuellement parce que leur superficie présente un aspect granulé. Le rendement obtenu avec ces modules est inférieur à celui des modules monocristallins (19.8 % dans le laboratoire et 14 % dans les modules commercialisés), et leur prix est aussi plus bas [13].

Utilisation : modules de grandes dimensions pour toits et façades, générateurs de toutes tailles (relié au réseau ou en sites isolés) ;



Figure I.3 : Module au silicium polycristallin [42]

C. Module au silicium amorphe

Ils sont aussi à base de silicium, mais contrairement aux modules précédents, ce matériau n'a pas de structure cristalline. Son rendement maximal obtenu dans le laboratoire est de 13 %, et de 8 % pour les modules commercialisés. Ils sont moins utilisés. (Ils s'appellent aussi modules à couche mince) (figure 1 :13).

Utilisation : Appareils de faible puissance, production d'énergie embarquée (calculatrice, montres, ...), modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment) [13].



Figure I.4: Module au silicium amorphe [42]

D. PV à couche mince

Est une technologie émergente avec rendements inférieur au Si cristallin mais les coûts sont potentiellement inférieurs (cette technologie nécessite moins de matériaux semi-conducteurs) (figure 1 :14)

Utilisation : Modules de grandes dimensions (intégration dans le bâtiment) [13].

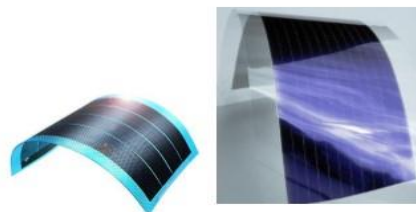


Figure I.5: PV à couche mince [15]

I.5.1.2 Paramètres électriques d'un module photovoltaïque

Les paramètres les plus importants d'un panneau photovoltaïque sont [13]:

- ✓ Courant de court-circuit (I_{cc}) : C'est l'intensité de courant maximale fournie par le panneau. Il s'agit du courant qui se produit lors de la connexion directe des deux pôles. *I_{cc} est généralement autour de 3 A.*
- ✓ Tension de circuit ouvert (U_{cO}) : C'est la tension maximale fournie par le panneau. Elle se produit quand les pôles se trouvent « en plein air ». *U_{cO} est généralement inférieur à 22 V dans les modules qui fonctionnent avec 12 V.*
- ✓ Point de puissance maximale : Il existe un point de fonctionnement (I_{pmax} , V_{pmax}) où la puissance fournie est maximale ($P_{max} = I_{pmax} * V_{pmax}$). C'est le point de puissance maximale du panneau. Il est indiqué en watts (W).
- ✓ Facteur de forme FF : Il s'agit de la relation entre la puissance maximale fournie par le panneau et le produit $I_{sc} \times V_{oc}$. Il présente une notion sur la qualité du panneau et sa valeur se trouve normalement entre 0,7 et 0,8.
- ✓ Efficacité ou rendement η : C'est le ratio entre la puissance électrique maximale que le panneau peut transmettre à la charge et la puissance du rayonnement solaire (P_I) frappant le panneau. Il se trouve normalement autour de 10 %.

Les valeurs d' I_{sc} , V_{oc} , I_{pmax} et V_{pmax} sont fournies par le fabricant en relation avec des Conditions Standard (CS) de mesure, notamment : (i) irradiance $G(CE) = 1kW/m^2$; (ii) Au niveau de la mer ; (iii) Pour la température des cellules $T_c(CE) = 25^\circ C$.

La puissance maximale fournie par le module est indiquée en watt crête (W_c).

Les caractéristiques principales d'un module photovoltaïque sont marquées par : (i) Sa puissance crête (W_c) ; (ii) Son courant de court-circuit (A) ; (iii) Sa tension de circuit ouvert (V) ; et (iv) sa tension de fonctionnement (12 V ; 24 V ; 48 V)

I.5.1.3 Courbe caractéristique d'un module photovoltaïque

Le fonctionnement électrique d'un module est représenté par sa courbe caractéristique. Cette courbe indique le courant fourni par le module en fonction de sa tension. Les possibles valeurs de tension et de courant qui dépendent surtout de la température et du rayonnement solaire reçu par les cellules du module [13] [16]. (Figure 1 :15 et figure 1 :16)

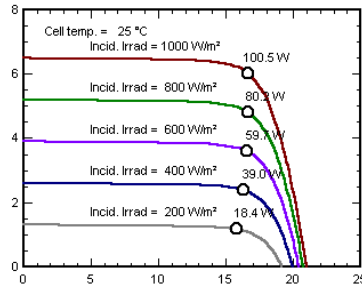


Figure I.6 : Courbes caractéristiques d'un module photovoltaïque en fonction de valeurs différentes de rayonnement [23]

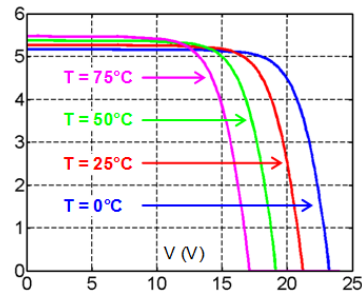


Figure 0.7 : Courbes caractéristiques d'un module photovoltaïque en fonction de valeurs différentes de température [23]

I.5.1.4 Interconnexion des panneaux photovoltaïques

Tous les panneaux à interconnecter doivent être égaux, c'est-à-dire, ils doivent être de la même marque et avoir les mêmes caractéristiques.

L'interconnexion des panneaux se fait, premièrement, à travers l'association de panneaux en série pour obtenir le niveau de tension souhaité ; et plus tard, à travers l'association en parallèle de plusieurs associations en série pour obtenir le niveau de courant souhaité. La Figure I : 21 est un exemple de cette connexion [13] [17] (Figure 1 :17).

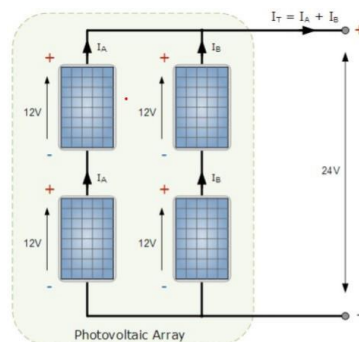


Figure I.8 : Exemple d'une connexion des modules PV en série-parallèle [43]

I.5.1.5 Différents types de systèmes photovoltaïques

On rencontre généralement trois types de systèmes photovoltaïques :

- Systèmes autonomes/stand Alone PV systems : systèmes utilisant uniquement la technologie photovoltaïque et qui ne sont pas connectés à un réseau de distribution.
- Systèmes hybrides/Hybrid PV systems : systèmes utilisant le photovoltaïque et certaines autres formes d'énergie, telles que les générateurs au diesel ou l'énergie éolienne.
- Systèmes liés au réseau/Grid Connected PV Systems : systèmes connectés à un réseau de distribution. [13]

Les deux premiers sont indépendants du système de distribution d'électricité, en les retrouvant souvent dans les régions éloignées.

I.5.1.6 Utilisations des systèmes photovoltaïques (PV)

Des milliers de systèmes PV sont utilisés aujourd'hui dans diverses applications. En voici quelques exemples [20]:

- **Les systèmes PV pour le chalet et le domicile :**

En général, les systèmes PV sont une option économique pour les chalets et les domiciles situés dans des régions éloignées. Dans la plupart de ces régions, il est impossible de se relier au réseau électrique et, dans de nombreux cas, du combustible fossile coûteux est utilisé afin de produire de l'électricité. Si le domicile est relié au réseau actuel, les systèmes PV donneront la source autonome d'électricité dont on peut avoir besoin pendant une panne d'électricité.

- **Les systèmes PV pour les applications mobiles et récréatives :**

Les utilisateurs de véhicules et de bateaux de plaisance ainsi que les membres d'expéditions peuvent aussi profiter du fonctionnement silencieux et sans pollution des systèmes PV portatifs pour recharger des batteries et des piles.

- **Les systèmes PV en agriculture :**

Les systèmes PV sont utilisés efficacement dans le monde entier afin de pomper de l'eau pour le bétail, les plantes ou les êtres humains. Étant donné que le besoin en eau est plus grand les jours chauds et ensoleillés, ces systèmes conviennent parfaitement aux applications de pompage. Ils fournissent également l'énergie de clôtures électriques dans les fermes.

- **Les systèmes PV pour d'autres applications :**

Les systèmes PV peuvent être adaptés pour répondre à tout besoin, petit ou grand. Par exemple, les cellules PV sont utilisées dans les calculatrices et les montres. Aussi, le matériel de télécommunication, les panneaux de construction routière, les feux de stationnement et les signaux d'avis aux navigateurs sont d'excellentes applications pour les systèmes PV.

I.5.1.7 Modules photovoltaïques

Les modules sont un assemblage de photopile (ou cellule) montée en série, afin d'obtenir la tension désirée (12V, 24V...). la cellule photovoltaïque est l'élément de base dans la conversion du rayonnement. Plusieurs cellules sont associées dans un module qui est la plus petite surface de capacité transformable, montable et démontable sur un site. Les modules sont regroupés en panneaux, qui sont à leur tour associés pour obtenir des champs photovoltaïques selon les besoins. Les cellules photovoltaïques sont réalisées principalement par le silicium cristallin, qui est utilisé sous forme monocristalline ou multi-cristalline en plaquette ou en ruban ou encore en couches semi-minces sur substrat selon les technologies récentes. Les modules sont associés en série et en parallèle pour obtenir des puissances importantes et la tension voulue. On protège chaque cellule PV contre l'échauffement en lui montant une diode dite « diode by-pass » en parallèle qui court-circuite. Aussi on évite qu'un module PV soit récepteur en mettant en série à chaque branche une diode dite « diode anti retour » de chute de tension négligeable [14].

A. Modèle d'une cellule solaire idéale

La photopile est un composant semi-conducteur qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons, donc en première approximation on a une source de courant, qui est court-circuitée par une diode (car la photopile est une jonction p-n) [10] La figure 1 : 5 ci-dessous représente le schéma idéal d'une cellule photovoltaïque.

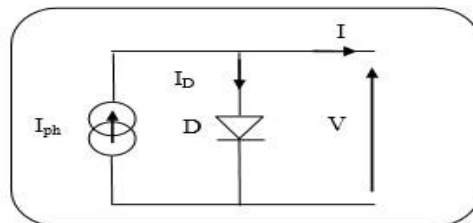


Figure I.9 : Schéma idéal d'une cellule photovoltaïque [10]

B. Modèle d'une cellule solaire réelle

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles de la cellule photovoltaïque qui diffèrent entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et de l'intensité de courant de sortie. Rauschenbach (1980) et Townsend (1981) ont prouvés que des cellules photovoltaïques peuvent être modélisées par un circuit électrique équivalent qui contient des paramètres ayant les significations liées aux phénomènes physiques de la cellule. Rauschenbach (1980) et Green (1981) ont passé en revue plusieurs circuits équivalents et ils ont recommandé l'utilisation de circuit d'une seule diode à quatre paramètres. Roger (1984), Appelbaum (1987), Ekstein (1990), Duffie et Beckmann (1991) et Alghuwainem (1992) ont employés le modèle à quatre paramètres. Dans ce qui suit on récapitule les différents modèles électriques des cellules photovoltaïques rencontrées dans la littérature [10].

