

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU



FACULTE DU GENIE ELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

Mémoire de Fin d'Etudes
De MASTER ACADEMIQUE
Domaine : **Sciences et Technologies**
Filière : **Génie Electrique**
Spécialité : **Réseaux électriques**

Présenté par
Célia DJILI
Karima FAREB

Thème
**Etude d'impact d'une centrale
photovoltaïque sur un réseau électrique**

Mémoire soutenu publiquement le 13/07/2017. Devant le jury composé de :

Mr Meziane AOUES
Maitres de conférences classe A, U.M.M.T.O. Président.

Mr Rachid ZIRMI
Maitres de conférences classe B, U.M.M.T.O, Encadreur.

Mr Mustapha ZAOUIA
Maitres de conférences classe A, U.M.M.T.O, Examineur.

Mr Nabil BENYAHIA
Maitre de conférences classe A, U.M.M.T.O, Examineur.

Remerciement

Avant tout nous remercions notre dieu de nous avoir donné la force et courage.

Nous voudrions bien remercier chaleureusement Monsieur M. ATI, qui nous a aidées, orientées, conseillées et réaliser ce modeste travail.

Nos vifs remerciements vont à l'encontre de notre encadreur Monsieur R.ZIRMI, pour sa grande disponibilité et de nos différentes sollicitations et son précieux conseil.

Nos remerciements s'adressent également à Monsieur le président M.Aoues et les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en examinant notre travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste mémoire à ma fabuleuse étoile très chère mère, pour sa patience illimitée, encouragement contenu, en témoignage de mon profond amour et respect pour sa grande sacrifice ' Je t'aime '

A la mémoire de mon père.

Mes chers frères : Hassiba et son mari Ramande, Arezki, et mon petit frère adoré pour leur grand amour et leur soutien.

Et à toute ma famille en général.

Et enfin

A ma binôme Michi celia avec qui j'ai partagé des moments précieux et ce travail de fin d'étude.

Mes chers amis « Dyhita, Banouha, djidjita, Baladi, norita, ElBafsa, Lyhia.....

Dédicaces

Je dédie ce modeste mémoire à

la mémoire de mon père

*ma fabuleuse étoile très chers mère, pour sa patience illimité, encouragement contenu,
en témoignage de mon profond amour et respect pour sa grande sacrifice 'je t'aime*

Mama tountou'

*Mes chers frères : Ghani, Bousad, Moloud , Samir et sa femme
Nedjma et mon grand frère adoré Sofiane et sa femme Aziza pour leur grand
amour et leurs soutiens.*

Et à toute ma famille en général.

Et enfin

*A ma binome Takitou avec qui j'ai partagé des moment précieuse et ce travail de
fin d'étude.*

*Mes cheres amis : Djourdjina, djidji, nadir, djafar, didouche, baladi , norita, dyhia,
lylia, kahina , katia,.....*

Liste des figures

CHAPITRE I: Généralité sur le photovoltaïque

2

Figure I.2 : position de la terre par rapport au soleil en différent mois de l'année.....	9
Figure I.3 : principe de l'effet photovoltaïque	10
Figure I.4 : cellule au silicium amorphe (couche mince).....	13
Figure I.5 : cellule au silicium monocristallin.....	13
Figure I.6 : cellule au silicium poly cristallin.....	14
Figure I.7 : Schéma de 3 Cellules photovoltaïque associées en série.....	15
Figure I.9 : Schéma de 3 cellules photovoltaïque association en parallèle.....	15
Figure I.10: caractéristique I-V des cellules photovoltaïque raccordées en parallèle	16
Figure I.11: Schéma d'un module photovoltaïque.....	17
Figure I.12: Evolution de la caractéristique I-V du module en fonction de l'éclairement.....	18
Figure I. 13: Evolution de la caractéristique I-V du module en fonction de la température.....	18
Figure I. 14: Régulateur (PWM).....	20
Figure I.15: Schéma d'un convertisseur boost.....	22
Figure I.16: Schéma d'un convertisseur Buck.....	24
Figure I.17: Elément de protection d'un générateur photovoltaïque.....	25
Figure I.18: Schéma d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par MPPT.....	26
Figure I.19: Schéma d'une installation photovoltaïque autonome.....	28
Figure I.20: Schéma principale d'un système hybride avec éolien.....	29
Figure I.21: Schéma principale d'un système hybride avec groupe électrogène.....	30
Figure I.22: Schéma d'un système photovoltaïque raccordée au réseau.....	31

CHAPITRE II: Les réseaux électrique

Figure II.1: isolateur verre.....	34
Figure II.2: schéma d'un pylône (support).....	36
Figure II.3: Jeu de barre électrique	37
Figure II.4: Architecture d'un réseau électrique.....	38

CHAPITRE III: topologie d'un onduleur adapté au centrale PV

Figure III.1: Les différents types d'onduleur pour systèmes photovoltaïques.....	51
Figure III.2: Onduleur en pont avec transformateurs BF	51
Figure III.3: Onduleur en pont avec transformateur HF.....	52
Figure III.4: Principe de signaux sinusoïdaux en électronique de puissance.....	52
Figure III.5: Onduleur sans pont sans transformateur.....	53
Figure III.6: Schéma principale d'un onduleur monophasé en demi-point.....	54
Figure III.7: Schéma principale d'un onduleur monophasé en pont.....	56
Figure III.8: Schéma principale d'un onduleur triphasé en pont.....	56
Figure III.9: évolution de la puissance dans un circuit alternatif.....	56
Figure III.10: La tension de sortie de l'onduleur avant la filtre.....	57

Liste des figures

Figure III.11: Tension de sortie de l'onduleur après le filtre.....58

CHAPITRE IV: Simulation d'une centrale PV Naâma de 20MW raccordée au réseau

Figure IV.1: Choix des composants du système.....62

Figure IV.2: Principaux résultats de la simulation68

Figure IV.3: Trajectoire de soleil.....68

Figure IV.4: Diagramme solaire disponible69

Figure IV.5: Indice performance69

Figure IV.6: Bilan et résultats principaux72

Figure IV.7: Diagramme de pertes.....73

Figure IV.8: Détail d'un générateur PV.....74

Figure IV.9: Schema d'un SKID de Naâma.....76

Sommaire

Introduction générale

I.1. Introduction.....	8
I.2. Rayonnement solaire	8
I.2.1. Rayonnement direct.....	8
I.2.2. Rayonnement diffus.....	8
I.2.3. Rayonnement réfléchi.....	8
I.2.4. Rayonnement globale	9
I.3. La trajectoire du soleil.....	9
I.4. principes de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	10
I.4.1. Les semi-conducteurs	10
I.4.2. Jonction PN	10
I.4.3. L'effet photovoltaïque	11
I.5. Cellule solaire photovoltaïque.....	11
I.5.1. Type de cellule photovoltaïque	11
I.5.2. Association des cellules photovoltaïque	13
I.5.3. Les caractéristiques d'une cellule solaire.....	15
I.6. Le module photovoltaïque.....	15
I.6.1. Effet du niveau d'éclairement sur le module photovoltaïque	16
I.6.2. Effet de la température des cellules sur le module photovoltaïque	17
I.7. Les centrales solaires	17
I.8. Les dispositifs d'une centrale solaire.....	17
I.8.1. générateur photovoltaïque	17
I.8.2. Système de régulation	18
I.8.2.1 Régulateur de décharge.....	18
I.8.2.2. Régulateur de charge.....	18
I.8.3. Système de stockage.....	19
I.8.4. Système de conversion	20
I.8.4.1. Onduleur.....	20
I.8.4.2 Le convertisseur DC-DC	20
I.8.5. Protection des générateurs photovoltaïques.....	21

I.8.5.1 La diode anti-retour	21
I.8.5.2. La diode By-pass	22
I.8.6. Câblage	22
I.9 Commande de maximisation de puissance	22
I.9.1 Principe de la maximisation de puissance	23
II.9. Les différents types de systèmes photovoltaïques	23
II.9.1. Systèmes autonome	23
II.9.1.1. Système autonome sans stockage	24
II.9.1.2. Système autonome avec stockage	24
I.9.2. Système hybrides	25
II.9.3. Système de pompage	26
I.9.4. Système raccordés au réseau	26
Conclusion	27
II.1. Introduction	28
II.2. Organisation d'un réseau de transport d'énergie	28
II.3. Constitution d'un réseau électrique	28
II.3.1. Centrales électriques	28
II.3.2. Les lignes électriques	28
II.3.2.1. Les lignes aériennes	29
II.3.2.2. Les lignes souterraines	30
II.3.3. Les postes électriques	30
II.3.3.1. Constitution d'un poste	31
II.4. Les différents réseaux électriques	31
II.4.1. Le réseau de transport et d'interconnexions	32
II.4.2. Le réseau de répartition	32
II.4.3. réseau de distribution	32
II.5. Les types de lignes	33
II.6. Principales types de défauts	34
II.6.1. Les courts-circuits	34
II.6.2. Les surtensions	35
II.6.4. Baisse de tensions	37
II.6.4.1 Effets des baisses de tension	37
II.7. Appareillage de protection	37
II. 7.1. Appareillage utilisé contre les surtensions	37

II.7.2. Appareillage utilisé contre les surintensités	38
II.7.4. Sectionneur	38
II.7.5. Fusible	39
II.8. Protection des personnes	39
II.9. Prise de terre	39
II.10. Influence des systèmes photovoltaïque sur le réseau de distribution	40
II.11. Influence du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques	41
II.12. Raccordement des systèmes PV au réseau basse tension	42
II.12.1. Sécurité des biens et des personnes	42
II.12.2. Tension de raccordement	42
Conclusion	43
III.1. Introduction	43
III.2. Principe de fonctionnement d'un onduleur PV	43
III.4. Différentes technologies d'onduleur pour système photovoltaïque	44
III.5. Classification des onduleurs pour systèmes photovoltaïques	47
III.5.1 Classification selon le type du système photovoltaïque	47
III.5.1.1. L' Onduleurs pour installation autonomes	48
III.5.1.2. Onduleur raccordés au réseau	48
III.6. Onduleur avec transformateur BF- onduleur en pont avec transformateur	49
III.7. Onduleur avec transformateurs HF- onduleur en pont avec convertisseur DC/DC flyback et transformateur HF	49
III.8. Onduleur sans transformateur- onduleur en pont sans convertisseur DC/DC	50
III.9. Onduleur monophasé	51
III.10. Onduleur triphasé	52
Conclusion	54
VI.1. Introduction	55
VI.2. Présentation de la centrale de Naâma	55
VI.3. Modèle de simulation	55
VI.3.1 Type de l'onduleur	56
VI.4.1 Modèle du transformateur	56
VI.5. Présentation du logiciel PVSYST	57
VI.5.1. Simulation avec logiciel PVSYST	58
VI.6. Dimensionnement de la station photovoltaïque de Naâma	58

VI.6.1. Donnés géographiques	58
VI.6.2. Données météorologique.....	58
VI.7. Caractéristiques générales	60
VI.7.1. Caractéristique de module	61
VI.7.2. Condition du site	62
. IV.6.2.1. Température maximale et minimale des cellules.....	62
VI.6.2.3. Protection de courant inverse	64
IV.7. Résultats des vérifications	64
VI.8. Résultats de la simulation.....	65
IV.8.1. Trajectoire de soleil.....	65
IV.8.3. Energie utile produite	66
IV.8.4. Indice de performance	67
IV.8.5. Bilan et résultats principaux	68
IV.8.6. Les pertes	69
IV.9. SKID.....	69
IV.9.1. Le poste de livraison	70
IV.9.2. Le poste de commande.....	70
Conclusion... ..	71

The background features a decorative graphic consisting of three blue circles of varying sizes, each composed of concentric rings of different shades of blue. These circles are arranged vertically, with the largest at the top and bottom, and a smaller one in the middle. Two thin, light blue lines intersect at a point above the middle circle, forming a V-shape that frames the central text.

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie a toujours été une préoccupation humaine depuis l'invention du feu, il y a plus de 400 000 ans. Energie de cuisson des aliments d'abord, de chauffage lorsque la colonisation des régions tempérées a commencé, puis énergie pour l'agriculture, les transports, la transformation de la matière. Or, presque toutes les sources d'énergie que l'homme a utilisées, du bois charbon au pétrole, ont eu pour origine la lumière solaire [1].

La production de l'énergie est un grand défi pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution, l'épuisement rapide et l'instabilité des prix des fossiles à l'échelle mondiale ont nécessité une recherche urgente pour de nouvelles sources d'énergie pour répondre aux exigences actuelles.

Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir [1].

La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant leur efficacité.

Une deuxième méthode consiste à développer de nouvelles sources d'énergie. Des recherches sont en cours dans le domaine de la fusion nucléaire qui, éventuellement, pourrait être une solution énergétique du futur, mais l'avenir de cette filière et encore moins son avènement ne sont pas assurés.

Dans l'immédiat, nous disposons de ressources en énergie renouvelable inépuisables que nous sommes en mesure d'exploiter de plus en plus facilement et proprement. Les techniques d'extraction de la puissance de ces ressources demandent des recherches et des développements plus approfondis visant à fiabiliser, abaisser les coûts (de fabrication, d'usage et de recyclage) et augmenter l'efficacité énergétique.

Le premier, chapitre sera consacré à la présentation du système photovoltaïque non autonome, ainsi que ces différents composants et leurs modes de fonctionnement.

Le deuxième chapitre, nous allons faire rappeler quelque donnée de base sur les réseaux électrique, ainsi que ces composants et leur système de protection. Ensuite nous parlerons sur les interactions et les conditions nécessaires aux raccordements d'une centrale photovoltaïque.

Introduction générale

Le troisième chapitre à pour but de présenter les topologies d'un onduleur, les types des onduleurs non autonomes ensuivent, nous allons donner quelque critères du choix d'un onduleur.

Enfin dans le troisième chapitre nous présenterons une méthode de dimensionnement de la centrale à Naâma (Algérie) réalisée grâce au logiciel de calcul PVSYST dans le but de savoir tous les détails de notre centrale ainsi que les résultats obtenus et l'interprétation de ces résultats.

Enfin, nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

The page features a decorative design with three blue circles of varying sizes, each composed of concentric circles in different shades of blue. These circles are arranged in a descending staircase pattern from the top right towards the bottom right. Thin blue lines intersect to form a large 'V' shape that frames the central text area.

CHAPITRE

1 Généralités sur l'énergie solaire

 fotolia

I.1. Introduction

Notre pays occupe une position géographique stratégique, favorisant l'épanouissement et l'utilisation des énergies renouvelables et particulièrement l'énergie solaire. Dans ce chapitre nous allons définir certaines grandeurs solaires ainsi que les différentes notions sur le système photovoltaïque et leurs caractéristiques principales.

I.2. Rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est l'ensemble des ondes électromagnétiques émises par le soleil. Ce dernier émet en permanence des radiations, ainsi que des particules. Selon la longueur d'onde, on peut distinguer le domaine du visible, de l'infrarouge et le domaine de l'ultraviolet. Ces deux derniers sont invisibles à l'œil nu. Environ la moitié de l'énergie est émise sous forme de rayonnement infrarouge. Le rayonnement est émis sous forme de paquets d'ondes appelés photons ; l'énergie de chaque photon est déterminée par la relation suivante [1] :

$$E = \frac{h \times c}{\lambda} \quad (\text{I.1})$$

Où

h : constante de Planck $h = 6,62 \times 10^{-34}$ [J.s]

c : vitesse de lumière [m/s]

λ : Longueur d'onde [m]

I.2.1. Rayonnement direct

Rayonnement direct est une partie du rayonnement reçue directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ces rayons sont parallèles entre eux, cette composante directe du rayonnement peut être collectée par des systèmes optiques à concentration [1].

I.2.2. Rayonnement diffus

C'est la partie du rayonnement provenant du soleil et qui rencontre des obstacles tels que les nuages et la poussière, dans l'atmosphère. Ces obstacles ont pour effet de rediriger les rayons du soleil parallèles en une multitude de faisceaux dans toutes les directions (à l'origine) en une multitude de faisceaux dans toutes les directions [1].

I.2.3. Rayonnement réfléchi

C'est la partie de l'éclairement solaire réfléchi par le sol, ce rayonnement dépend directement de la nature du sol (sable, neige ...) il se caractérise par un coefficient propre de la nature du sol appelé l'Albédo, ainsi le rayonnement qui arrive au sol possède au moins deux composantes : une composante diffuse et la composante directe [1].

I.2.4. Rayonnement globale

C'est le résultat de la superposition des trois compositions directes, diffuse et réfléchi. Et qui est le rayonnement pris en compte pour la détermination du rendement des cellules solaires [2].

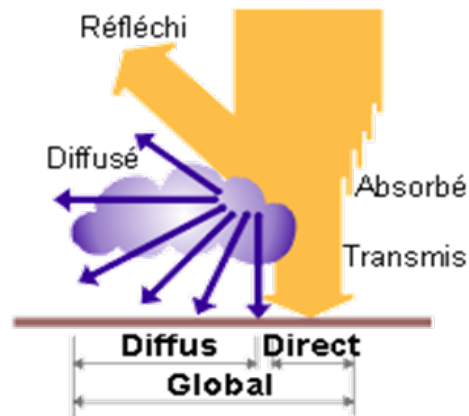


Figure I.1 : les différentes composantes des rayonnements [2]

I.3. La trajectoire du soleil

Pour produire un maximum d'électricité photovoltaïque, un module photovoltaïque doit être positionné de façon perpendiculaire aux rayons du soleil. Ceci est généralement impossible à obtenir car la position du soleil varie constamment en fonction de la journée et de la période de l'année, il est donc nécessaire de décrire la trajectoire du soleil apparente qui dépend de l'altitude et de la longitude de ce point de la surface de la terre [2].



Figure I.2 : Position de la terre par rapport au soleil en différents mois de l'année [2].

- **La longitude (L)** : est l'angle formé par deux plans méridiens passant par l'axe des pôles, l'un étant pris pour origine, et l'autre déterminé au lieu considéré. La longitude est comprise entre $(-180^\circ \text{ à } +180^\circ)$.

- **La latitude (ϕ)** : est l'angle entre l'équateur et le rayon de la terre passant par le lieu considéré, la latitude est comptée de 0° à $+90^\circ$ pour l'hémisphère nord, et de 0° à -90° pour l'hémisphère sud.
- **L'altitude (Z)** : c'est la hauteur d'un point correspondant à la distance verticale entre ce point et une surface de référence (le niveau de la mer=0).
- **Azimut (Ψ)** : est l'angle dans le plan horizontal entre la direction d'un objet et une direction de référence, cette référence va être le nord géographique ou magnétique.

I.4. principes de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

La cellule solaire photovoltaïque, constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur qui transforme l'énergie solaire en énergie électrique. Cette conversion est basée sur les trois mécanismes suivants [3]:

- Absorption des photons par le matériau qui constitue le dispositif.
- Conversion de l'énergie du photon en énergie électrique, ce qui correspond à la création des paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur.
- Collecte des particules générées dans le dispositif.

I.4.1. Les semi-conducteurs

Du point de vue électrique, un semi-conducteur est un matériau se situant entre le conducteur et l'isolant. Un semi-conducteurs à l'état pur n'est pas un bon conducteur ni un bon isolant.

Les éléments uniques les plus utilisés pour les semi-conducteurs sont le silicium, le germanium et le carbone. La conductivité des semi-conducteurs s'accroît fortement, avec le dopage, pouvant devenir comparable à celle des métaux. Les semi-conducteurs à élément unique se caractérisent par des atomes à quatre électrons de valence.

I.4.2. Jonction PN

Le dopage d'un semi conducteur consiste à lui ajouter des impuretés c'est-à-dire des éléments ayant un nombre différent d'électrons de valence, l'ajout de phosphore (5 électrons de valence) au silicium impose un excès d'électrons dans le réseau ; cette association forme un semi-conducteur de type N (conduction assurée par des charges négatives). L'ajout de bore (3 électrons de valence) au silicium introduit un manque d'électrons formant des trous dans le réseau, il s'agit alors d'un semi- conducteur de type P (conduction par des charges positives). Quand deux semi-conducteurs de type P et de type N sont mis en contact, les trous majoritaires dans la région de type P diffusent vers la région de type N, et de même pour les

électrons dans l'autre sens. La diffusion des porteurs libres de part et d'autre de la jonction fait apparaître une zone de charge d'espace (ZCE). Il s'établit alors, au voisinage de la jonction, un champ électrique qui s'oppose alors à la diffusion de ces porteurs majoritaires.

Dans le cas du photovoltaïque, la couche supérieure de la cellule est dopée N et la couche inférieure est dopée P.

I.4.3. L'effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque désigne l'émission d'un courant électrique par un matériau semi-conducteur, soumis à l'action de la lumière. Le nombre d'électrons émis est proportionnel à l'intensité de la source lumineuse.

Dans le semi-conducteur qui compose les cellules photovoltaïques, un photon arrache un électron, créant un passage ; un trou. L'électron se replace alors dans un nouveau trou. Ce mouvement dissipe de l'énergie. Il existe une tension entre les deux couches d'une cellule photovoltaïque, ce qui crée une différence de potentiel électrique.

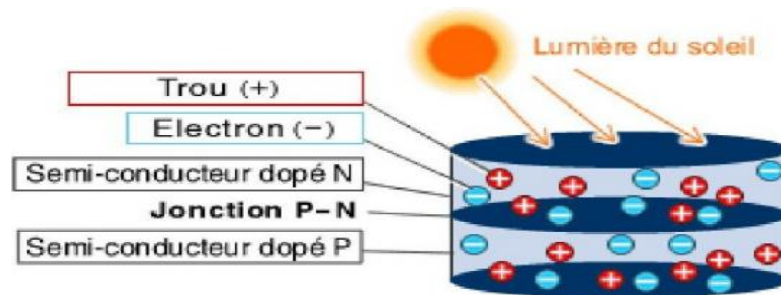


Figure I.3 : principe de l'effet photovoltaïque. [3]

I.5. Cellule solaire photovoltaïque

La cellule solaire est l'unité de base d'un système photovoltaïque, qui sert à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique grâce au phénomène photovoltaïque.

La puissance d'une cellule solaire est très faible, typiquement entre 1 à 3W avec une tension moins d'un volt, la mise en série de plusieurs cellules augmente la tension en conservant le courant, et la connexion en parallèle augmente le courant pour une même tension. La puissance produite sera proportionnelle à la surface du module [3].

I.5.1. Type de cellule photovoltaïque

Les types les plus utilisés dans l'industrie sont : Les cellules monocristallines, Les cellules multi cristalline (poly cristallines) et les cellules amorphes.

- **La cellule photovoltaïque en silicium amorphe (a-Si)**

C'est la technologie utilisée dans tous les appareils électriques qui intègrent une fonction de recharge solaire comme les calculatrices, les montres, certaines alarmes, ...etc. C'est la cellule qui est la moins affectée par les élévations de la température. Elle est produite à partir d'un gaz de silicium qui est projeté sur du verre, du plastique souple ou du métal, elle se caractérise par sa couleur grise foncée, un rendement bas (6-7%) et une durée de vie plus faible [4].