C. Modèle à une diode (à une seule exponentielle)

Réellement il existe plusieurs influences des résistances parasites dans la production de l'énergie électrique, et la cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schéma suivant (figure 1 :6) [10]:

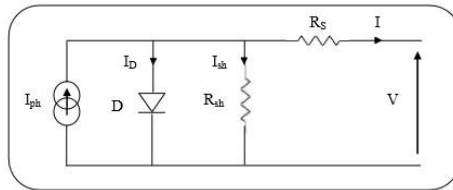


Figure I.10 : Schéma équivalent d'une cellule solaire [10]

D. Modèle à une diode sans résistance shunt

Un modèle électrique empirique simple, le plus proche du générateur photovoltaïque, est actuellement le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, c'est le modèle à une diode. La figure 1 :7 illustre le circuit électrique équivalent au modèle à une diode [10].

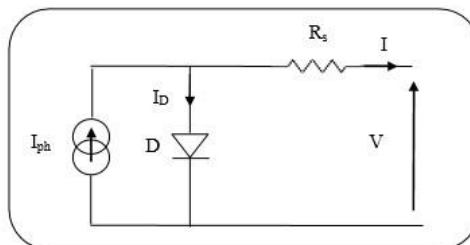


Figure I.11: Schéma équivalent à une diode sans résistance shunt [10]

E. Modèle à deux diodes (à deux exponentielles)

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique suivant (figure 1 :8), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série [10].

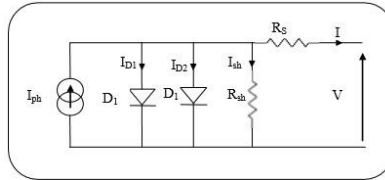


Figure I.12 : Schéma équivalent à deux diodes [10]

F. Modèle à deux diodes sans résistance shunt

La cellule photovoltaïque est représentée par le circuit électrique (figure 1 :9), qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux (éclairage), deux diodes pour la polarisation de la cellule et une résistance série [10].

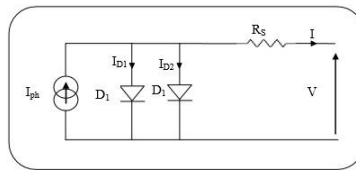


Figure I.13 : schéma équivalent à deux diodes sans résistance shunt [10]

D'une façon générale on peut mettre le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire en schéma bloc comportant quatre paramètres (figure 1 : 10) [10].

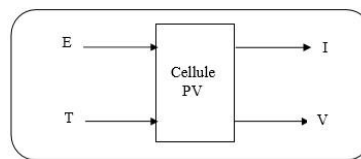


Figure I.14 : Schéma bloc d'une cellule PV [9]

Avec deux variables d'entrée :

E : ensoleillement dans le plan de la cellule (W/m^2).

T : température de la cellule ($^{\circ}C$).

Et deux variables de sortie :

I : intensité de courant fournie par la cellule (A).

V : tension aux bornes de la cellule.

Nous pouvons distinguer deux types de panneaux solaires [13]:

- **Les panneaux solaires thermiques** : Ces panneaux convertissent la lumière en chaleur. Ils sont souvent utilisés dans des installations domestiques où ils sont reliés à un chauffe-eau.
- **Les panneaux solaires photovoltaïques** : Plus complexes, ils transforment la lumière du Soleil directement en électricité.

I.5.2 La batterie

La batterie a pour fonction le stockage d'une partie de l'énergie produite par les panneaux (c'est-à-dire, la portion d'énergie qui n'est pas immédiatement consommée) afin qu'elle soit disponible dans des périodes où le rayonnement solaire est faible ou inexistant. Le stockage se fait sous la forme d'énergie électrique à travers l'usage de batteries, normalement de plomb-acide [13].

Une batterie est composée par l'association en série de plusieurs « éléments » ou « cellules », chacun d'eux comprenant deux électrodes de plomb dans une dissolution électrolytique. Entre les deux électrodes, une différence de potentiel de près de deux volts est établie, et la valeur instantanée dépend de l'état de charge de la batterie. Les batteries les plus utilisées pour les applications photovoltaïques sont de 12 ou 24 volts de tension nominale [13].

La batterie a aussi ces deux importantes fonctions [13]:

- Fournir une puissance instantanée supérieure à celle fournie par l'ensemble des panneaux et nécessaire pour la mise en place de quelques éléments.
- Déterminer la marge des tensions de travail de l'installation.

I.5.2.1 Types de batteries

Les batteries sont de plusieurs types, à savoir [13]:

- Nickel-cadmium
- Plomb-acide
- Batteries au nickel

- Batteries au Lithium
- Batterie d'automobile ou batterie de démarrage

Les batteries de Nickel-Cadmium sont les plus recommandées à cause de leur haute fiabilité et résistance, mais leur prix élevé fait pencher la balance en faveur des batteries de plomb-acide. Cependant, il y a quelques pays où ces batteries sont difficiles à trouver ou leur prix peut être très haut (soient locales ou soient importées), et pour cette raison, les batteries utilisées sont celles offertes par le marché, notamment celles destinées au marché des automobiles. En plus, l'Union Européenne a interdit l'usage des batteries de Nickel-Cadmium à cause de la toxicité du Cadmium.

Pourtant, les batteries d'automobile ne sont pas très recommandées pour les applications photovoltaïques, car elles ont été désignées pour fournir une forte intensité pendant quelques secondes (démarrage), et pas pour fournir des courants bas de manière plus ou moins régulière. Cela réduit sa durée d'utilisation.

Les batteries peuvent avoir une technologie à électrolyte liquide ou gel. Dans le cas des batteries à électrolyte gel, l'électrolyte se présente sous la forme d'un gel. Ce type de batterie a les avantages suivants : elle n'a besoin d'aucune maintenance et peut travailler dans un large éventail de températures (-15°C +55°C). Par contre, elles sont plus chères et se rechargent plus lentement.

I.5.2.1 Paramètres de la batterie

Les paramètres importants à connaître sur les batteries sont :

- **Tension nominale** : Elle est normalement de 12 volts [13].
- **Capacité nominale** : Elle est la quantité maximale d'énergie qui peut être retirée de la batterie. Elle s'indique en ampères heure (Ah) ou en wattheures (Wh). Puisque la quantité d'énergie qui peut être retirée dépend aussi du temps nécessaire pour le processus d'extraction (plus le processus est long, plus d'énergie on pourra obtenir), la capacité est souvent indiquée en fonction du temps de décharge. Dans le cas des applications photovoltaïques, ce temps doit être égal ou supérieur à 100 heures [13].
- **Profondeur maximale de décharge** : Elle est la valeur (indiquée en pourcentage) extraite d'une batterie totalement chargée dans une décharge. La profondeur est limitée par les régulateurs, qui sont habituellement calibrés pour qu'ils puissent permettre des

profondeurs de décharge de la batterie d'environ 70 %. En fonction de la profondeur maximale de décharge permise, la batterie peut avoir plus ou moins de cycles de charge et décharge pendant toute sa durée d'utilisation. Le fabricant doit fournir des graphes où la relation entre la quantité de cycles et la durée de la batterie puisse être vue [13].

- **Capacité utile ou disponible** : Elle est la capacité qui peut être véritablement utilisée. Elle est égale au produit de la capacité nominale et de la profondeur maximale de décharge celle-ci divisée par un [13].

I.5.3 Le régulateur de charge

Une vigilance continue est requise pour éviter les surcharges et les décharges profondes de la batterie.

Ainsi, le régulateur de charge a pour fonction principale la protection de la batterie contre les situations extrêmes afin de ne pas l'endommager. Son fonctionnement consiste à prendre de l'information sur l'état de charge du système et la comparer avec les valeurs maximales et minimales admissibles pour que la batterie n'endure pas de surcharges ou de décharges extrêmes [13].

I.5.3.1 Différents types de régulateur

Il existe deux principaux types de régulateurs :

- **Régulateur parallèle** : Il contrôle la surcharge. Il est indiqué pour des petites installations solaires photovoltaïques [19].
- **Régulateur série** : Il contrôle la surcharge et la décharge. Son interrupteur peut être électromécanique ou statique. Il peut incorporer des autres fonctions (alarme, interruption nocturne, etc.) ... [19]

Les régulateurs du type série déconnectent l'ensemble de panneaux de la batterie pour éviter la surcharge ; et les équipements de consommation pour éviter la décharge profonde. Cette déconnexion se fait à travers interrupteurs qui peuvent être des dispositifs électromécaniques (des relais, des contacteurs, etc.) ou des dispositifs d'état solide (un transistor bipolaire, etc.) [19].

Afin de protéger la batterie de la surcharge, l'interrupteur s'ouvre quand la tension de la batterie atteint sa tension d'arrêt de la charge, et se ferme de nouveau quand la batterie retourne à la

tension de réinitialisation de charge. La tension d'arrêt de la charge est environ 2,45V par chaque élément de la batterie à 25°C.

En ce qui concerne la décharge profonde, l'interrupteur s'ouvre quand la tension de la batterie est inférieure à la tension d'arrêt de la décharge, et se ferme quand la batterie retourne à la tension de réinitialisation de décharge. La tension d'arrêt de la décharge est environ 1,95V par chaque élément [13] [15].

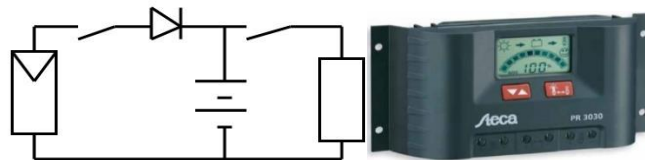


Figure I.15 : Régulateur série [15]

L'interrupteur de charge est ici en série avec les batteries et il s'ouvre lorsque la fin de charge est atteinte.

I.5.3.2 Paramètres qui définissent un régulateur

- Tension de travail : 12, 24 ou 48 V
- Intensité maximale : Elle doit être supérieure au courant maximal du générateur photovoltaïque.

Le fabricant fournit aussi des autres données d'intérêt [13]:

- Les valeurs de la tension d'arrêt de la charge (surchage) et de la tension d'arrêt de la décharge.
- L'existence de compensation avec la température. Les tensions qui indiquent l'état de charge de la batterie changent avec la température, et c'est pour cette raison que quelques régulateurs mesurent la température et utilisent cette information pour corriger les tensions de surcharge.
- L'instrumentation de mesure et ses indicateurs : les régulateurs ont souvent un voltmètre qui mesure la tension de la batterie et un ampèremètre qui mesure le courant. La plupart d'eux ont des indicateurs qui notifient certaines situations comme : le bas état de charge de la batterie, déconnexion des panneaux avec la batterie, etc.

I.5.3.3 Choix d'un bon régulateur

A. Les régulateurs de charge PWM (Pulse Width Modulation)

Ils désignent les régulateurs de base, qui ont uniquement pour rôle d'adapter la tension des panneaux. Ils sont donc idéals pour les petites installations (inférieures à 150W) du fait de leur faible coût. Ils ne permettent pas de charger un parc batterie 12V avec un panneau dont la tension est supérieure à 23V [15] [21].



Figure I.16 : Régulateur PWM [15]

B. Les régulateurs de charge MPPT (Maximum Power Point Tracking)

Grâce à leur micro-processeur et algorithmes de charges plus perfectionnés sont les régulateurs les plus performants à l'heure actuelle. Victron Energy est l'un des pionniers de cette technologie qui permet d'obtenir jusqu'à 30% de rendement supplémentaire par rapport à un PWM (notamment lors des périodes nuageuses). Ils sont dotés des algorithmes de charge les plus perfectionnés et permettent ainsi d'atteindre les meilleures productions. Dotés d'un port VE.Direct ou VE.Bus, ils sont compatibles avec les différents outils de contrôle tels que le Dongle Bluetooth, le câble VE.Direct, le MPPT Control ou le Color Control GX...etc [15] [21].