Figure I.4: Cellule au Silicium amorphe (couche mince)

- **La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin (Mc-Si)**

La fabrication d'une cellule de production solaire nécessite de grandes quantités de matériaux à haute pureté. Ces cellules sont en général octogonales et d'une couleur uniforme foncée. Les cellules photovoltaïques à base de silicium monocristallin ont pour avantage principal un meilleur rendement (15%) relativement aux deux autres types, mais elles restent aussi les plus chères des trois [4].

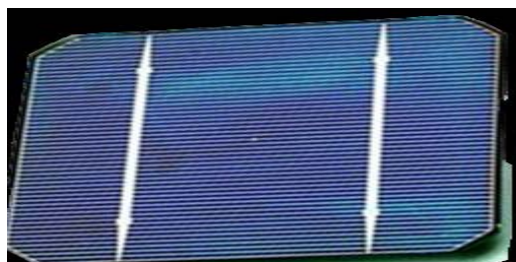


Figure I.5 : Cellule au Silicium Monocristallin

- **La cellule photovoltaïque en silicium poly-cristallin (pc-Si)**

Appelée aussi cellule en silicium multi cristallin. Le silicium poly-cristallin est la technologie la plus répandue sur le marché photovoltaïque mondial. Ces cellules possèdent un

bon rendement (13%) mais légèrement inférieur à celui des cellules en silicium monocristallin, mais son prix très abordable le rend mieux demandé que le monocristallin [4].

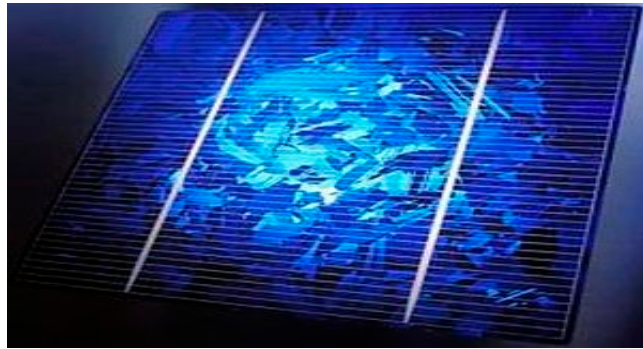


Figure I.6 : Cellule au Silicium Poly-cristallin.

I.5.2. Association des cellules photovoltaïque

La puissance disponible aux bornes d'une cellule unitaire est très faible. Il est donc nécessaire d'associer en série et en parallèle des générateurs photovoltaïques pour augmenter la puissance et rendre la puissance compatible avec l'équipement électrique usuel. En fait l'association des cellules PV est analogue à l'association de générateurs de courant, en série ; leurs tensions s'ajoutent, En parallèle ; leurs courants s'ajoutent.

Afin d'augmenter la puissance des générateurs photovoltaïques, nous sommes obligés de grouper les cellules photovoltaïques en série et en parallèle pour obtenir un générateur mixte équivalent.

- **association en série des cellules**

Les cellules photovoltaïques peuvent se connecter en série. Les tensions de toutes les cellules s'ajoutent et le courant est le même que celui d'une seule cellule. Si l'une d'elles était plus faible en courant, elle imposerait son courant à toute la série ce qui pénaliserait le module complet.

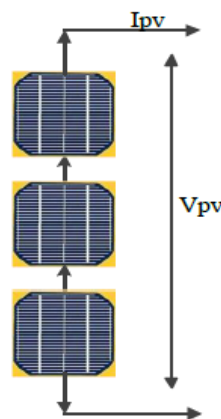


Figure I.7 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en série. [3]

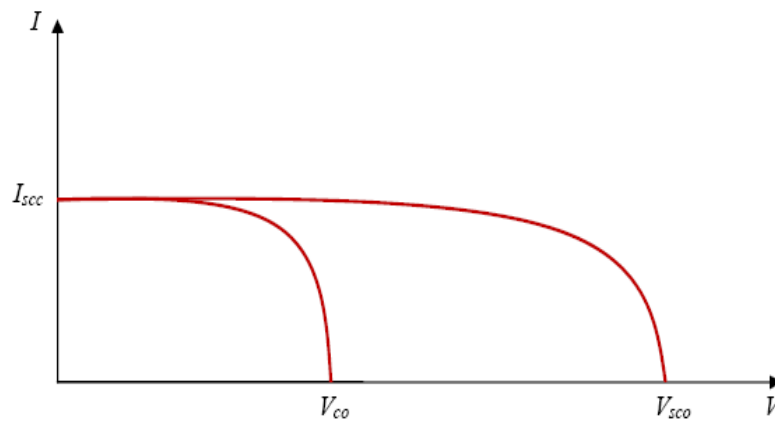


Figure I.8 : Caractéristique I-V des cellules photovoltaïques raccordées en série. [3]

- **Association en parallèle des cellules**

La mise en parallèle des cellules photovoltaïques permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Donc, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique électrique résultante du groupement est obtenue par addition des courants.

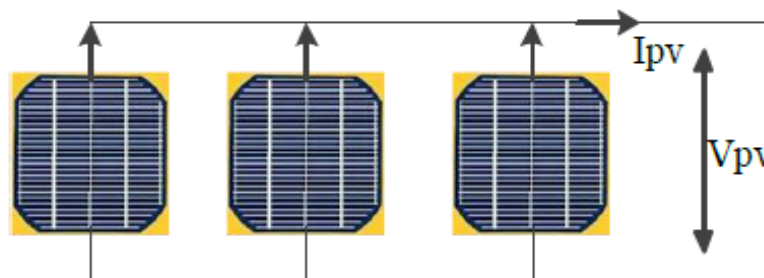


Figure I.9 : Schéma de 3 cellules photovoltaïques associées en parallèle. [3]

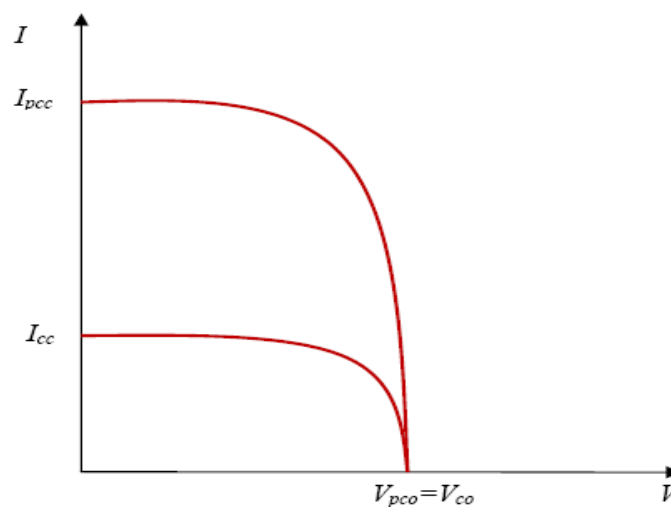


Figure I.10 .Caractéristique I-V des cellules photovoltaïque raccordées en parallèle. [3]

I.5.3. Les caractéristiques d'une cellule solaire

Les premiers paramètres qui apparaissent sont le courant de court-circuit (I_{CC}), la tension à circuit ouvert (V_{CO}) et le facteur de forme FF « fill factor » [5].

- **Le courant de court-circuit (I_{CC})**

Il s'agit du courant lorsque le potentiel appliqué à la cellule est nul. C'est le plus grand courant que la cellule puisse fournir. Celui-ci est en fonction de la température, de la longueur d'onde du rayonnement, de la surface activée de la cellule et de la mobilité des porteurs. Ce courant dépend linéairement de l'intensité lumineuse reçue [5].

- **Tension du circuit-ouvert (V_{CO})**

C'est la tension aux bornes de la cellule lorsqu'elle n'est pas connectée à une charge ou lorsqu'elle est connectée à une charge de résistance infinie [5].

- **Facteur de forme**

Un paramètre important pour qualifier la qualité d'une cellule ou un générateur PV. Ce coefficient représente le rapport entre la puissance maximale que peut délivrer la cellule notée P_{max} et la puissance formée par le rectangle $I_{CC} \times V_{CO}$. Il est défini par la relation suivante [5] :

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{CC} \times V_{CO}} \quad (I.2)$$

- **Rendement**

Ce rendement η désigne le rendement en puissance. La connaissance de sa valeur permet d'évaluer les performances de la cellule. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} [5]:

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{I_{CC} \times V_{CO}}{P_{in}} \quad (I.3)$$

I.6. Le module photovoltaïque

Un générateur ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïque élémentaires montées en série ou parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées telles que la puissance, le courant de court circuit et la tension en circuit ouvert.

La puissance des modules photovoltaïques s'exprime en Watts-Crête. Cette dernière représente la puissance que peut fournir un module lorsqu'il est fermé sur sa charge nominale (optimale), sous un éclairement de 1000W/m^2 et à une température 25°C [6].

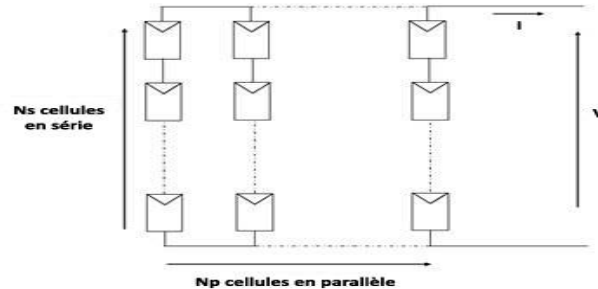


Figure I.11 : schéma d'un module photovoltaïque.

I.6.1. Effet du niveau d'éclairement sur le module photovoltaïque

L'éclairement correspond à l'intensité lumineuse captée par le module photovoltaïque, et se mesure en W/m^2 . La nuit, l'éclairement est nul (0 W/m^2). L'éclairement varie au cours de la journée entre 0 et 1000 W/m^2 (valeur maximum), en fonction de la saison. L'éclairement a une nette incidence sur la valeur de I_{cc} . Lorsque l'éclairement double, I_{cc} double aussi. L'éclairement a très peu d'incidence sur la tension à vide V_{co} [6].

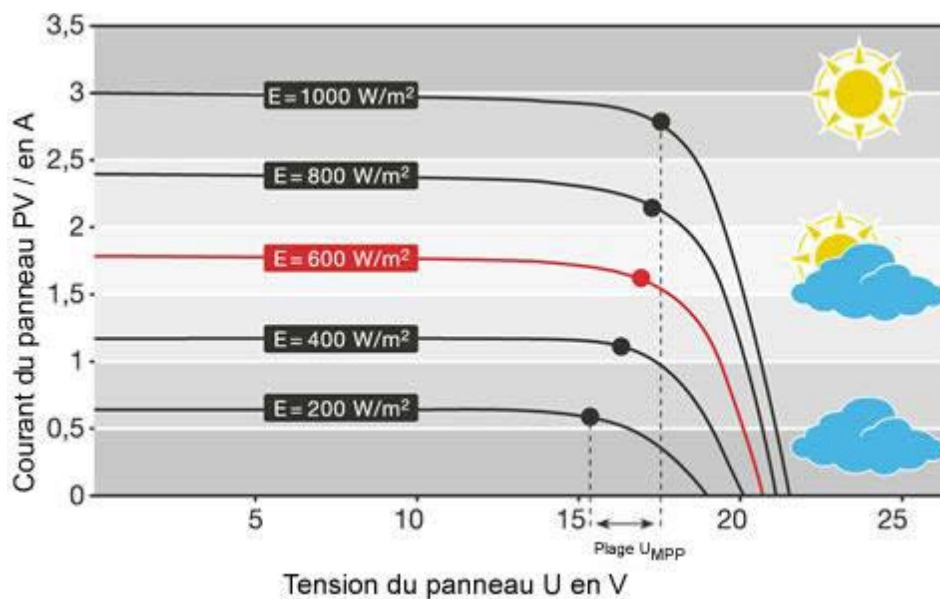


Figure I.12 : Evolution de la caractéristique (I-V) du module en fonction de l'éclairement. [6]

I.6.2. Effet de la température des cellules sur le module photovoltaïque

La température du module a une forte influence sur la tension à vide du module. Plus la température du module augmente, plus la tension à vide V_{co} diminue. Par contre, la température du module influence très peu le courant de court-circuit I_{cc} [6].