Enfin, les régulateurs MPPT acceptent une tension d'entrée plus élevée (75V, 100V, 150V et jusqu'à 250V) par rapport aux PWM (23V ou 55V max) et permettent ainsi de limiter la perte par effet joule. Ils permettent également de charger un parc batterie 12V avec des panneaux de 24V ou plus [21] [15].



Figure I.17 : Régulateur MPPT [15]

1.5.4 L'onduleur

Les onduleurs sont des équipes qui transforment la tension continue fournie par les modules en une tension différente, soit continue d'une autre magnitude (onduleurs DC/DC) ou soit alternative (onduleurs DC/AC, qui sont les plus communs) [13].

1.5.4.1 Onduleurs DC/AC

Les systèmes solaires produisent de l'énergie électrique en courant continu mais beaucoup d'électrodomestiques et de récepteurs fonctionnent avec le courant alternatif.

Dans les installations solaires photovoltaïques connectées au réseau électrique, l'onduleur doit non seulement transformer le courant continu du générateur photovoltaïque en courant continu du générateur photovoltaïque en courant alternatif, mais aussi réaliser des autres fonctions.

Ses fonctions principales : (i) inversion de modulation de l'onde alternative ; (ii) régulation de la valeur efficace de la tension de sortie.

Les onduleurs peuvent être en monophasé ou en triphasé, avec des valeurs différentes pour la tension d'entrée et avec une puissance qui peut aller jusqu'à des mégawatts [13].

1.5.4.2 Types d'onduleurs DC/AC

Onduleur à onde carrée : Pour les utilisations de base comme les TV et l'éclairage, et en général pour les charges résistives. Ils sont moins chers.

Onduleur à onde sinusoïdale : Pour tout type d'application, en particulier pour les moteurs. Ils sont plus chers. [22]

Caractéristiques de fonctionnement les plus importants [13]

- Tension et courant d'entrée/sortie
- Forme de l'onde
- Limites de la tension d'entrée - Basse de consommation et haut rendement
- Puissance de sortie
- Capacité de surcharge (important quand il a accès au moteur) - Facilité de réparation et la maintenance - Fonctionnement dans les points de puissance maximale
- Conditions ambiantes (température de fonctionnement)

La puissance nominale doit être environ 2 et 3 fois la puissance des appareils à alimenter. Un onduleur est fourni avec les câbles d'entrée CC de grosse section pour réduire les chutes de tension (il faut les connecter au régulateur ou à la batterie selon le cas, sans les rallonger).

Il est impératif de choisir des appareils en AC puisque cela sera plus économe en électricité : ceci diminuera la taille de l'onduleur du panneau solaire et des batteries.

En dehors de la forme d'onde (carrée ou sinusoïdale), les onduleurs doivent avoir deux caractéristiques [13]:

- Fiabilité vers les surtensions : ils doivent pouvoir distinguer si les surtensions sont provoquées par le démarrage d'un moteur (pour les tolérer) et les surtensions provoquées par un court-circuit (pour les couper).
- Efficacité de conversion : Elle est très dépendante de la puissance demandée à chaque instant. Car les onduleurs sont plus efficaces quand ils travaillent près de leur puissance nominale, il faut sélectionner bien le modèle à utiliser afin qu'il travaille normalement dans ces conditions. Le fabricant fournit souvent le rendement de l'onduleur à 70 % de sa valeur nominale. [13]

I.5.4.3 Onduleurs DC/DC

Ils sont nécessaires afin de diminuer ou d'augmenter la tension en CC des récepteurs qui fonctionnent en CC. La plupart des convertisseurs offrent des tensions suivantes : 1,5 V ; 3 V ; 4,5 V ; 6 V ; 7,5 V ; 9 V ; 12 V ; 24 V [13]. Le rendement des onduleurs ne cesse d'augmenter depuis ces dernières années. Cette amélioration participe, bien entendu, à la constante diminution des coûts de l'électricité générée par le PV. Il y a 25 ans, 90% était considéré comme un très bon rendement des onduleurs.

L'autre amélioration notable est celle du « rendement européen » qui prend en compte l'efficacité à charge partielle de l'onduleur. Plusieurs valeurs de rendement sont données dans les fiches techniques des onduleurs. À cause d'un mauvais rendement à charge partielle, la valeur du rendement européen est plus faible que celle du rendement maximal mais c'est elle qui est la plus proche de la réalité du fonctionnement de l'élément : le rendement européen est le plus proche de la réalité de fonctionnement de l'élément [13].

1.1 CONCLUSION PARTIELLE

Nous avons, dans ce premier chapitre présenté un bref historique sur les panneaux photovoltaïques, présenté ses avantages et inconvénients mais aussi présenté les composants d'un système PV avec leurs caractéristiques respectives.

CHAP. II. PROTECTION ET MAINTENANCE DU SYSTÈME

II.1 Les dispositifs de sécurité

Des dispositifs de sectionnement et de sécurité doivent, comme dans toute installation électrique, être placés aux endroits adéquats, afin de pouvoir interrompre le circuit, manuellement ou automatiquement (à la suite d'un défaut). L'interruption manuelle peut être motivée par le besoin d'isoler une partie du circuit (maintenance, contrôle, mise hors circuit des consommateurs...). L'interruption automatique doit impérativement se produire en cas de défaut, et notamment de court-circuit.

La sécurité recherchée du côté CC ne concerne pas le risque d'électrisation ou d'électrocution (les tensions sont inférieures à 50V), mais surtout le risque d'incendie. En effet, sans protection, en cas de court-circuit, le courant généré par les batteries (ou même les panneaux solaires) ne sera pas coupé, et provoquera tout à la fois des arcs électriques pouvant produire un incendie, et, par échauffement, la fonte et l'embrassement des composants inflammables. Par ailleurs, la nature même du courant continu interdit l'utilisation de dispositifs de protection conçus pour le courant alternatif, du fait de l'effet d'arc, bien souvent non interrompu dans les dispositifs de coupure prévus pour le courant alternatif.

La sécurité du côté AC doit bien entendu être la même que dans tous les circuits domestiques, et respecter la norme NF C 15-100 [19].

II.1.1 La mise à la terre

La mise à la terre et la protection de l'installation DC contre les surtensions transitoires dues à la foudre est vivement recommandée. En effet, les panneaux solaires sont en grande partie métalliques et le plus souvent placés en hauteur, et par conséquent sont exposés aux phénomènes électro-atmosphériques. Les surtensions transitoires dues à la foudre peuvent endommager ou détruire tout ou partie des appareils, et peuvent être évacuées vers la terre au moyen d'un parafoudre CC (l'appellation normalisée est : parasurtenseur, car les parafoudres ne protègent pas de la foudre, ce qui est le travail des paratonnerres, mais seulement des surtensions transitoires dues à la foudre) correctement relié à la terre. Les éventuels courants de fuite, de défaut, ou électrostatiques doivent aussi être évacués vers la terre [19].

La mise à la terre des structures métalliques (cadre des panneaux solaires, structures métalliques de fixation, mât de l'éolienne, carcasses métalliques du régulateur et du convertisseur...) est réalisée au moyen d'un câble en cuivre souple de section 10mm² ou plus, la mise à la terre du parafoudre en 16mm². L'équipotentialisation des conducteurs de terre est réalisée au moyen d'une barrette de terre, le contact avec la terre avec un piquet de terre en cuivre de 1,5m minimum descendu intégralement dans le sol.

La mise à la terre d'une installation photovoltaïque en site isolé devrait être obligatoire. Malheureusement, on constate bien souvent que les installateurs ou les usagers négligent ce point essentiel, mettant ainsi en péril, non seulement la pérennité de leur installation, mais aussi leur vie [19].

La mise à la terre adéquate d'une installation photovoltaïque en site isolé remplit 3 fonctions :

- La protection des appareils contre les surtensions dues à la foudre
- La protection des personnes contre les décharges statiques ou d'éventuels courants de fuite ou de défaut
- La protection des personnes contre les défauts d'isolation des appareils connectés côté AC.

Pour la mise à la terre, on applique la norme technique de l'ASE pour les installations à basse tension (SN ASE 1000-1 /23). Une installation photovoltaïque productrice d'énergie nécessite dans tous les cas une mise à la terre [24].

II.1.2 Protection contre les foudres

Les phénomènes orageux, de fréquence et d'intensité variables selon la typologie et la zone géographique, se traduisent par des impacts de foudre vers la terre. Ces derniers entraînent soit des dégâts physiques sur les installations, soit une détérioration des équipements électriques, due aux surtensions générées. La protection des bâtiments peut être traitée par un système de protection dit « externe », permettant de capter la foudre : le paratonnerre. Les équipements électriques peuvent être protégés contre les surtensions générées, grâce aux parafoudres, aussi appelés limiteurs de surtensions [25].

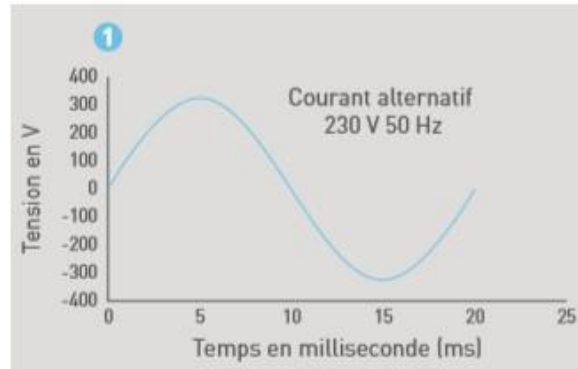


Figure II.1 : Onde de tension « normale » du réseau alternatif (exemple ici en 230V entre Phases et Neutre) [25]

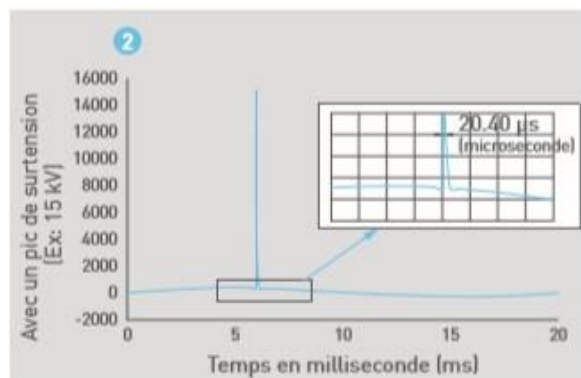


Figure II.2 : Une surtension indirecte, de type foudre, vient se superposer à la Tension du réseau. [25].

Le graphique II.2 représente l'échelle de temps très brève (quelques microsecondes) de la surtension. Il souligne également la forte amplitude en tension.

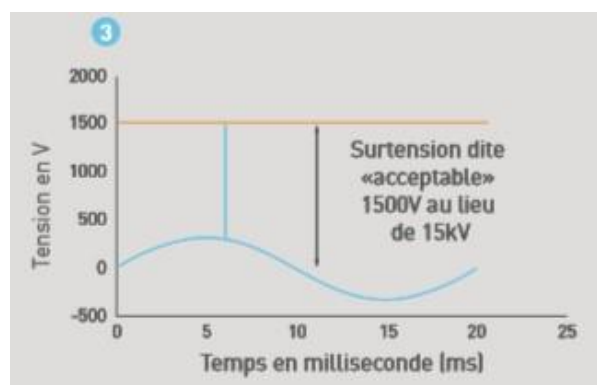


Figure II.3 : Le parafoudre limite cette surtension à une surtension dite « acceptable ». [25].

On peut voir sur la figure précédente que la vitesse de déclenchement est ultra rapide (quelques nanosecondes) grâce à ses composants intégrés.

Le parafoudre se comporte comme un interrupteur capable de se fermer uniquement pendant la surtension. Par exemple, entre les pôles actifs et la terre sur la courte période de surtension, l'impédance devient très faible et se traduit par un fort courant de décharge selon la simple loi d'Ohm : surtension $U = I \times Z$ impédance. C'est pour cette raison que les parafoudres ont des capacités d'écoulement souvent exprimées en kA. Les parafoudres sont alors installés en tête d'installation entre les pôles actifs du circuit de puissance et la terre. Lorsque la tension est normale, le parafoudre ne laisse passer aucun courant [25].

Les normes d'installation NF C 15-100 et le guide UTE C 15-443 préconisent la présence d'une protection différentielle en amont des parafoudres de type CT1 et de type CT2 à technologie éclateur sur le neutre qui ne satisfont pas les exigences de tenue aux tensions de défaut (TOV). Cette protection doit avoir une immunité aux chocs de foudre de minimum 3 kA, et peut être préférentiellement de Type S [25].

En cas de contraintes électriques fortes, certains parafoudres n'ont pas besoin de protection différentielle en amont. Ce sont obligatoirement des parafoudres de configuration de type CT2 à technologie éclateurs sur la branche Neutre/Terre dont la tenue aux tensions de défaut est renforcée. Tous les parafoudres 1P+N et 3P+N de la série réf. 4 122 XX peuvent être mis en œuvre sans protection différentielle en amont [25].

II.1.3 Protection contre les courants de fuite et décharges statiques

En principe, toutes les masses métalliques (cadres des modules photovoltaïques, structures, mât, carcasses métalliques des appareils...) doivent être interconnectées (équipotentialisées) et reliées à la terre. Ceci s'effectue au moyen de conducteurs de terre 10mm² V/J, raccordés au répartiteur, puis au piquet de terre [19].

II.1.4 Protection contre les défauts d'isolation côté AC

Les appareils alimentés en AC par le convertisseur sont susceptibles de présenter des défauts d'isolation dangereux pour les utilisateurs (risque d'électrocution). Ces appareils sont en général munis d'une prise mâle « 2+T », qui comporte donc une fiche de terre destinée à évacuer les défauts d'isolation vers la terre. Il y a donc lieu, lors de la réalisation du circuit électrique domestique, de prévoir des prises murales femelles 2+T adéquates, afin de pouvoir ramener ces défauts à la terre par la barrette d'équipotentialisation et le piquet de terre [19].

II.1.5 Protections contre les courts-circuits

Pour protéger un circuit électrique nous pouvons utiliser soit un disjoncteur thermique pour des surcharges des longues durées ou soit un disjoncteur magnétique pour des court-circuit ou soit encore par fusible dont le calibrage se diffère seulement de l'indice k.

$$I_{\text{disjoncteur}} = I_{\text{total}} * k \quad (3.1)$$

k = 1,15 pour un disjoncteur thermique

k = 1,05 pour un disjoncteur magnétique

k = 1,1 pour un fusible

Comme dans un disjoncteur magnétothermique les deux types de protections y sont inclus, nous allons l'utiliser au courant de notre protection.

1.5.4.2 Court-circuit entre panneaux et batteries

Interrupteur sectionneur :

Est une combinaison de deux commandes dont un interrupteur classique d'une part et un sectionneur d'autre part. Ce dernier sert de commande manuelle pour pouvoir isoler un circuit déjà coupé. Il a pour but de sécuriser une installation électrique[26] [27].

$$I_{\text{calibre sectionneur}} = 1,25 * I_{\text{cc}} * N_{\text{strings}} \quad (3.2)$$

Avec : I_{cc} : Le courant en ampère

Disjoncteurs PV :

Ils sont obligatoires et doivent être dimensionner en fonction des modules suivant la formule suivante [28]:

$$1,1 * 1,45 * I_{\text{cc}} < I_{\text{calibre fusible}} < I_{\text{FS}} \quad (3.3)$$

$$1,1 * 1,45 * I_{\text{cc}} < I_{\text{calibre disjoncteur}} < I_{\text{FS}} \quad (3.4)$$

Avec : I_{RM} : courant de fusible en série ou courant de retour maximum admissible par le module en ampère (où I_{RM} , et I_{cc} sont décrits dans la fiche technique des modules solaires voir dans le tableau II.3)

- **Les interrupteurs-disjoncteurs DC**

Ces appareils doivent être en mesure d'assurer, sur commande manuelle ou sur défaut (masse, court-circuit), le sectionnement complet du circuit électrique côté courant continu en charge

(c'est-à-dire sous tension), ce qui signifie qu'ils doivent être capables de supprimer totalement l'arc électrique produit à l'ouverture (ce qui peut ne pas être le cas des interrupteurs-disjoncteurs à courant alternatif pourtant encore couramment utilisés dans les installations solaires en site isolé) [19].

- **Position et calibrage**

L'interrupteur-disjoncteur DC du champ solaire : il se place à l'entrée « solaire » du régulateur. Il doit être calibré à une valeur légèrement supérieure à l'intensité de court-circuit du panneau ou du champ solaire. Il n'a pas de fonction de sécurité, puisqu'il ne réagira pas à la mise en court-circuit des panneaux, mais par contre est très utile pour couper l'alimentation solaire lors des contrôles ou de la maintenance.

L'interrupteur-disjoncteur DC du régulateur : il se place à la sortie « batterie » du régulateur, et protège celui-ci contre le courant de la batterie en cas de défaut. Il doit être calibré à la même valeur que l'intensité maximale à la sortie « consommateur », mais peut, s'il n'y a pas de consommateur connecté à cette sortie, être calibré à la même valeur que l'interrupteur-disjoncteur d'entrée du régulateur.

L'interrupteur-disjoncteur DC des consommateurs : se place à la sortie « consommateurs » du régulateur et permet d'isoler le circuit consommateur en cas de défaut, d'intervention ou de maintenance, sans couper en même temps la charge solaire de la batterie [19].

- **Le fusible DC**

Celui-ci est destiné à protéger l'entrée DC du convertisseur. Bien souvent, ces derniers possèdent déjà un fusible interne, mais peu accessible, et comme il n'est pas recommandé d'ouvrir ces appareils en cas de défaut, il vaut mieux placer un fusible externe à l'entrée CC. Il doit être calibré à la valeur maximum du courant d'entrée, exprimé en Ampère (A) du convertisseur, soit $I(A) = P(W) / U(V)$ [19].

II.2 Procédure de maintenance des panneaux solaires [13] :

- Nettoyez avec de l'eau, tôt le matin ou tard le soir (évitez savon ou détergents).
- Vérifiez si le panneau est toujours fixé, orienté et incliné correctement.
- Vérifiez d'éventuelle décoloration de cellules, bris de vitres ou corrosion des connections entre cellules.

- Vérifiez l'absence d'ombre portée (ex : nouveau bâtiment, arbre ayant poussé, antenne TV).
- Vérifiez si l'arrière du panneau n'est pas encombré de nids d'oiseaux ou d'insectes, enlevez-les dans tous les cas.
- Vérifiez si la ou les boîtes de jonction sont bien étanches. 7. Dans le cas où le support du module est relié à terre vérifiez sa continuité depuis le module jusqu'au piquet de terre.
- Resserrez toutes les connexions.

Le courant produit par les strings du générateur est acheminé vers la boîte de connexion du générateur par la ligne de branches ou de strings. En plus de fusibles des branches (utilisés à la place de diodes de strings car ces derniers sont de moins en moins utilisés de nos jours), nous retrouvons des dispositifs de connexion de branches coté continu (DC Disconnect) permettant de déconnecter un string du générateur de l'installation. Les deux varistors protègent contre les surtensions d'origine naturelle, par exemple la foudre. La norme DIN VDE 0100-712 développée pour les centrales solaires recommande l'utilisation d'un dispositif de déconnexion (Main switch) pour assurer une déconnexion en toute sécurité du générateur à l'onduleur [24]

II.2.1 Placement et connexion des panneaux

Le fabricant fournit souvent des instructions pour la fixation des panneaux à la structure. Des vis en acier inoxydable sont normalement utilisées.

ATTENTION : Ne pas perforer le cadre du panneau afin de ne pas briser le verre protecteur des cellules.

S'il y a des vols habituellement, les panneaux peuvent être fixés d'une manière très difficile à désassembler. Cela complique aussi des possibles réparations.

Les panneaux peuvent être connectés en parallèle ou en une combinaison de série-parallèle si on souhaite une tension de travail supérieure à celle fournie par un seul panneau [13].

Les points les plus importants à tenir en compte sont :

- Tous les panneaux doivent être le même modèle (c'est-à-dire, ils doivent être de la même marque et de la même caractéristique de courant-tension). Si la caractéristique

fournie par le fabricant n'est pas la même, les panneaux se rangeront par courant de court-circuit.

- La pose des câbles et les connexions doivent résister aux conditions d'intempérie et humidité (il est nécessaire que les câbles soient couverts par un matériel résistant et que les connexions se fassent avec des cosses). Il faut aussi protéger les câbles de la lumière solaire. Les câbles ne peuvent pas être enroulés autour d'une vis.

Les cosses sont normalement localisées à l'arrière des panneaux. Si on travaille avec des bornes, il est nécessaire d'utiliser des caches en caoutchouc. Parfois il y a une boîte de connexion à l'arrière du panneau où les cosses sont placées [13].

ATTENTION : Les panneaux disposent souvent d'une troisième borne qui permet la connexion des diodes de passage (afin d'éviter le « point chaud »). Il est nécessaire de respecter la polarité des diodes [13].

II.2.2 Maintenance des batteries

Maintenir l'endroit où les batteries sont placées à une température d'entre 15 et 25 degrés. Le froid ralentisse les opérations de charge et de décharge. Par ailleurs, la chaleur augmente l'évaporation de l'eau de l'électrolyte et promeut l'oxydation des plaques positives [13].

- Dans la mesure du possible, fixer bien les batteries, en évitant leur mouvement.
- Maintenir les bornes de connexion propres, serrés (pas en excès) et le boîtier de la batterie sèche.
- Maintenir le niveau d'électrolyte approprié, en ajoutant de l'eau distillée en cas de besoin et en évitant laisser les plaques à l'air et le remplissage excessif qui provoque le débordement de l'électrolyte.
- Vérifier qu'il n'y a pas de différences de charge entre les différentes cellules de la batterie et, si c'était le cas, effectuer une charge de nivellement.

Une proposition de plan d'action :

- Mesure de la densité chaque semaine
- Contrôle du niveau de l'électrolyte, en le remplaçant par de l'eau distillé si nécessaire
- Si la batterie n'est pas en cours d'utilisation, charger et décharger bi-semestriellement
- Vérification de la tension trimestriellement

- Nettoyage des bornes et de la batterie après chaque inspection

Il est essentiel de placer les batteries dans un habitacle protégé, à l'intérieur. Cela bénéficie aussi le rendement de la batterie car il dépend en grande partie de la température ambiante. La température idéale de travail est environ 20°C. Quelques conditions pour le placement des batteries sont énoncées ci-dessus [13]:

- Accès facile pour l'assemblage et la maintenance
- Vérification du type de batterie
- Placement de la batterie le plus près possible des panneaux (afin de minimiser les coûts des câbles et les chutes de tension).
- Placement de la batterie dans un lieu sec (l'élimination de l'humidité retarde la corrosion des éléments métalliques) et aéré (à cause des gaz)
- Placement de la batterie dans une lie thermiquement isolé afin d'éviter les différences de température
- Il est important de placer les batteries sur une structure résistante à l'électrolyte pour les isoler du sol.