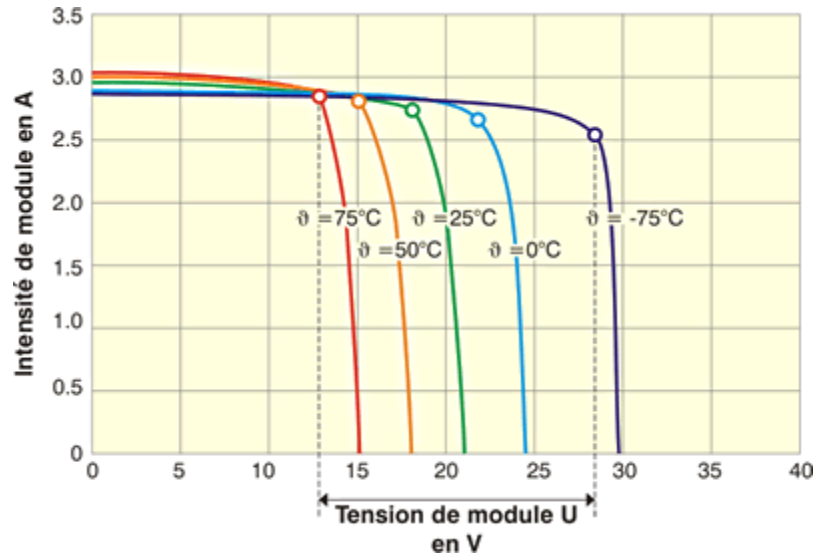


Figure I.13 Evolution de la caractéristique (I-V) du module en fonction de la température. [6]

I.7. Les centrales solaires

Une centrale photovoltaïque est composée de plusieurs champs de modules solaires photovoltaïques comportant un grand nombre de cellules photovoltaïques raccordés entre eux et destiné à produire de l'électricité, soit à titre autonome (panneaux solaires sur les toits des habitations par exemple), soit dans le cadre d'un raccordement à un réseau public de distribution d'électricité [7].

I.8. Les dispositifs d'une centrale solaire

Les dispositifs d'une centrale solaire sont les suivants :

I.8.1. générateur photovoltaïque

Un système complet assurant la production et la gestion de l'électricité fournie par un assemblage électrique de modules photovoltaïques. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique. Pour chaque panneau, on peut voir autant de sorties que de modules, ce qui fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui regroupe le tout. La boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a pour rôle d'effectuer les connexions entre les modules pour obtenir une puissance optimale de sortie [8].

I.8.2. Système de régulation

Dans tout système photovoltaïque autonome, on intercale un système dit de régulation, qui sert à contrôler l'intensité de courant qui passe par les accumulateurs, il-les protégeant ainsi contre les surcharges et les décharges, afin de maximiser sa durée de vie.

Le régulateur permet aussi d'effectuer un transfert optimal d'énergie du champ photovoltaïque à l'utilisation.

Il existe plusieurs types de régulateur : régulateur de charge et régulateur de décharge.

I.8.2.1 Régulateur de décharge

La régulation de décharge s'effectue par un comparateur qui compare la tension de la batterie à un seuil de tension pré-réglé bas et transmet l'information à un circuit de commande. Ce dernier arrête de décharger lorsque la tension par élément dépasse la tension de seuil. [7]

I.8.2.2. Régulateur de charge

La régulation de charge s'effectue par une réduction de courant lorsque la batterie est chargée, on évite la charge lorsque la tension par élément dépasse la tension de surcharge.

Il existe plusieurs types de montage de régulation de charge pour les batteries en plombe. [7]

- **Régulateur parallèle**

Le régulateur détecte la tension de la batterie en sortie, si cette tension atteint un seuil prédéfini, il va dériver le courant du panneau solaire vers une résistance de faible valeur (court-circuit du panneau solaire), ce qui va faire chauffer le régulateur. Ce type de régulation se fait donc par court-circuit. Ce régulateur shunt qui dissipe la puissance des panneaux en cas de surcharge de la batterie est mieux adapté aux petits systèmes. [8]

- **Régulateur série**

Dans ce type de régulateur, un circuit va mesurer la tension aux bornes de la batterie, si cette tension atteint un seuil prédéfini, le circuit va déconnecter la batterie du système de charge et ceci évite le réchauffement du régulateur solaire. Ce type de régulation se fait donc par circuit-ouvert. . [8]

- **Régulateur PWM**

Dans ce type de régulateur PWM (Pulse Width Modulation) ou MLI (Modulation en largeur d'impulsion), un circuit va mesurer la tension aux bornes de la batterie, et va délivrer des impulsions qui vont charger la batterie. Ces impulsions hautes fréquence, vont être d'autant plus larges que la batterie sera déchargée, si la batterie arrive en fin de charge, les

impulsions seront très fines. C'est un fonctionnement très proche du type série, et il peut être utilisé pour tous types d'installations [8].



Figure I.14 : Régulateur PWM

- **Régulateur MPPT**

Régulateur ou un tracker MPPT (Maximum Power Point Tracking), son principe permettant de suivre comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire.

Dans ce régulateur, un circuit mesure en permanence la tension et le courant du panneau pour tirer de l'énergie au point de puissance maximum. Ceci permet de garantir une récupération d'énergie maximum, quelque soient la température et l'ensoleillement. Ces régulateurs fonctionnent soit en élevant ou en réduisant la tension. Un premier circuit ajuste la demande au point de puissance maximale de l'ensemble des panneaux et le deuxième circuit transforme le courant et la tension pour les adapter aux types de batteries [8].

I.8.3. Système de stockage

Le fait que l'énergie solaire ne soit pas disponible sur l'ensemble d'une période de fonctionnement du système alimenté impose l'utilisation de batteries dans les installations autonomes pour stocker l'énergie.

Dans les systèmes solaires autonomes on utilise principalement [9] :

- **Les batteries au plomb**

La batterie au plomb est la forme de stockage de l'énergie électrique la plus courante, en raison de son coût qui est relativement faible et une large disponibilité.

- **Les batteries au Nickel Cadmium**

Elles sont les plus chères, mais aussi très résistantes aux surcharges et aux décharges, et résistent bien aux basses températures.

I.8.4. Système de conversion

Les convertisseurs sont des appareils qui servent à transformer la tension continue par les panneaux ou les batteries, pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant en une tension continue différente ou une tension alternative.

L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de source de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque ...et).

Dans cette partie nous présentons les différents types des convertisseurs statiques qu'on peut utiliser dans le système photovoltaïque, premièrement on commence par les convertisseurs (DC-AC), et en termine par les convertisseurs (DC-DC) [9].

I.8.4.1. Onduleur

L'onduleur est un convertisseur statique DC/AC de haute performance il convertit la tension continue, en tension alternative contrôlée de façon très précise.

La commande de l'onduleur est basée sur la prédiction de la tension de sorte d'un pas en avant que nous appellerons « Dead beat control ». Par cette commande, la tension de sortie de l'onduleur est forcée de suivre une référence sinusoïdale échantillonnée pour la production à la sortie du filtre, d'une onde proche d'une sinusoïde avec un taux de distorsion harmonique très réduit [9].

I.8.4.2 Le convertisseur DC-DC

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension ou de courant. son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue.

Il existe deux topologies de base de circuit de conversion DC/DC [9] :

- **Le convertisseur BOOST**

Le convertisseur boost est connu par le nom d'élévateur de tension, et aussi c'est un convertisseur direct DC/DC. La source d'entrée est de type courant continu et la charge de sortie est de type tension continue.

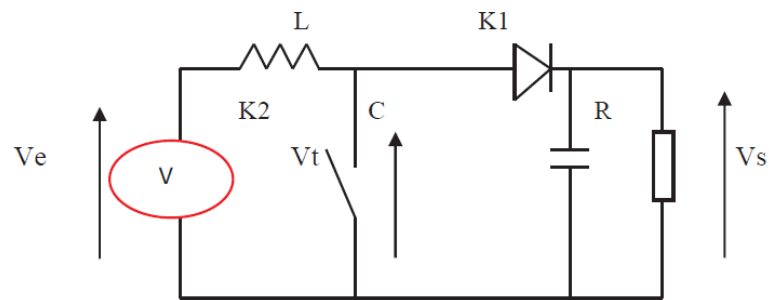


Figure I.15 : Schéma d'un convertisseur boost [9].

- **Le convertisseur Buck**

Un convertisseur Buck ou hacheur série, est un dispositif qui convertit une tension continue en une tension continue de plus faible valeur.

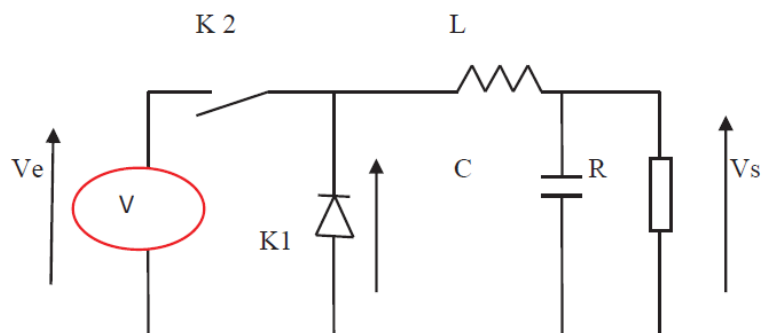


Figure I.16 : schéma d'un convertisseur Buck [9].

I.8.5. Protection des générateurs photovoltaïques

Dans chaque installation photovoltaïque, la protection des générateurs photovoltaïques est importante pour la sûreté de générateur et pour augmenter la durée de vie de l'installation.

Il existe deux types de protections de générateur photovoltaïque [9] :

I.8.5.1 La diode anti-retour

Lorsque les panneaux solaires se trouvent ainsi dans l'obscurité pendant la nuit par exemple, la tension de la batterie dépasse la tension délivrée par les panneaux solaires, le courant va circuler alors de la batterie vers les panneaux solaires, si on ne mettait pas une diode anti retour qui bloquerait le passage du courant dans la direction des panneaux on risque alors de les endommager.

Cette diode a en fait le rôle d'une valve qui évite la décharge de la batterie dans les panneaux solaires lorsque la lumière est faible.

I.8.5.2. La diode By-pass

Au sein d'une série, un module qui ne peut plus produire d'énergie (masque, défaillance), doit être protégé pour ne pas devenir récepteur et s'endommager irrémédiablement ; des diodes sont donc placées en parallèle sur chacun des modules du générateur. Elles permettent de dévier le courant produit par les autres modules de la série et sont placées en parallèle avec les modules.