II.2.3 Maintenances des régulateurs

Les régulateurs et les autres systèmes de contrôle s'installent, dans la mesure du possible, dans la même cabine que les batteries, pour réduire le câblage du courant continu, étant donné que le coût de celui-ci est particulièrement élevé. Les exigences de montage sont les suivants [13]:

- Les pôles positifs et négatifs de toutes les prises de courant doivent être clairement identifiés.
- Un interrupteur magnétothermique d'ampérage approprié doit être installé pour protéger l'installation en cas de court-circuit.
- Le système de régulation doit disposer d'un système de déconnexion de la charge.
- Si les régulateurs sont de type « shunt » ou parallèle, il convient de prévoir l'évacuation de la chaleur.
- Il faut prendre soin de l'exécution des connexions pour éviter des problèmes de maintenance.

Il est préférable de disposer de gants, d'une paire de lunettes de protection et d'une bassine d'eau pour laver d'éventuelles projections d'électrolyte.

II.2.3 Maintenance des onduleurs

Le local de l'onduleur doit être bien ventilé, de façon à permettre l'évacuation de l'énergie thermique produite par les pertes de transformation.

II.2.4 Maintenance des câbles

En ce qui concerne le câblage, il faut prendre en compte les aspects suivants [13]:

- Les câbles doivent avoir une protection appropriée contre l'intempérie.
- La pose des câbles doit respecter les normes de sécurité et d'installation en vigueur dans le pays en question (câbles de différentes couleurs selon la polarité, etc.).
- La pose doit se réaliser de sorte que le câble soit tendu mais sans efforts additionnels. Des éléments de fixation appropriés seront situés chaque 30 cm. Saisir la structure locale pour la conduction des câbles et assurer la fixation avec des agrafes et des anneaux.
- Éviter l'entrée éventuelle de l'eau via des tubes dans le mur et des boîtes résistants à l'intempérie au moment de passer les câbles à travers les murs.
- Les raccords entre conducteurs se font via des boîtes de connexion.

Pour son usage, la connexion entre les différents éléments de l'installation se fait de la manière suivante [13]:

1. Régulateur vers la batterie
2. Panneau vers régulateur
3. Consommations vers régulateur
4. La déconnexion se fait dans le sens inverse

En plus, il est recommandé de réaliser les mesures suivantes [13]:

- Mesures initiales dans les bornes du régulateur. Vérifier la valeur des tensions dans les différents éléments de l'installation.
- Mesures intermédiaires dans les extrémités des lignes qui finissent dans les consommations. Vérifier les valeurs de la tension dans les prises de courant, etc.
- Mesures finales. Vérifier le bon fonctionnement des équipements de consommation.

CONCLUSION PARTIELLE

Ce chapitre était basé sur la protection et la maintenance des équipements constitutifs de notre système PV qui nécessite un entretien et une maintenance minimales mais indispensables. Un petit entretien de nettoyer les modules, vérifier l'absence d'ombres portées sur les modules, etc. On doit s'assurer que ces tâches sont à la portée de l'utilisateur et qu'elles sont effectuées correctement et régulièrement.

Un autre entretien concerne la maintenance plus poussée qu'on doit effectuer en tant que technicien qualifié et équipé d'outils appropriés. Il s'agit de vérifier les principaux composants du système, les équipements de protection, ...

CHAP. III : CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT D'UNE CENTRALE PHOTOVOLTAÏQUE

III.1 INTRODUCTION

Pour réaliser ce travail portant sur les ressources solaires, on peut consulter une base de données climatique dont on obtient les valeurs du rayonnement sur la zone d'étude. Nous utiliserons principalement une base de données : RETScreen Expert, en fonction de la localisation [30].

Ce chapitre présente le concept d'énergie solaire récupérable, la définition des modules photovoltaïque, dimensionnement du stockage, dimensionnement du régulateur, et enfin le plan de câblage.

III.2 PRÉSENTATION DU SITE D'INSTALLATION

Notre travail s'effectue dans l'un des campus de l'Université Libre des Pays des grands lacs (ULPGL/GOMA) précisément le campus Salomon situé en République Démocratique du Congo (RDC), province du Nord-Kivu, ville de Goma.

D'après les données de Google Earth, la ville de Goma se situe à $1^{\circ} 41' 36''$ Sud et $29^{\circ} 13' 31''$ Est [15].

Tableau III.1 Présentation des données météorologiques de l'année 2016 de la ville de Goma [31]

Mois	Température de l'air	Humidité relative	Rayonnement solaire quotidien-horizontale	Pression atmosphérique	Température du sol
	°C	%	Wh/m ² .j	Kpa	°C
Janvier	18,8	73,6	4,90	81,35	19,85
Février	19,2	71,4	5,17	81,34	20,28
Mars	19,3	73,9	5,03	81,32	20,32
Avril	18,7	79,1	4,93	81,34	19,56
Mai	18,1	79,7	4,80	81,44	18,79
Juin	17,8	71,6	4,81	81,53	18,36
Juillet	18,0	64,0	4,90	81,53	18,52
Aout	18,9	62,4	4,92	81,50	19,70
Septembre	19,2	66,1	5,00	81,44	20,23
Octobre	18,9	72,1	4,69	81,38	19,85
Novembre	18,5	75,9	4,64	81,34	19,49
Décembre	18,5	75,4	4,69	81,35	19,58
Annuel	18,7	72,094	4,8712	81,4055	19,5396

III.3 DIMENSIONNEMENT DES COMPOSANTS

« Dimensionner », c'est fixer la « taille », les caractéristiques optimales de chaque élément d'un système dont on connaît la configuration.

La méthode de dimensionnement consiste à déterminer d'abord la puissance crête qui fournit l'énergie électrique nécessaire pendant le mois le moins ensoleillé. Elle consiste à déterminer le moment où l'on a besoin d'électricité, et à mesurer la consommation.

III.3.1 ÉVALUATION DES BESOINS JOURNALIERS

Il s'agit d'estimer la consommation d'équipements supposés connus. L'objectif est d'obtenir la consommation totale moyenne par jour et par période (saison sèche et saison de pluie)

L'énergie totale moyenne nécessaire chaque jour E (Wh/j) est la somme des consommations énergétiques des divers équipements constituant le système à étudier, à savoir les lampes d'éclairage, les appareils électroniques, etc.... ; Elle est donnée par la formule suivante :

$$E_T = \sum_i E_t \quad (3.1)$$

Comme nous l'avons précisé dans l'introduction, notre travail portera sur le dimensionnement d'un système PV pour les auditoires pour faciliter aux étudiants de bien suivre les cours. Nous avons estimé dans le tableau II.2 les besoins moyens en termes d'électricité d'un auditoire consommant peu d'énergie ; ensuite dans le tableau II.3, nous avons estimé les besoins d'un auditoire consommant plus d'énergie.

Tableau III.2 : Estimation de besoins journaliers d'un auditoire consommant moins d'énergie

Charges	Nombres	Puissance de charge en [W]	Nombre d'heure d'utilisation en [h]	Énergie totale en [Wh]	Puissance en [W]
Ordinateur	40	90	8	28800	3600
Chargeur téléphone	40	10	8	3200	400
Vidéo projecteur	1	200	8	1600	200
Lampe	4	1	8	32	4
Total				33632	4204

Tableau III.3 : Estimation de besoins journaliers d'un auditoire consommant plus d'énergie

Charges	Nombres	Puissance de charge en [W]	Nombre d'heure d'utilisation en [h]	Énergie totale en [Wh]	Puissance en [W]
Ordinateur	500	90	8	360000	45000
chargeur téléphone	500	10	8	40000	5000
Vidéo projecteur	1	200	8	1600	200
Baffle	6	60	8	2880	360
Lampe	25	1	8	200	25
Total				404680	50585

L'énergie partielle totale E_1 sera obtenue en faisant la moyenne de l'auditoire consommant plus d'énergie et celui consommant peu d'énergie.

$$\text{Soit } E_1 = \frac{33632+404680}{2} = 219\ 156\ \text{Wh}$$

Pour le moment, nous avons évalué le nombre d'auditoires que peuvent occuper les étudiants au sein du campus Salomon à 34. On peut donc obtenir l'énergie totale consommée par ces auditoires en appliquant la formule.

$$\text{Soit } E_2 = E_1 \times 34 = 7451304\ \text{Wh}$$

Pour l'éclairage de notre centrale et de nos trois couloirs (les couloirs de la faculté des sciences et des technologies appliquées, droit et celle d'économie) on peut ajouter à notre puissance cette consommation qui est :

- 96 lampes LED de 1W pendant 8heures = 986 Wh pour les couloirs
- 4 lampes LED de 1W pendant 14heures = 56 Wh pour notre centrale

$$E_T = E_2 + 986\ \text{Wh} + 56\ \text{Wh} = 7452346\ \text{Wh}$$

III.3.2 DIMENSIONNEMENT DU SYSTÈME PV

L'énergie récupérable dépend de :

- l'orientation et l'inclinaison des modules ;
- les conditions météorologiques ;
- les ombrages

On définit la puissance crête de l'installation photovoltaïque comme la consommation énergétique quotidienne prévue divisée entre les heures solaires crêtes et entre la performance attendue du panneau.

$$P_c = \frac{E_j}{0,65 \cdot E_i} = \frac{E_p}{E_i} \quad (3.2)$$

Soient :

E_j [kW.h/j] : l'énergie moyenne journalière nécessaire pour le fonctionnement des équipements en courant continu

E_i [kWhm⁻² · j⁻¹] : irradiation journalière (minimale) du milieu (4.64 à Goma)

E_p [kWh/j] : Énergie à produire $E_p = E_j / 0.65$

P_c [Wc] : puissance crête des modules (conditions STC 1000W/m², 25°C, AM1,5)

Cette formule est utilisable pour un système PV fonctionnant sur batteries comme le nôtre. Pour un système à usage au « fil du soleil », sans batteries, le coefficient 0.65 doit être remplacé par 0.75.

$$P_c = \frac{7452346}{0,65 \times 4,64} = 1027909,79 \text{ Wc}$$

III.3.2.1 Caractéristiques du générateur PV

Nous utiliserons des panneaux PV avec des cellules au silicium monocristallin compte tenu de leur rendement des cellules commercialisées de 14 à 16%, leur procédé de fabrication bien maîtrisé et pour leur très bonne tenue de l'efficacité sur la durée.

La fiche ci-dessous nous présente les données techniques du module photovoltaïque que nous allons utiliser dans le nôtre champ photovoltaïque.

Tableau III.4 : les caractéristiques du module photovoltaïque [32]

Données	Valeur
Puissance nominale	400W
Tolérance / tri positif	+0 / 5W
Rendement du panneau	20,8%
Type de cellule	Silicium monocristallin
Taille des cellules	120pcs (demi-coupe)
Voltage Mpp	34,2V
Intensité Mpp	11,70A
Intensité de court-circuit	12,28A
Voltage circuit ouvert	41,02V
Garantie	15ans
Test STD	AM1.5, 25°C, 1000W/m ²
Tension max	1500V DC
Taille(Longueur × Largeur × Hauteur)	1754 × 1096 × 30 mm
Cadre	30mm Alliage aluminium anodisé
Poids	21Kg
Garantie de puissance	25 ans à 85%
Diodes anti-retour	3
Boitier de jonction	Étanche IP68 : câbles AWG 1,2 mètre et connecteurs MC4
Température d'utilisation	-40°C + 80°C
Fusible en série	25,6 A
Qualité de fabrication	Cadre alliage aluminium Feuille de EVA/POE Verre anti-reflet trempé transparent Film TPT(tedlar, polyester, tedlar)

Il est bon de majorer cette énergie du module par un coefficient de majoration ou facteur de correction qui tient compte de l'angle d'inclinaison du module et de la position géographique compte tenue des variations météorologiques d'après le tableau ci-dessous

Tableau III.5 : facteur de correction d'un module [33]

Orientation/Inclinaison	0°	30°	60°	90°
Est	0,93	0,90	0,78	0,55
Sud-est	0,93	0,96	0,88	0,66
Sud	0,93	1,00	0,91	0,68
Sud-ouest	0,93	0,96	0,88	0,66
Ouest	0,93	0,90	0,78	0,55

Comme on l'a précisé dans la présentation du site d'installation, le campus Salomon se situant dans la ville de Goma est dans l'hémisphère sud avec les coordonnées 1° 41' 36" Sud (Latitude) et 29° 13' 31" Est (Longitude). Nos modules PV seront orientés vers le nord vu que notre site est dans l'hémisphère sud (Cas de la ville de Goma).

L'inclinaison des modules PV pour un fonctionnement toute l'année se fera avec la méthode = latitude + 10°. Avec la latitude de 1° pour la ville de Goma l'implantation sera de « 11° Sud ».

Notre angle d'inclinaison étant proche de 0°, ainsi pour un module dont la puissance crête est de $P_c = 400 \text{ Wc}$, pour $K = 0,93$ la puissance perdue par un module est :

$$P_{perdue} = \text{Puissance crête pour un module} - P_{mod}$$

$$P_{mod} = \text{Puissance crête pour un module} \times \text{facteur de correction}$$

$$P_{mod} = 400 \text{ Wc} \times 0,93 = \mathbf{372 \text{ Wc}}$$

$$P_{perdue} = 400 \text{ Wc} - 372 \text{ Wc} = 28 \text{ Wc} \text{ Pour un module de } 400 \text{ Wc}$$

En divisant la puissance crête de tous les modules par celle d'un module on trouve le nombre de modules photovoltaïque. D'où :

$$\text{Nombre de panneaux } [N_p] = \frac{\text{Puissance crête de tous les modules PV}}{\text{Puissance crête d'un module PV}} = \frac{P_c}{400 \text{ Wc}}$$

$$N_p = \frac{P_c}{372 \text{ Wc}} \text{ (Nombre de panneaux exact avec une perte de 28 sur un module de 400 Wc)}$$

Alors le nombre de panneaux sera :

$$N_p = \frac{1027909,79 \text{ Wc}}{372 \text{ Wc}} = 2763,19 \approx \mathbf{2764 \text{ panneaux de 400Wc}}$$

Déterminons le nombre de strings que va contenir notre champ PV ;

Nous avons 2764 modules PV chacun avec une tension de 41,02 V (voir tableau II.4 montrant les caractéristiques du module photovoltaïque) que nous devons grouper en string pour avoir une tension inférieure ou égale 450 V (Tensions max de notre régulateur, voir la page ...)

En prenant 450 V/41,02 V on trouve 11 (qui est le nombre de panneaux PV par string);

Alors le nombre de string de notre champs PV est obtenu par :

$$\text{Nombre}_{string} = \frac{2764}{11} = 251,27 \approx 252 \text{ Strings}$$

Ainsi nous pouvons dire que notre champ PV sera composé de 252 strings en parallèle constitués chacun de 11 modules PV en série, cela pour garder la tension max de notre régulateur qui est de 450V.

III.3.2.2 Détermination de la surface occupée par les modules PV

Les panneaux posés pour notre installation auront tous la même puissance unitaire et les mêmes dimensions. Il nous convient de déterminer la surface que doivent occuper nos modules photovoltaïques pour mieux choisir le site. En se basant sur le tableau II.3 montrant les caractéristiques du module photovoltaïque que nous allons utiliser, nous avons :

Une longueur de 1754 mm = 1,754 m et une largeur de 1096 mm = 1,096 m

Nous savons que la surface est égale à la longueur fois la largeur ($S = L \times l$)

$$S_1 = 1,754 \text{ m} \times 1,096 \text{ m} = 1,922384 \text{ m}^2 \text{ (Surface occupée par un panneau solaire)}$$

Ayant 2764 panneaux solaire, la surface totale sera :

$$S_T = 2764 \times 1,62688 \text{ m}^2 = 5313,469376 \text{ m}^2 \approx 5314 \text{ m}^2$$

La surface que peuvent occuper nos modules PV est de 5314 m², on peut alors se servir de cette dernière pour faire le choix du site où nous pouvons déposer nos modules.

III.3.2.3 Choix du site

Les panneaux solaires produisent de l'électricité à condition qu'ils soient ensoleillés. Une surface à l'ombre offre un rendement inférieur et fera baisser la rentabilité des modules PV. Par conséquent ce n'est pas parce que nous avons un grand espace qu'il sera intégralement exploité. En effet les obstacles peuvent venir gêner la pose des panneaux ou la rendre inefficace. C'est le cas par exemple de zones ombragées (Occasionnées par exemple par la végétation, structures voisines...), des éléments déjà présents en toiture (les antennes, ...), d'une mauvaise orientation ou d'une mauvaise inclinaison, ... Nous trouvons bon de poser nos modules PV sur une armature qui servira de couverture pour les voitures sur tous les parkings du campus Salomon.

III.3.3 DIMENSIONNEMENT DES RÉGULATEURS

Le régulateur électronique dans un système photovoltaïque gère la charge et la décharge de la batterie. Il limite la tension de la batterie afin d'éviter une surcharge, en déconnectant la batterie trop chargée des modules PV. Quand la batterie est trop déchargée, il la déconnecte de l'utilisation par un disjoncteur automatique pour la protéger contre la décharge profonde. Dans un système PV, en l'absence d'un régulateur, les accumulateurs seront exposés à une perte d'eau donc un vieillissement prématuré et à la sulfatation des plaques. Le régulateur peut assurer aussi, dans un système photovoltaïque, le rôle de compensation thermique. Il est situé entre le champ de modules et les batteries accumulateurs.

Les régulateurs de charge solaire se divisent en deux catégories (les régulateurs PWM et les régulateurs MPPT). Notre choix est basé sur les régulateurs MPPT pour les raisons suivantes [34]:

- Grâce à leur micro-processeur et algorithmes de charges plus perfectionnés sont les régulateurs les plus performants à l'heure actuelle.
- Ils sont dotés des algorithmes de charge les plus perfectionnés et permettent ainsi d'atteindre les meilleures productions.
- Dotés d'un port VE.Direct ou VE.Bus, ils sont compatibles avec les différents outils de contrôle tels que le Dongle Bluetooth, le câble VE.Direct, le MPPT Control ou le Color Control GX...etc.
- Les régulateurs MPPT acceptent une tension d'entrée plus élevée (75V, 100V, 150V et jusqu'à 250V) par rapport aux PWM (23V ou 55V max) et permettent ainsi de limiter la perte par effet joule.

- Ils permettent également de charger un parc batterie 12V avec des panneaux de 24V ou plus.

Pour le dimensionnement de régulateur on tient compte du courant de court-circuit (I_{cc}) PV d'un module qu'on multiplie par un coefficient de 1,5 qui nous donne le courant d'entrée.

D'où : $I_e = 1,5 \times I_{cc}$ des PV

En se référant dans le tableau 4 montrant les caractéristiques du module photovoltaïque nous trouvons que nous avons un courant de court-circuit qui est de 12,28 A, alors :

$$I_e = 12,28A \times 1,5 = 18,42 A$$

Lors de notre choix des régulateurs, nous prendrons les régulateurs dont le courant nominal est supérieur à cette valeur. La consommation d'un régulateur doit être comprise entre 1mA et 25mA au maximum. On doit aussi vérifier que la taille des bornes soit compatible avec la section du câble de raccordement de modules PV.

Rappelons que notre système PV devra compter 2764 panneaux de 400Wc.

$$I_{total} = \frac{N_b \times W_{module\ pratique}}{U_{batterie}} \text{ (Le courant d'entrée de notre système) [35].}$$

$$I_{total} = \frac{2764 \times 400 W}{48} = 23033,333 A$$

Nous optons pour le régulateur de charge VICTRON ENERGY MPPT SMARTSOLAR RS-450V/200 48V avec les caractéristiques suivantes : [34]

- Poids : 13,7 Kg ;
- Intensité de charge max et intensité de débit max : 200A ;
- Hauteur : 434 mm ;
- Largeur : 146 mm ;
- Connexions possibles : Bluetooth, VE.Direct, VE.Can, Ecran d'affichage ;
- Garantie : 5ans ;
- Référence produit Victron Energy : SCC145120410

En faisant le rapport entre l'intensité trouvée précédemment et l'intensité max du régulateur, on trouve le nombre de régulateur : [36]

Ce qui donne :

$$N_{reg} = \frac{23033,333A}{200} = 115,167 \approx 116 \text{ régulateurs}$$

III.3.4 DIMENSIONNEMENT DES BATTERIES

Pour que les batteries aient une meilleure durée de vie, et donc une plus grande fiabilité, il est important de ne pas les décharger complètement. C'est pourquoi il est primordial de fixer une profondeur de décharge. Celle-ci diffère en fonction des modèles. Elle est comprise entre 30% et 80%. Dans notre système nous utiliserons une profondeur de décharge équivalente à 70%.

Toutes fois on peut optimiser la durée de vie des batteries en :

- Ne les déchargeant jamais complètement ;
- Limitant le courant de charge ;
- Effectuant des charges d'entretien ;
- Évitant les charges partielles répétées ;
- Maintenant les batteries à l'abri de la chaleur ;
- En entretenant régulièrement les équipements.

On considère souvent plus d'un jour d'autonomie (N_j , Nombre de jours d'autonomie variant selon le lieu géographique) en fonction de l'application. C'est-à-dire, il existe une possibilité que pendant plusieurs jours les panneaux ne produisent pas d'énergie électrique et les batteries continuent à être nécessaires.

La capacité réelle de l'accumulateur(batterie) se fait de la manière suivante :

$$C_{réelle}[Wh] = \frac{N_j * E_j}{D_p} \quad (3.3)$$

$$C_{réelle}[Ah] = \frac{N_j * E_j}{D_p * V} \quad (3.4)$$

Avec :

N_j : Nombre de jours d'autonomie

E_j : Consommation moyenne

D_p : Pourcentage de décharge profonde à 70%

V : tension aux bornes de la batterie

$$N_j * E_j = C_u = \text{Capacité utile} \quad (3.5)$$

$$C_{réelle}[Ah] = \frac{3_{jrs} * 7452346 \text{ Wh}}{0,7 * 48V} = \mathbf{665388,035 Ah}$$

Le dimensionnement du stockage est basé sur les paramètres d'un accumulateur au plomb.

Le nombre de batteries à utiliser est trouvé par le rapport suivant :

$$Nb = \frac{665388,035 Ah}{500Ah} = \mathbf{1330,776} \text{ batteries} \approx \mathbf{1331} \text{ batteries de } \mathbf{500Ah}$$

Lors de l'installation nous utiliserons les batteries de 500 Ah 2 V de VICTRON ENERGY BLUE POWER cela pour maintenir notre tension de 48 V.