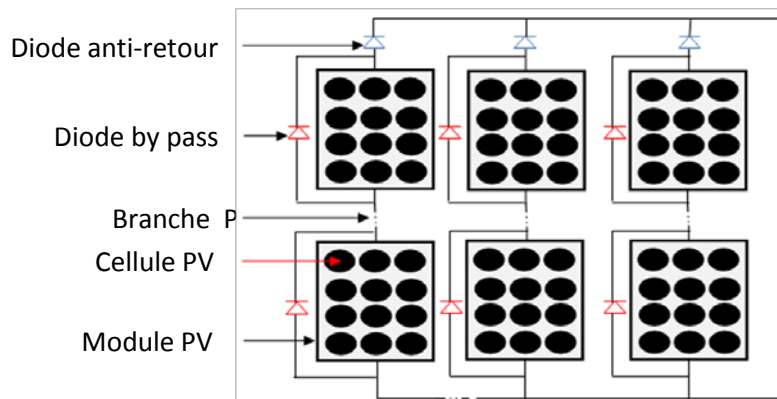


Figure I.17 Eléments de protection d'un générateur photovoltaïque.

I.8.6. Câblage

Pour faciliter le câblage et minimiser les effets d'ombrage, la surface de captage est généralement répartie en rangées parallèles est-ouest sur la largeur d'un terrain disponible. Le câblage des rangées suivra naturellement les structures jusqu'aux coffrets de raccordement. Les liaisons entre rangées et jusqu'aux onduleurs se font en caniveau [7].

I.9 Commande de maximisation de puissance

Une commande de maximisation de puissance, en anglo-saxon « Maximum Power Point Tracking (MPPT)» est une commande qui permet la poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque. Elle est généralement associée à un étage intermédiaire d'adaptation qui permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance en agissant sur le rapport cyclique de ce dernier. Ainsi, quelles que soient les conditions météorologiques (température et l'éclairement), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{mPP}, I_{mPP}). Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge au module photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge à chaque instant [10].

La Figure (I.18) représente le schéma de principe d'un système photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC entre le GPV et la charge.

La technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir. Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un module solaire photovoltaïque.

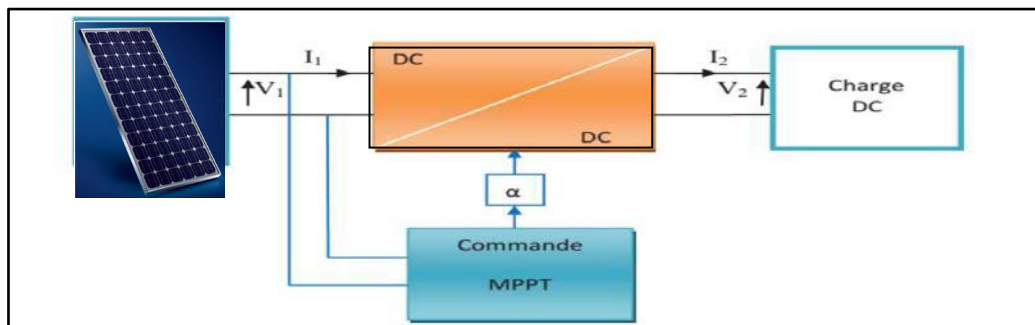


Figure I.18 Schéma d'un système photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT).

I.9.1 Principe de la maximisation de puissance

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'à priori ces points ne soient connus à l'avance, ni sans que l'on ne sache à quel moment ils ont été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximums [10].

II.9. Les différents types de systèmes photovoltaïques

Les trois genres de systèmes photovoltaïques que l'on rencontre généralement sont les systèmes autonomes, hybride et connecté au réseau.

II.9.1. Systèmes autonome

L'installation photovoltaïque est dite autonome, ou isolée, quand elle n'est pas reliée à un réseau de distribution. Le système photovoltaïque autonome permet de fournir du courant électrique à des endroits où il n'y a pas de réseau, il se révèle particulièrement adapté pour des applications comme une pompe dans le jardin, installations publicitaires, l'éclairage en zone isolée, l'alimentation de bornes téléphoniques, le long de l'autoroute... etc. Pour ces applications il n'est pas toujours possible de mettre en place un réseau d'alimentation classique, soit à cause de contraintes techniques, soit pour des raisons économiques.

Les installations photovoltaïques autonomes sont des installations composées de modules photovoltaïques, régulateur et un système de stockage qui garantit une énergie électrique

même en cas de faible éclairage ou d'obscurité et d'un onduleur qui est nécessaire dans le cas où l'on utiliserait des charges alternatives (AC). Ces installations sont adaptées pour les sites isolés loin du réseau électrique [12].

II.9.1.1. Système autonome sans stockage

C'est le système le plus simple puisque l'énergie photovoltaïque est utilisée directement à partir des panneaux, l'appareil alimenté par ce système ne fonctionnera qu'en présence de la lumière et dès que l'éclairage sera suffisant pour atteindre la puissance demandée.

Ces types de système est intéressant pour toute les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité et pour les quelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de la lumière. L'inconvénient de ce système, c'est qu'on ne profite pas toujours de l'éclairage plus élevés, pas de stockage donc pas de récupération des surplus d'énergie solaire [11].

II.9.1.2. Système autonome avec stockage

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïque autonomes on parlera de système Stand-Alone (SAPV Systems: Stand alone photovoltaic system). Ces systèmes comportent des éléments de stockage afin d'adapter la production photovoltaïque à la demande.

Le système de stockage représente une partie très importante du cout de l'installation, et ces conditions de fonctionnement sont très contraignantes. Par conséquent, les systèmes de gestion de l'énergie ont été développés afin d'optimiser la durée de vie du système de stockage et de réduire les couts de fonctionnement [11].

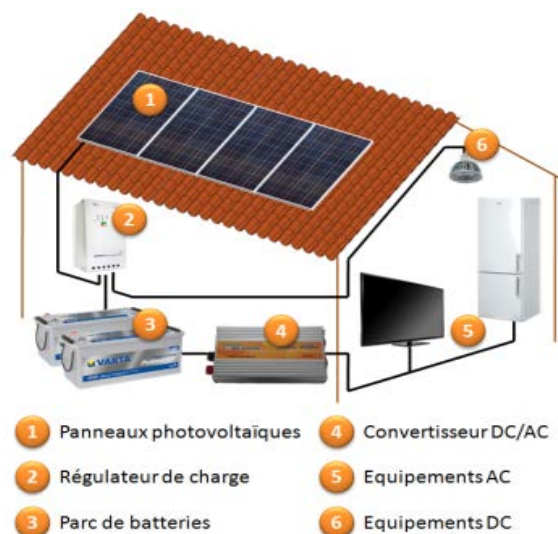


Figure I.19 : Schème d'une installation photovoltaïque autonome [11].

I.9.2. Système hybrides

Les systèmes hybrides sont généralement des systèmes photovoltaïques couplés à d'autres sources, par exemple une éolienne (association PV éolien) ou un groupe électrogène. Le rôle du second producteur d'énergie est de palier aux insuffisances de la production photovoltaïque.

Dans le cas d'un système hybride avec éolienne, l'énergie produite par celle-ci (qui possède son propre contrôleur) vient compléter la charge des batteries. Sa production étant plus aléatoire que celle des panneaux solaires, elle complète efficacement un générateur photovoltaïque pour des applications particulièrement gourmandes en électricité, qui ne nécessitent pas de fonctionner de façon régulière, mais au gré du vent [12].

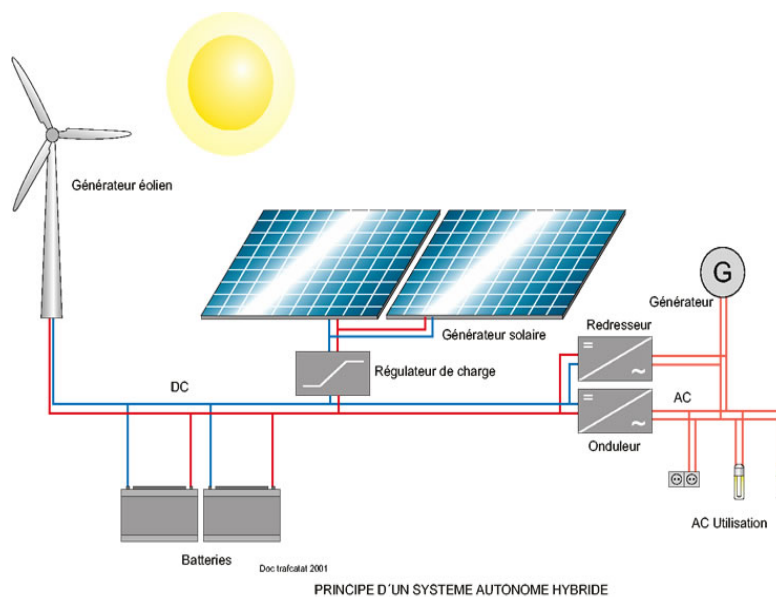
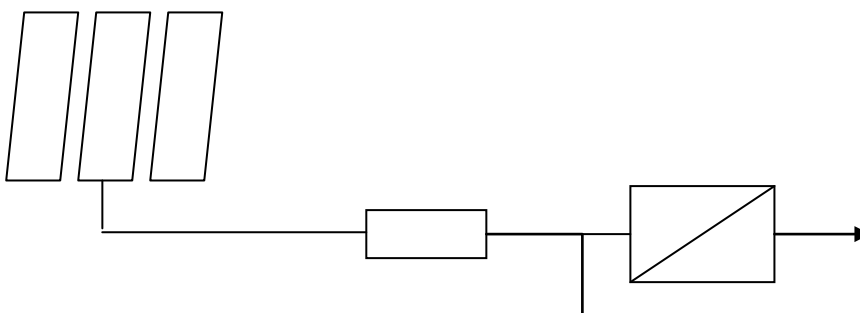


Figure I.20 : Schéma principale d'un système hybride avec éolien.

Le cas d'un système hybride avec groupe électrogène, est différent par rapport avec celui d'éolienne. Ce type de configuration est adapté aux applications très consommatrices d'électricité mais qui ne fonctionnent qu'une, deux ou trois heures par jour. Il peut aussi être utilisé comme secours permettant de limiter la taille du parc de batteries pour les jours sans soleil, à son démarrage le groupe électrogène devient une source principale afin de fournir l'électricité pour tous les appareils dans la maison tout en complétant la charge des batteries au travers du convertisseur-charge lorsque le groupe s'arrêtera, le système basculera automatiquement sur les batteries [12].

Panneaux photovoltaïques



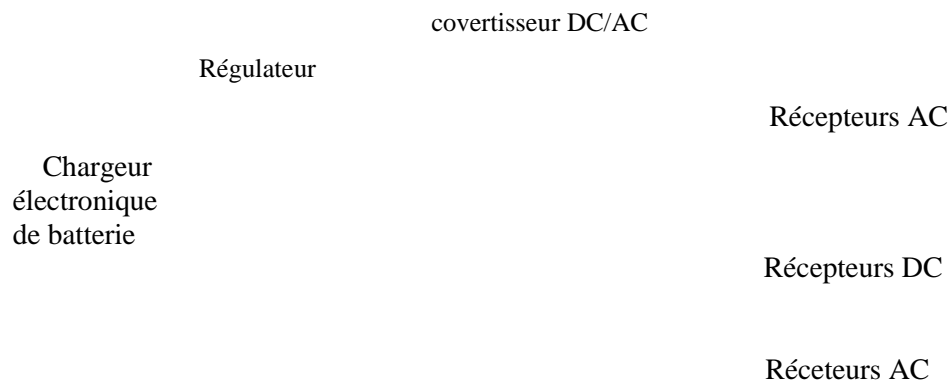


Figure I.21 : Schéma principale d'un système hybride avec groupe électrogène.