III.3.5 DIMENSIONNEMENT DES ONDULEURS

Un onduleur solaire, aussi appelé régulateur ou convertisseur solaire, transforme le courant électrique continu produit par les panneaux solaires en courant alternatif pour permettre à l'électricité de circuler et d'être consommée par les différents appareils qu'on peut utiliser au quotidien, mais aussi pour l'éclairage ou le chauffage.

Bien choisir son onduleur solaire est essentiel, car il a un impact sur la production d'électricité des panneaux solaires et leur performance. En optant pour une installation connectée au réseau ou pour un système hors réseau et complètement indépendant, l'onduleur solaire est indispensable pour convertir l'énergie solaire produite par les panneaux solaires, et ainsi l'utiliser au quotidien. Il prend la forme d'un boîtier métallique de différentes tailles selon le type d'onduleur, dans lequel on retrouve différents composants électroniques avec une grille et un ventilateur pour éviter la surchauffe.

L'onduleur solaire fonctionne de manière permanente une fois qu'il a été installé et programmé. Il fait partie de l'installation en complément des panneaux solaire et permet d'intégrer des batteries de stockage de votre production électrique.

L'onduleur a pour but d'optimiser la production d'électricité d'un panneau solaire. Pour cela, il analyse en permanence le courant continu émis par les panneaux photovoltaïques, car celui-ci change continuellement en fonction de différents facteurs, comme l'ensoleillement par

exemple. Il convertit cette énergie puis la transforme en courant domestique afin d'alimenter le réseau et les appareils électriques.

Il est également équipé d'un microprocesseur qui permet de s'assurer que le courant électrique produit respecte bien les normes imposées par le gestionnaire du réseau. [21]

On doit choisir un onduleur selon plusieurs critères [21] [36]

- Son type. Il faut opter pour un type d'onduleur correspondant à son projet.
- Sa puissance nominale. Elle est exprimée en Voltampère (VA) ou en Watt (W). En pratique, il s'agit de la puissance maximale que l'onduleur peut délivrer de manière constante. Pour définir la puissance nominale dont nous avons besoin, nous devons connaître la puissance totale des panneaux solaires installés. Il faut noter que la capacité de surcharge d'un onduleur, c'est-à-dire sa capacité à supporter un fort courant d'appel pendant une période courte, est en général 1,5 fois plus élevée que sa puissance nominale.
- Courant assigné fourni ;
- La tension maximale et distorsion du facteur de puissance ;
- Le courant fourni max permettant le calcul de la contribution de l'installation PV au courant de court-circuit
- Son rendement. Il est exprimé en pourcentage et désigne la quantité de courant continu transformé en courant alternatif. Plus le rendement est élevé, plus l'onduleur solaire sera efficace et moins il y aura de perte d'énergie entre le panneau solaire et le réseau domestique. Certains onduleurs solaires ont un rendement supérieur à 95 %.
- La marque : Il existe plusieurs marques et différents modèles sur le marché. Nous allons nous prononcer sur la marque qu'on va utiliser après les calculs ci-dessous.
- Faisons le bilan de la puissance dans le tableau 2 et le tableau 3 avant de faire le choix de notre convertisseur.

$$P_1 = \frac{4204W+50585W}{2} = 27394,5W \text{ (Puissance moyenne du tableau 2 et tableau 3)}$$

$P_2 = 27394,5W \times 34 = 931413W$ (Puissance obtenue en multipliant P_1 par le nombre d'auditoire). La puissance totale P_T sera obtenue en multipliant P_2 par 1,35 qui est une constante, tenant en compte de la puissance qui sera produite par les composants de la centrale suite à leurs rendements.

$$P_T = 931413W \times 1,35 = 1257407,55W$$

Notre choix se porte sur 3 onduleurs de 500 kW stored-energy fabriqué par Shenzhen Hope Wind Co., Ltd. Avec les caractéristiques suivantes :

Tableau III.6 : données techniques et types [37]

No. De Modèle	500 kW
Entrée DC	
Garantie	5 années
Tension DC maximum	1000 V
Courant DC maximum	1100 A
Plage de tension MPPT	500-850 V
Nombre de branche MPP(T)	1
Sortie DC	
Puissance maximum	500 kW
Plage de tension AC sortie	320 V
Voltage CA maximal	380 V
Courant AC maximum	902 A
Plage de fréquence	47-63 Hz
Fréquence	50,60 Hz
Cosφ (direction de tension moyenne)	0,99
Taux de distorsion harmonique (TDH)	< 3%
Nombre de phase d'alimentation	3
Efficacité maximum	98,7%
Données générales	
Dimensions (H/L/P)	2103×2778×945 mm
Poids	1870 kg
Température d'utilisation	-30 ~ +60°C
Transformateur	Sans transformateur
Classe de protection	IP54, NEMA 3R
Humidité	0 ~ 95 %
Refroidissement	Ventilateur
Altitude maximum	6000 m

Interface	RS 485, Ethernet
Exposition	LCD

III.3.6 DIMENSIONNEMENT DES CÂBLAGES

C'est sur la partie courant continu de l'installation que les intensités sont les plus importantes, c'est donc dans cette partie que se pose le problème des pertes joules et des chutes de tensions dans les câbles.

On doit donc déterminer les sections des câbles entraînant le moins de chute de tension possible entre les panneaux et l'onduleur-chargeur, mais aussi entre les batteries et l'onduleur-chargeur.

Données complémentaires utiles :

- Chute de tension maximale entre panneaux et différents éléments de l'installation :
 $\Delta U = 2\%$
- Puissance nominale des appareils (modules PV, onduleur, charge, ...)
- Type de conducteur : Conducteurs en cuivre ($\rho = 1,6 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$)
- Distance ou longueur des câbles

Comment choisir la section des câbles entre deux éléments ?

- Connaissant la puissance, tension nominale, et la chute de tension tolérée : on peut trouver $R = \Delta U / I$
- Connaissant R , ρ et la longueur du câble, déduire sa section S de $R = \rho \times l / S$ [15]

$$S = \rho \times \frac{l}{R} \quad (3.6)$$

Avec :

- S : La section en millimètre carrée [mm^2]
- ρ : La résistivité en Ohm mètre [$\Omega \cdot m$]
- l : Longueur du câble en mètre [m]
- R : Résistance en [Ω]

En ce qui concerne les câblages, le dimensionnement des sections de câble est un point crucial à prendre en compte lors du dimensionnement de notre site autonome. En effet un câble mal

dimensionné pourrait générer divers problèmes tels que la surchauffe pouvant aller jusqu'à l'incendie, une production dégradée de la part de nos modules photovoltaïques, etc. [38]

Il convient de réduire les chutes de tension en respectant les valeurs maximales [38] :

- 2,5% entre le champ solaire et local technique (dans le cas de régulateurs standard la prise en compte de la chute de tension est un paramètre critique).
- 3% entre la batterie et le local technique
- 3% entre la batterie et la partie alternative.

La section du câble devient vite très importante et donc son prix aussi. Il est par conséquent, nécessaire de faire un compromis entre un cout raisonnable du câble, et les pertes en ligne (afin de ne pas sur-dimensionner le panneaux) [30].

- **Section de câbles entre les modules PV et les régulateurs**

Prenons une longueur de 30m ;

$$S = \rho \times \frac{l}{R}$$

$$\rho = 1,6 \times 10^{-8} \Omega \cdot m \text{ (Câble en cuivre)}$$

Nous savons qu'en série le courant reste le même puis les tensions s'additionnent ;

Rappelons que nous avons un champ PV ayant 116 strings en parallèle constitués chacun de 24 modules PV en série.

$$I = 12,28 \text{ A} \times 116 = 1424,48 \text{ A}$$

La chute de tension dans une chaîne est $\Delta U = (41,02 \times 24) \times 0,025 = 24,612$ (2,5% entre le champ solaire et local technique dans le cas de régulateurs standard)

$$R = \Delta U / I = 24,612 / 1424,48 \text{ A} = 0,017277883$$

$$S = (1,6 \times 10^{-8} \times 30) / 0,017277883 = 2,778 \times 10^{-5} \text{ m}^2 = 27,78 \text{ mm}^2$$

La Section normalise choisie pour les deux fils (positif et négatif) est de **35 mm²**.

- **Section de câbles entre les régulateurs et les batteries**

Prenons une longueur de 5m ;

$$I = 12,28 \text{ A} \times 116 = 1424,48 \text{ A}$$

$$\Delta U = (41,02 \times 24) \times 0,03 = 29,5344 \text{ (3\% entre la batterie et le local technique)}$$

$$R = \Delta U / I = 29,5344 / 1424,48 \text{ A} = 0,020733468$$

$$S = (1,6 \times 10^{-8} \times 5) / 0,020733468 = 3,858 \text{ mm}^2$$

La Section normalise est de **2 × 4 mm²**

- **Section de câbles entre les batteries et la partie alternative**

Prenons une longueur de 5m ;

$$I = 12,28 \text{ A} \times 116 = 1424,48 \text{ A}$$

$$\Delta U = (41,02 \times 24) \times 0,03 = 29,5344 \text{ (3\% entre la batterie et le local technique)}$$

$$R = \Delta U / I = 29,5344 / 1424,48 \text{ A} = 0,020733468$$

$$S = (1,6 \times 10^{-8} \times 5) / 0,020733468 = 3,858 \text{ mm}^2$$

La Section normalise du câble choisi est de **2 × 4 mm²**.

III.3.7 Dimensionnement des dispositifs des protections

III.3.7.1 Court-circuit entre panneaux et batteries

A. Interrupteur sectionneur :

$$I_{\text{calibre sectionneur}} = 1,25 * I_{\text{cc}} * N_{\text{strings}}$$

Avec : I_{cc} : Le courant en ampère

N_{strings} : Nombre des modules solaires = 2763 panneaux de 400 Wc

Lors de dimensionnement des régulateurs nous avons trouvés un courant total de 23033,333 A que peut débité les panneaux solaires à nos batteries.

A cela on peut appliquer la formule (3.2) avec notre $I_{\text{cc}} = 12,28 \text{ A}$

$$AN : I_{\text{calibre sectionneur}} = 1,25 * 12,28 \text{ A} * 2763 = 42412,05 \text{ A}$$

Nous pouvons utiliser un disjoncteur de 50 kA qu'on peut trouver dans le catalogue [28].

B. Disjoncteurs

Avec $I_{cc} = 12,28 \text{ A}$ et $I_{RM} = 25,6 \text{ A}$ (Voir tableau II.3)

$$AN : 1,1 * 1,45 * I_{cc} < I_{\text{calibre fusible}} < I_{FS}$$

$$1,1 * 1,45 * 12,28 \text{ A} < I_{\text{calibre fusible}} < 25,6 \text{ A}$$

$$19,5866 \text{ A} < I_{\text{calibre fusible}} < 25,6 \text{ A}$$

Pour trouver la valeur du courant total débiteur par tous les modules PV, nous devons multiplier ces valeurs par N_{strings} , on obtient :

$$19,5866 \text{ A} * 2763 \text{ panneaux} < I_{\text{calibre fusible}} < 25,6 \text{ A} * 2763 \text{ panneaux}$$

$54117,7758 \text{ A} < I_{\text{calibre fusible}} < 70732,8 \text{ A}$, la valeur du calibre de fusible doit être comprise entre $63 \text{ kA} < I_{\text{calibre fusible}} < 72 \text{ kA}$ valeurs normalisées. En fin d'assurer une bonne protection des modules nous devons faire un bon choix du fusible de sorte que ses valeurs normalisées choisies ne soient plus à l'extérieur de cette marge [27] [29].