II.9.3. Système de pompage

Beaucoup de populations dans les zones rurales des pays en voie de développement affrontent de grands problèmes dus au déficit en eau. Ces problèmes sont spécialement accentués dans des zones désertiques et semi désertiques. Le déficit en eau dans les zones arides et semi arides est une question vitale pour les populations, l'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche des solutions adéquates à ce problème.

Le pompage solaire photovoltaïque représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent, et aussi branchée directement sur les panneaux solaires par l'intermédiaire d'un régulateur ou d'un convertisseur. Le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est donc variable, directement en fonction du rayonnement solaire, d'où l'expression « au fil du soleil »[13].

I.9.4. Système raccordés au réseau

On peut installer un système photovoltaïque sur un site raccordé au réseau de distribution électrique généralement sur les habitations ou les entreprises qui souhaitent recourir à une forme d'énergie renouvelable qui bénéficie d'un bon ensoleillement.

Les systèmes photovoltaïques couplés au réseau injectent l'énergie issue des modules sur le réseau de distribution, On distingue deux types d'installations :

- Injection de la totalité de la production : L'énergie produite par les modules est directement injectée sur le réseau électrique, les périodes d'injection sur le réseau correspondent aux périodes de production photovoltaïque.
- Injection du surplus de production : L'énergie produite par les modules est directement consommée sur place par les charges. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée sur le réseau.

L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie, on ne stocke plus l'énergie lorsqu'il ya un plus on l'injecte directement au réseau locale ou national, il ya un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation et un autre dans l'autre sens pour la production. Mais il faut tout de même convertir le courant continu des panneaux en alternatif par le biais d'un onduleur, et celui-ci doit être homologué par la compagnie d'électricité qui va recevoir ce courant (il doit respecter des normes sur sa qualité sinusoïdale) .Dans certain cas on ajoute au système une batterie de secours pour les coupures de courte durée [13].

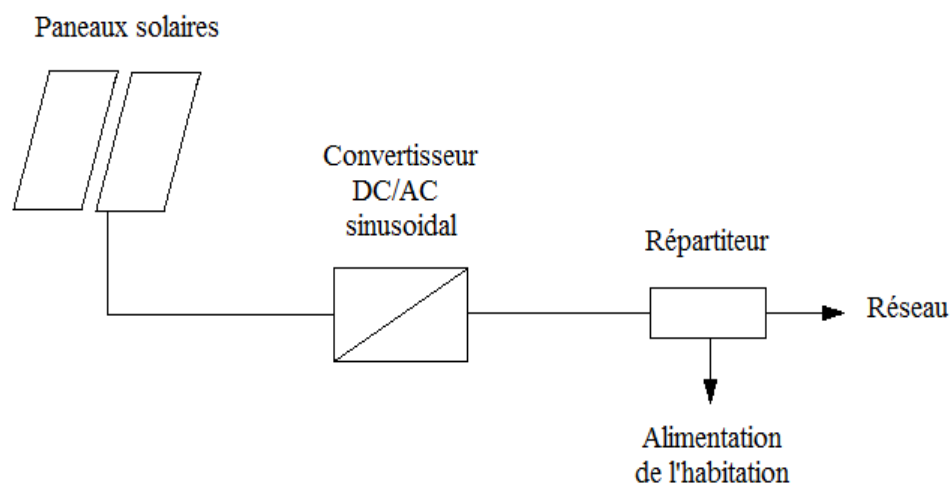


Figure I.22 : système photovoltaïque raccordée au réseau.

Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté quelques généralités sur les panneaux photovoltaïques, à savoir la description des principaux composants constituant un système photovoltaïque, ainsi que leurs modes de fonctionnement.

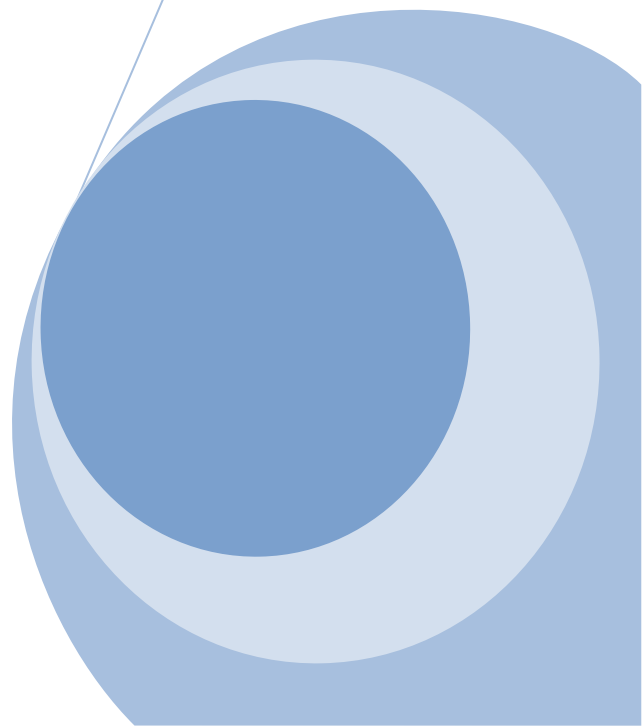
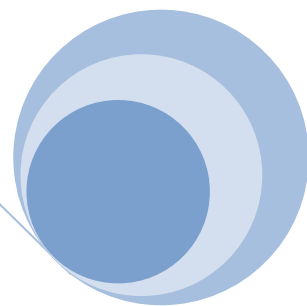
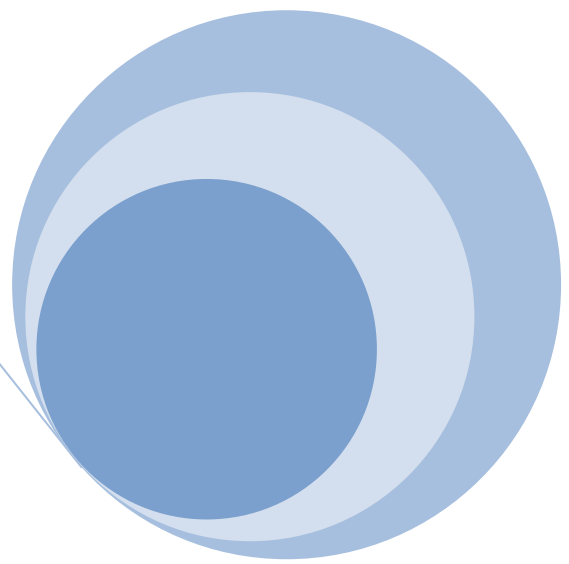
Nous avons présenté aussi le principe de la commande de maximisation de puissance (MPPT) et les différents types de système photovoltaïque tels qu'autonomes et non autonomes. L'objectif du second chapitre sera consacré au généralité sur les réseaux électriques.

CHAPITRE

Les réseaux électriques



 fotolia



II.1. Introduction

Un réseau d'énergie électrique est un système comprenant la production, transport, répartition et la distribution de l'énergie électrique.

Le système est stratifié depuis la haute tension 400KV conçue pour interconnecter les centrales de production et transmettre la puissance de ces centres de production vers les points de charges les plus importantes. La répartition s'effectue à un niveau plus faible reliant le niveau de transport et le niveau de distribution (MT de 10 à 30 KV, BT de 220 à 380V).

La protection consiste à prendre toutes les mesures nécessaires destinées à protéger les personnes ainsi que le matériel électrique. Il est donc indispensable que le choix des appareils de protection soit étudié selon le domaine de protection [15].

II.2. Organisation d'un réseau de transport d'énergie

Pour que l'énergie électrique soit utilisable, le réseau de transport et de distribution doit satisfaire les exigences suivantes [16] :

- Fournir une tension stable dont les variations n'excèdent pas $\pm 05\%$ de la tension nominale.
- Fournir une fréquence stable dont les variations n'excèdent pas $\pm 02\text{Hz}$.
- Maintenir des normes de sécurité rigoureuses.
- Veiller à la protection de l'environnement.

II.3. Constitution d'un réseau électrique

Le réseau est constitué des centrales électriques, lignes électriques, les transformateurs et les postes électriques à divers niveaux de tension [17].

II.3.1. Centrales électriques

Il existe cinq types de centrale électrique :

- Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel).
- Les centrales nucléaires.
- Les centrales hydroélectriques.
- Les centrales éoliennes.
- Les centrales photovoltaïques.

II.3.2. Les lignes électriques

Les lignes électriques assurent la fonction de transport d'énergie sur les longues distances. On distingue deux types de lignes de transport [18]:

II.3.2.1. Les lignes aériennes

Elles sont composées de câbles conducteurs nus en cuivre posés sur des isolateurs fixés à des supports ainsi que des câbles de garde.

- **Les câbles conducteurs**

Pour transporter le courant, on utilise des câbles conducteurs portés par les pylônes. Le courant utilisé est triphasé. Chacune peut utiliser de un à quatre câbles.

Les câbles conducteurs sont nus (l'isolation électrique est assurée par l'air et non par une gaine isolante). La distance des conducteurs entre eux et avec le sol garanti la bonne tenue de l'isolement. Cette distance augmente avec le niveau de tension [17].

- **Les isolateurs**

Les chaînes d'isolateurs généralement en verre, servent à supporter et à immobiliser les conducteurs sous tension d'une part et d'autre part, pour assurer l'isolement électrique entre le pylône et les conducteurs. Les isolateurs doivent avoir une grande résistance d'isolement afin qu'ils ne soient ni contournés en surface ni perforés à travers leurs masse qu'ils ont à supporter [17].

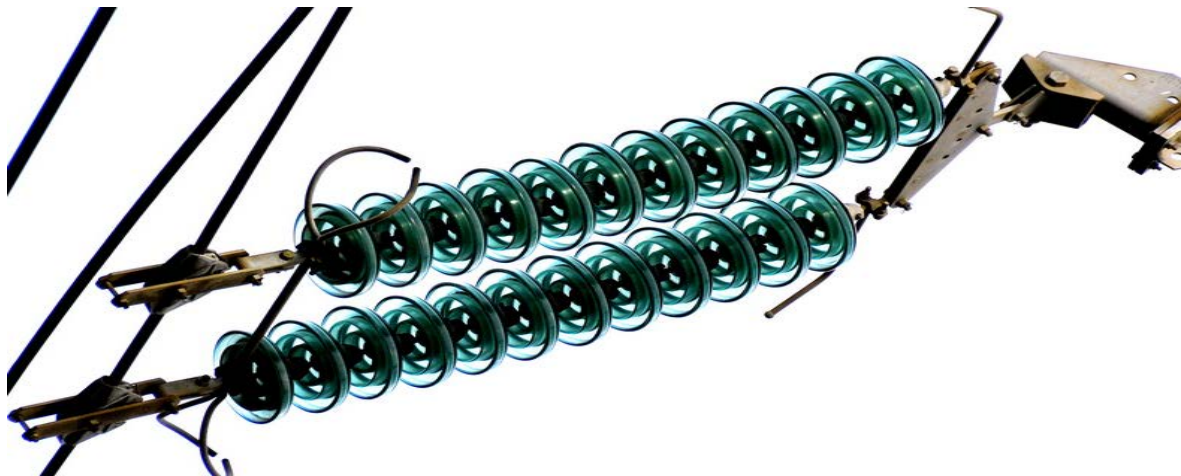


Figure II.1 : Isolateur verre

- **Les pylônes (support)**

Leur rôle est de maintenir les câbles à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage des lignes [17].



Figure II.2 Image représente des pylônes

- **Les câbles de garde**

Il existe aussi des câbles qui ne transportent pas de courant, ce sont les câbles de garde, ils sont disposés au dessus des câbles conducteurs au sommet des supports et les protègent contre les décharges atmosphériques dangereuses (foudre). Ils sont en acier et on relie solidement à la terre à chaque support [17].

II.3.2.2. Les lignes souterraines

Elles sont constituées par un ou plusieurs câbles unipolaires ou par un câble multipolaire.

- **Un câble unipolaire**

Comprend généralement un conducteur de phase centrale en cuivre ou en aluminium, entouré par un isolant (papier imprégné à l'huile, gaz sous pression), une gaine métallique et une protection contre l'humidité et les agressions mécanique et chimique [17].

- **Un câble tripolaire**

Il est composé de trois conducteurs de phase isolés et groupés sous une armure métallique commune [17].

II.3.3. Les postes électriques

Le réseau est une maille dont les nœuds sont appelés « poste ». Un poste (une sous-station) est une installation d'organes de liaison et de manœuvre où parvient l'énergie des centrales et est orientée vers les centres de consommation, ils sont destinés à assurer les fonctions suivantes :

- L'évacuation de l'énergie produite par les centrales.

- L'aiguillage de la ligne à même tension.
- La conversion, réalise une modification des caractéristiques de la tension et de la fréquence. aussi le passage de l'alternatif au continu.
- La protection des installations en cas de défaut électrique.

II.3.3.1. Constitution d'un poste

Les postes sont constitués des éléments suivants [18]:

- **Jeu de barres**

Le jeu de barres est la partie essentielle de chaque poste, c'est un système de trois conducteurs en tube et parfois en câble en méplat. Il sert à établir la connexion entre les arrivées et les départs d'un poste, chaque branche est raccordée au jeu de barres par l'intermédiaire d'un appareil de coupure qui permet de le séparer du réseau en cas de défaut.



Figure II.3. Jeu de barre électrique haute tension

- **Appareils de coupure**

Il existe deux types d'appareil de coupure, disjoncteur et le sectionneur.

- **Les isolateurs**

Les isolateurs sont constitués d'une matière solide qui présente une bonne résistance au passage du courant électrique.

- **Les transformateurs**

Le rôle d'un transformateur est de modifier la valeur de la tension ou d'un courant alternatif, cet appareil est réversible il permet soit l'élévation soit l'abaissement de la tension.

II.4. Les différents réseaux électriques

Les différents réseaux électriques sont les suivants [18]:

II.4.1. Le réseau de transport et d'interconnexions

Comprend les centrales, ainsi que les lignes et les postes de transformation. La dispersion géographique entre les lieux de production et les centres de consommation, l'irrégularité de cette consommation et l'impossibilité de stocker l'énergie électrique nécessitent un réseau électrique capable de la transporter sur de grandes distances et de la diriger.

Les tensions sont généralement comprises entre 220 à 400 KV, l'utilisation de ces tensions élevées est liée à un objectif économique. En effet pour une puissance donnée, les pertes en ligne par effet joule sont proportionnelles au carré de courant [18]:

$$P_{\text{ef}}=R.I^2 \quad \text{II.1}$$

Avec :

I : courant du réseau [A].

R : la résistance de la ligne [Ohm].

Le transport des puissances produites exige de fortes sections des conducteurs et la limitation des pertes par effet joule. L'idée, est de transformé le courant produit à des tensions élevées et réduire l'intensité pour résoudre le problème.

II.4.2. Le réseau de répartition

Comprend les lignes de transport et les postes de transformation intermédiaires entre le réseau de transport et le réseau de distribution. La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grandes centrales de consommation.

Ces centrales de consommation sont [17] :

- Soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution MT
- Soit du domaine privé avec l'accès aux abonnées à grande consommation livrés directement en HT.

Les tensions sur ces réseaux sont comprises entre 20kv et 270 kV, les protections sont de même nature que celles utilisé sur les réseaux de transport.

II.4.3. réseau de distribution

Comprend les lignes et les postes de transformation servant à alimenter les clients. Ce réseau est composé de deux parties, le réseau de distribution à moyenne tension et le réseau de distribution à basse tension.

- **Le réseau de distribution MT**

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de répartition aux points de moyenne consommation, ces points de consommation sont [19] :

- Soit du domaine public, avec accès aux postes de distribution publique MT/BT.

- Soit du domaine privé, avec accès aux postes de livraison aux abonnés à moyenne consommation.

La structure est de type aérien ou souterrain, les tensions sur ces réseaux sont comprises entre 10 à 30 kV.

- **Le réseau de distribution BT**

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution MT aux points de faible consommation. Ce réseau permet d'alimenter un nombre très élevé de consommateurs correspondant au domaine domestique. Sa structure, de type aérien ou souterrain, est souvent influencée par l'environnement.

Les tensions sur ces réseaux sont comprises entre 220 à 380 V, Ces réseaux sont le plus souvent exploités manuellement [19].

II.5. Les types de lignes

Le genre de ligne utilisée est imposé par les facteurs suivants :

- Puissance active à transporter.
- Distance de transport.
- Encombrement et facilité d'installation.
- Cout.

Nous distinguons alors quatre types de ligne :

- **Lignes de distribution BT**

Ce sont les lignes et la filerie installées à l'intérieur des édifices, usines et maisons pour alimenter les moteurs, cuisinières, lampes.....etc.

Dans certaine région métropolitaine, on utilise un réseau maillé comprenant une grille de câbles souterrains. Ce réseau maillé assure un service impeccable, car le bris d'un ou même de plusieurs câbles n'interrompt pas la distribution de courant aux clients [19].

- **Lignes de distribution MT**

Ce sont des lignes qui relient les clients aux postes de transformation principaux de la compagnie d'électricité [19].

- **Lignes de transport HT**

Ce sont les lignes reliant les postes de transformation principaux aux centrales de génération. Elles sont constituées de fils aériens ou de câbles souterrains fonctionnant à des tensions généralement inférieurs à 230 kV. Dans cette catégorie, on trouve aussi les lignes servant à échanger de l'énergie entre deux grands réseaux et à augmenter la stabilité de l'ensemble [19].

- **Lignes de transport THT**

Ce sont les lignes qui relient les centrales hydrauliques éloignées aux centres d'utilisation. On les place dans une catégorie distincte à cause de leurs propriétés spéciales, ces lignes peuvent atteindre des longueurs de 1000 km [19].

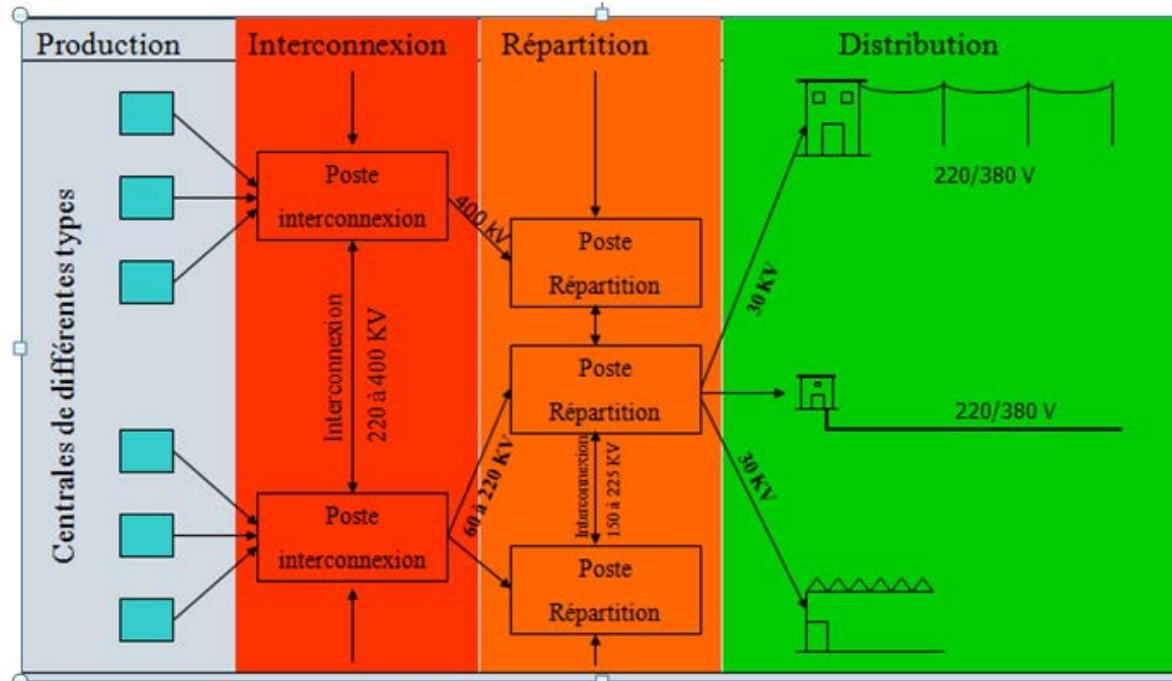


Figure II.4 : Architecture d'un réseau électrique

II.6. Principales types de défauts

Le problème de la protection des installations consiste à définir la nature des perturbations contre lesquels on doit se protéger, puis à choisir l'appareil capable de les détecter et capable de les supprimer.

Les principaux types de perturbation sont : les courts-circuits, les sursensions, les surcharges, déséquilibre et les oscillations [20].

II.6.1. Les courts-circuits

Ce type de défaut se manifeste lors d'une fausse manœuvre, ou lorsqu'un défaut d'isolation apparaît entre une phase du réseau et la terre, entre deux phases du réseau et la terre, ...etc.

Tableaux II.1 : les causes, nature, et les différentes conséquences de court-circuit [20].

Causes	<ul style="list-style-type: none"> • Contact entre conducteurs • Claquage d'isolants solides <ul style="list-style-type: none"> • amorçage par arc
Forme	<ul style="list-style-type: none"> • Monophasé • Biphasé • Triphasé
Nature	<ul style="list-style-type: none"> • auto-extincteurs <ul style="list-style-type: none"> • fugitifs • Semi permanents • Permanents
Conséquences	<ul style="list-style-type: none"> • Chute de tension : absence ou écrasement de tension chez les usagés <ul style="list-style-type: none"> • Surintensité : <ul style="list-style-type: none"> • Echauffements à l'endroit du défaut <ul style="list-style-type: none"> • Efforts électrodynamiques (barres, transformateurs) • Induction électromagnétique (tension induite dans les lignes de télécommunication)

II.6.2. Les surtensions

Une surtension est une impulsion ou une onde de tension qui se superpose à la tension nominale du réseau.

Elles peuvent apparaître :

- Entre phases ou entre circuits différents, et sont dites de mode différentiel
- Entre les conducteurs actifs et la masse ou la terre et sont dites de mode commun.

Leur caractère varié et aléatoire les rend difficiles à caractériser et n'autorise qu'une approche statistique en ce qui concerne leur durée, leurs amplitudes et leurs effets. Le tableau de la figure ci-dessous présente les différents types de surtension, leurs causes et conséquences [20]:

Tableau II.2 : Les différents types de surtension, leurs causes et conséquences [20].