Par la formule (3.4) nous écrire que $1,1 * 1,3 * I_{cc} < I_{\text{calibre disjoncteur}} < I_{FS}$

Avec $I_{cc} = 12,28 \text{ A}$ et $I_{RM} = 25,6 \text{ A}$

$$AN : 1,1 * 1,3 * 12,28 < I_{\text{calibre disjoncteur}} < 25,6 \text{ A}$$

$$17,5604 < I_{\text{calibre disjoncteur}} < 25,6 \text{ A}$$

En multipliant ces valeurs par N_{strings} pour trouver la valeur du courant total débiteur par tous les modules, on obtient :

$$17,5604 * 2763 < I_{\text{calibre disjoncteur}} < 25,6 \text{ A} * 2763$$

$$48519,3852 \text{ A} < I_{\text{calibre disjoncteur}} < 70732,8 \text{ A}$$

Les valeurs normalisées du disjoncteur doivent être comprise entre $57 \text{ kA} < I_{\text{calibre fusible}} < 72 \text{ kA}$ en fin d'assurer une bonne protection des modules [27] [29].

III.4 Estimation du coût de l'ensemble de l'installation

Notre travail étant un projet, nous sommes obligés de faire une approximation du coût qu'il peut prendre. Le tableau ci-dessous montre le coût estimatif de notre projet.

Tableau III.7 : Estimation du coût de l'ensemble de l'installation

Num	Matériels	Caractéristiques	Quantité	Prix unitaire	Prix total
1	Panneaux solaires	400 Wc	4422	300 \$	1326600
2	Régulateurs	200 A	116	2735 \$	317260
3	Batteries	500 Ah 2 V	2329	3350 \$	7802150
4	Convertisseurs	500 kW	3	85 000 \$	255000
5	Parafoudre	20 kA	1	170 \$	170
6	Sectionneur	50 kA	1	1000 \$	1000
7	Disjoncteur thermique	70 kA	1	1135 \$	1135
8	Disjoncteur thermique	65 kA	1	1055 \$	1055
9	TOTAL				9704370 \$

Notons que l'estimation du coût de l'ensemble de l'installation ne contient pas la main d'œuvre, le coût de l'armature et celui des câbles vus que notre champ sera subdivisé sur les parkings du campus Salomon et les distances entre les parkings n'ont pas fait notre objet d'étude.

III.5 CONCLUSION PARTIELLE

Dans ce chapitre nous avons fait le dimensionnement de chaque composant constituant notre système photovoltaïque entre autres les modules PV, les régulateurs, les batteries, l'onduleur et les sections de câbles. La puissance établie à la base était la puissance utile pour faire fonctionner le système avec ses différents composants.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail a fait objet de dimensionnement d'un champ photovoltaïque, sa protection et sa maintenance. Le campus Salomon étant dans la ville de Goma où l'électricité n'est pas encore en permanence fait face à un manque d'énergie électrique dans les auditorios depuis plusieurs années ; ce qui a toujours été un problème pour un bon déroulement des cours.

Cela nous a poussé à faire recours à la production d'énergie électrique à partir du rayonnement solaire, choix qui répond favorablement au contexte actuel de la lutte contre la pollution et le réchauffement climatique.

Dans la première étape de notre travail nous avons évalués une énergie totale de **7452346 Wh** consommée par tous nos auditorios pendant 8h, et cette énergie nous amené à trouver la puissance crête qui est de **1027909,79 Wc**.

Ainsi notre système aura :

- Un champs photovoltaïque constitué de **2764** panneaux de **400 Wc** ayant chacun 12,28 A, 41,02 V ,... qui seront installés sur une surface de 5314 m². Notons que nous choisis de poser nos modules PV sur une armature qui servira de couverture pour les voitures sur tous les parkings du campus Salomon ;
- **116** régulateurs de charge VICTRON ENERGY MPPT SMARTSOLAR RS-450V/200 48V ;
- **2329** batteries **de 500 Ah 2 V** de VICTRON ENERGY BLUE POWER cela pour maintenir notre tension de 48 V ;
- **3** onduleurs de 500 kW stored-energy fabriqué par Shenzhen Hope Wind Co., Ltd.
- **30** mètre de fils électrique de **2 × 35 mm²** de section de câbles entre les modules PV et les régulateurs
- **10** mètre de fils électrique de **2 × 4 mm²** de section de câbles entre les batteries et la partie alternative et entre les régulateurs et les batteries

Pour la protection de tous ces équipements et du personnel nous avons fait usage du parafoudre, de la mise à la terre, protection contre les courants de fuite et décharges statiques, protection contre les défauts d'isolation côté AC, ...

Nous avons utilisés un disjoncteur de 50 kA pour la protection du Court-circuit entre panneaux et batteries, un disjoncteur variant entre $63 \text{ kA} < I_{\text{calibre fusible}} < 72 \text{ kA}$ en fin d'assurer une bonne protection des modules PV et après nous avons vu les procédures et maintenances de notre système PV.

Ce travail a été clôturé par l'estimation du coût de l'ensemble de l'installation et nous avons trouvés un montant de neuf millions sept cents quatre mille cents soixante-dix dollars américains.

Nous osons, par ce travail répondre favorablement aux différents problèmes que faisait face notre campus, l'électrification, l'amélioration des conditions d'étude des étudiants et apporter un document important à l'utilisation des énergies renouvelables.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. Bernard, station solaire autonome pour l'alimentation station pompage, l. o. pluridisciplinaire, Éd., HAL , 2006.
- [2] A. H. a. e. M. BOUKADOUM, performance et cout des systèmes de pompage PV en ALGERIE, 2005.
- [3] T. Report, «EVALUATION DES BESOINS EN TECHNOLOGIES ET PLANS D' ACTIONS TECHNOLOGIQUES POUR L'ATTENUATION DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES,» Mali.
- [4] F. & R. MONTLOIN, Installations Photovoltaïques dans l'habitat isolé, EDISUD, 1983.
- [5] «clicours,» [En ligne]. Available: <https://www.clicours.com/generalites-sur-les-systemes-photovoltaiques/>. [Accès le 25 Novembre 2022].
- [6] B. .Equer, Le pompage photovoltaïque manuel de cours, énergie solaire photovoltaïque, ellipses, 1993 .
- [7] T. E. J .Royer, Le pompage photovoltaïque manuel de cour a l'intention des ingénieurs et techniciens, bibliothèque national de CANADA , 1998.
- [8] «Wikipedia,» [En ligne]. Available: <fr.m.wikipedia.com>.
- [9] M. Hamza, Mémoire de Master : Dimensionnement technique d'une installation photovoltaïque de 300kw, Algérie: UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES , 2017.
- [10] B. Djamil, Mémoire Pour l'obtention du Diplôme de magister en électrotechnique : Optimisation d'un systeme d'energie photovoltaïque applicatiou au pompage, 2017.
- [11] «Youmatter,» [En ligne]. Available: <www.youmatter.com>.

- [12] PACER, Centrales photovoltaïques : Guide pour le dimensionnement et la réalisation des projets à l'usage des bureaux d'ingénieurs, 1996.
- [13] F. I. I. p. e. desarrollo, Manuel de formation pour l'Installation et la Maintenance de petits systèmes photovoltaïques, SunEdison.
- [14] S. T. ALLOGANVINON, Memoire de Master en énergie : Conception d'une mini-centrale photovoltaïque pour l'alimentation partielle de l'installation électrique du ministere du travail et de la fonction publique (mtfp) du benin, BENIN, 2011-2012.
- [15] P. D. t. O. B. MUSHAGE, Notes de cours Centrales et Réseaux Electriques.
- [16] Libro de Ingeniería sin fronteras.
- [17] Libro de Ingeniería sin fronteras.
- [18] M. D. Muneza, TFC : Etude et dimensionnement d'une installation PV envue de l'alimentation de trois laboratoires à la FTSA/ULPGL Goma en énergie électrique, Goma: ULPGL Goma, 2016-2017.
- [19] «ecolodis-solaire,» [En ligne]. Available: <https://www.ecolodis-solaire.com/conseils/cablage-et-securite-d-une-installation-photovoltaique-en-site-isole-les-dispositifs-de-securite-40>. [Accès le 29 Novembre 2022].
- [20] R. n. Canada, Introduction aux systèmes photovoltaïques, 2001.
- [21] «mypower.engie,» [En ligne]. Available: <https://mypower.engie.fr/energie-solaire/conseils/fonctionnement-onduleur-solaire.html>. [Accès le 26 Novembre 2022].
- [22] H.Yotto, Mémoire fin d'études Master : Etude et conception d'une mini centrale PV, Bénin, 2011.
- [23] «photovoltaïque.info,» [En ligne]. Available: <https://www.photovoltaïque.info/fr/realiser-une-installation/choix-du-materiel/fonctionnement-et-categories-des-onduleurs-photovoltaïques/rendement-et-performance-des-onduleurs/>. [Accès le 26 Novembre 2022].

- [24] K. Janvier, Mémoire de fin de cycle : Analyse technico-économique d'une installation PV connectée au réseau SNEL/Goma : cas de feeder sud, Goma, 2016.
- [25] Legrand, Guide technique Parafoudres, France, 2020.
- [26] «Legrand,» [En ligne]. Available: www.legrand.fr.
- [27] M. S. Pascal, TFC : Electrification du stade de l'unité par des module solaires, Goma, 2017.
- [28] AEG, Normes du Beuth- vertieb S.A.R.L, Berlin, 1975.
- [29] POWER CONTROLS, Catalogue général disjoncteurs sous boîtier moulé, Paris, 2007.
- [30] «Données géographiques de la NASA incorporées dans RETScreen,» 2016.
- [31] «Données du logiciel retScreen Expert».
- [32] A. ENERGY, «ASE ENERGY,» [En ligne]. Available: www.ase-energy.com. [Accès le 9 Janvier 2023].
- [33] L. V. Breakers, Documents d'applications techniques n°10 installations photovoltaïques, Italie, 2010.
- [34] «Myshopsolaire,» [En ligne]. Available: www.myshop-solaire.com. [Accès le 26 Novembre 2022].
- [35] J. TURPIN, Dimensionnement- méthode1, version1.0, Paris: 2010.
- [36] O. M. Hugues, TFC : Etude et dimensionnement d'une centrale photovoltaïque pouvant alimentée le quartier Himbi I, Goma, 2016-2017, p. 58.
- [37] S. T. Corporation. [En ligne]. Available: www.satcon.com. [Accès le Octobre 2022].
- [38] «Guide d'installation de système d'alimentation électrique pour site isolé,» [En ligne]. Available: <http://www.erm-energie.com>.

- [39] S. T. ALLOGANVINON, «Conception D'une Mini-Centrale Photovoltaïque Pour L'alimentation Partielle De L'installation Electrique Du Ministère Du Travail Et De La Fonction Publique (Mtfp) Du Benin,» BENIN , 2011/2012.
- [40] A.Qi, Design and simulation of photovoltaic water pumping system» of the requirements for the degree of master of science in electrical engineering, faculty of California polytechnic state university, 2005.
- [41] T. MAMBRINI, Thèse de doctorat : caractéristiques de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implatation et en fonction des differentes technologies, Université Paris-Sud, 2014.
- [42] hellopro, [En ligne]. Available: www.hellopro.fr. [Accès le janvier 2023].
- [43] G. M. BINAMEN, Etude et dimensionnement d'une centrale photovoltaïque pour l'alimentation d'un quartier résidentiel, 2019.
- [44] M. Z. Z. & M. B. R. Rym, Dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome, Algérie, 2017.