A fréquence industrielle	Causes	-Mauvais réglage : centrale ou transformateur -Réseau à vide très important
	Conséquences	- Contraintes sur les isolants : vieillissement : risque de claquage (court-circuit) ; amorçage dans l'air (courant de suite) - Contraintes sur les circuits magnétiques : augmentation du courant magnétisant (saturation du fer, déclenchement), augmentation des pertes fer (échauffement par courants de Foucault). - contraintes sur les récepteurs : lampes incandescences, résistances, moteurs.
Surtension provoquée par défaut d'isolement (de choc)	Causes	-Apport brutal de charges électriques (coup de foudre direct) -induction électromagnétique : coup de foudre indirect, coupure brutale du courant en ligne (self-induction, manœuvres de disjoncteur.
	Conséquences	-risque accru de claquage des isolants (dans les transformateurs, air)

II.6.3. Les surcharge

Les surcharges sont provoquées par la mise sous tension des moteurs, transformateurs et appareils divers, ou lors de l'installation d'appareils trop puissants pour la ligne d'alimentation. Le prolongement de ces charges peut créer un échauffement nuisible à ces appareils.

- **Surcharges anormales**

Elles se manifestent quand la puissance des appareils installés est très élevée par rapport à celle de la ligne d'alimentation. Ces surcharges durent indéfiniment et elles provoquent un échauffement dangereux des appareils.

- **Surcharge normales**

Elles se produisent au démarrage des moteurs et au branchement des transformateurs entre autres ; celles là sont passagères.

II.6.4. Baisse de tensions

Les baisses de tensions peuvent aller jusqu'au manque de tension perturbant la bonne marche des appareils récepteurs. La baisse de tension a comme effet un mauvais fonctionnement excessif des conducteurs.

Les causes principales de la baisse de tension sont :

- Coupure d'une phase primaire d'un transformateur triphasé.
- Baisse de tension aux bornes des générateurs due à une surcharge.
- Alimentation au bout de la ligne.
- Fuite à la terre sur un réseau [20].

II.6.4.1 Effets des baisses de tension

- Diminution de flux lumineux des lampes.
- Diminution de la puissance des appareils de chauffage.
- Diminution de couple normal et de couple de démarrage des moteurs asynchrones.
- Augmentation des pertes par effet Joule.

II.7. Appareillage de protection

L'appareillage de protection électrique joue un rôle important dans les installations électriques, il est le garant de la protection des biens contre les surcharges et les courts circuits mais aussi de la protection des personnes contre les risques électriques.

Dans toute installation électrique, l'appareillage de protection assure les fonctions suivantes [21]:

II. 7.1. Appareillage utilisé contre les surtensions

Les appareillages utilisés contre les surtensions sont [20]:

- **Les parafoudres**

Les parafoudres sont des appareils de protection contre les surtensions.

Ils sont destinés à protéger les installations, et les appareils contre les coups de foudre directe ou indirecte.

Ils sont caractérisés par le pouvoir de :

- Limiter les défauts des contacts directs et indirects dans les installations.
- Réduire les valeurs de résistance de prise de terre.
- Réduire l'élévation du potentiel des masses.

- **Les éclateurs**

Ce sont des dispositifs de limitation de surtension.

Ils sont constitués par deux électrodes situées à l'air libre, l'une des électrodes est reliée directement à la ligne et l'autre à la terre.

II.7.2. Appareillage utilisé contre les surintensités

La protection contre les surintensités est assurée par des relais, des disjoncteurs et de coupe-circuit à fusible placée en tête du circuit à protéger.

- **Les relais**

Ce sont des appareils de surveillance des courants, destinés à déclencher une alarme ou provoquer l'interruption en cas de défaut [20].

II.7.3. Disjoncteur

Un disjoncteur est un interrupteur très perfectionné, capable de déclencher automatiquement en cas de défaut et de couper les courants de court-circuit. Il consiste l'appareil de sécurité par excellence, permettant la protection des machines et des réseaux contre les défauts. Il comporte toujours [20]:

- Des contacts fixes et des contacts mobiles
- Un dispositif de coupure de l'arc
- Un mécanisme de fermeture et le verrouillage des contacts mobiles
- Un mécanisme d'ouverture automatique de ces contacts (max de I)
- Des pôles auxiliaires de contrôle, de commande, d'asservissement
- Un châssis

II.7.4. Sectionneur

Les sectionneurs sont des appareils destinés à ouvrir ou fermer un circuit électrique à vide, ils ne possèdent aucun dispositif de coupure de l'arc.

Le sectionneur contient un ou trois pôles principaux portés par des isolateurs, un mécanisme de commande, un châssis et des contacts auxiliaires.

Ils servent à réparer et isoler par exemple, les lignes et les disjoncteurs des autres parties du réseau.

La manœuvre d'un sectionneur est toujours provoquée par l'opérateur, elle peut être [20] :

- manuelle et directe(BT)
- manuelle par perche (HTA)
- mécanique par tringleriez et poignée de manœuvre
- électrique, hydraulique ou pneumatique

II.7.5. Fusible

Un fusible est un appareil qui, par la fusion d'un ou de plusieurs de ses éléments, conçue et calibrés à cet effet, ouvre le circuit dans lequel il est installé en interrompant le courant lorsque celui-ci dépasse pendant un temps suffisant une valeur donnée.

II.8. Protection des personnes

La norme NFC 15 100 spécifie les modalités de protection contre les contacts :

- **La protection contre les contacts directs**

Un contact direct signifie tout contact d'une personne avec un conducteur ou des pièces conductrices sous tension.

Les mesures préventives contre ces contacts consistent à isoler les parties actives, leur éloignement à une distance suffisante, ou les rendre inaccessibles par l'emploi des barrières d'obstacles (capots, armoires,...etc.).

- **La protection contre les contacts indirects**

C'est le contact d'une personne avec une masse mise accidentellement sous tension, suite à un défaut d'isolement interne ou externe.

On peut se protéger contre les contacts inaccessibles des masses des éléments conducteurs, la mise à la terre des masses et l'emploi de dispositifs de coupures automatiques.

II.9. Prise de terre

La prise de terre est constituée d'une électrode en métal, bon conducteur qui ne craint pas la corrosion et qui est en bon contact avec le sol. L'électrode peut être de différents types avec les dimensions minimales indiquées [20]:

- Un ou plusieurs piquets enfoncés verticalement au-dessous du niveau permanent d'humidité à une profondeur minimale de 2m.
- Un câble enterré en cuivre nu de 25mm^2 ou en acier galvanisé de 95mm^2 .
- Un feuillard en acier de 100mm^2 et 3mm d'épaisseur ou un câble de 95mm^2 , noyé dans le béton de propreté des fondations.

Une bonne prise de terre doit avoir une résistance électrique déterminée en fonction de la sensibilité du dispositif différentiel de l'installation de la maison.

Avec un disjoncteur de branchement différentiel de 500mA, la résistance maximale de la prise de terre doit être de 100ohms ($U \leq 50\text{V}$ milieu sec, $U \leq 25\text{V}$ milieu humide).

II.10. Influence des systèmes photovoltaïque sur le réseau de distribution

Le raccordement des installations photovoltaïques au réseau peut avoir des impacts important sur son fonctionnement. Les influences les plus significatives des systèmes PV sur le réseau de distribution sont les suivants [16] :

- **Influence sur le plan de tension**

La présence de générateur PV a une influence sur le plan de tension et sur les dispositifs de réglage du réseau. La tension varie en fonction des injections de puissance active et réactive sur le réseau [16]. En particulier pendant une période de fort ensoleillement et de faible consommation, la tension de certains nœuds du réseau peut dépasser le seuil admissible. L'injection d'énergie sur le réseau fait croître la tension jusqu'à un seuil provoquant le découplage de certains dispositifs.

- **Influence sur le plan de protection**

La contribution des systèmes photovoltaïque au courant de défaut dans le réseau de distribution a des conséquences faibles sur le plan de protection du départ en défaut. Mais la sensibilité et la sélectivité des protections du réseau peuvent être affectées et provoquer le déclenchement de la protection du départ en défaut.

- **Influence sur la qualité de l'énergie**

Déséquilibre entre phases : l'insertion des systèmes PV engendre un déséquilibre entre phases en cas d'utilisation d'onduleurs monophasés. Si la puissance produite n'est pas correctement répartie entre trois phases d'un même système PV triphasé, alors ce système va contribuer à déséquilibrer le réseau BT. Ce phénomène a été mis en évidence dans plusieurs études. [21]

Injection d'harmoniques de courant : la présence d'interfaces électronique de puissance peut injecter des harmoniques de découpage au réseau si les onduleurs ne sont pas munis de filtres efficaces. Les onduleurs actuels contribuent tout de même à l'augmentation des harmoniques de courant car ils fonctionnent le plus souvent à puissance réduite (un appareil fonctionnant à puissance réduite ne peut fournir la même qualité de courant qu'à puissance nominale) [16].

Les conséquences de ces harmoniques peuvent être instantanées sur certains appareils électronique : trouble fonctionnels (synchronisation, commutation) disjonctions intempestives,...).

- **Influence sur les pertes dans les réseaux de distribution**

Généralement les installations PV de plusieurs MW, raccordées sur de départs HTA dédiés, conduiraient à une augmentation des pertes et que les installations PV de type résidentiel, plus proche des lieux de consommation, permettraient de réduire des pertes.

II.11. Influence du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques

Le fonctionnement et les perturbations de réseaux de distribution peuvent influencer le fonctionnement normal des systèmes PV. Ceci provient généralement, soit des caractéristiques intrinsèques des réseaux de distribution, soit de la qualité de tension dégradée par d'autres utilisateurs du réseau, soit d'une association de ces deux causes [21]. Ces effets entraînent généralement des découplages injustifiés des onduleurs.

Les influences du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïque peuvent se résumer comme suit [16] :

- **Régime de neutre et courants de fuite**

En Algérie, le régime de neutre utilisé en basse tension est de type TT. Avec ce régime, la protection des personnes s'effectue à l'aide de disjoncteurs ou d'interrupteurs différents qui ont pour fonction de s'ouvrir en cas de fuite de courant. Ces courants de fuite peuvent être d'amplitude importante et devenir potentiellement dangereux pour les personnes en cas de contact direct avec le fil de terre.

- **Niveau de tension du réseau**

Le niveau initial (hors PV) de tension du réseau est un paramètre clé-à-vis du dimensionnement et du fonctionnement des installations PV et les types de protection de découplage.

- **Creux de tension et tenue des systèmes PV**

Les creux de tension sont considérés comme les plus graves perturbations de la qualité de service en raison de leurs effets sur les processus sensibles. Leur profondeur et leur durée varient en fonction des caractéristiques du réseau et des groupes de production qui y sont raccordés.

- **Présence de composante continue et d'harmoniques de tension**

Les onduleurs pour systèmes photovoltaïques hachent de courant continu issu des modules PV en modulation à largeur d'impulsion (MLI ou PWM) pour le convertir en courant alternatif sinusoïdal.

- **Inter harmoniques**

Les inter-harmoniques (fréquences qui ne sont pas un multiple entier de la fréquence de réseau) sont produits par des variations rapides des charges, ou la saturation des transformateurs.

Les inter-harmoniques créent des perturbations sévères sur les dispositifs de mesures de la fréquence et de l'impédance du réseau.

II.12. Raccordement des systèmes PV au réseau basse tension

Le raccordement des installations de production aux réseaux publics de distribution fait référence à plusieurs qui à mener lors d'une demande de raccordement.

II.12.1. Sécurité des biens et des personnes

Toute installation de production doit disposer par conception d'une fonction de protection dite « protection de découpage », permettant de la séparer automatiquement du réseau public de distribution d'électricité en cas d'un défaut de dépassement du courant de court-circuit, au-delà de la limite que les matériels BT peuvent supporter.

II.12.2. Tension de raccordement

L'aptitude de l'installation de production à fonctionner dans les conditions normales de tension ; la tension au point de livraison ne s'écartant pas de la tension contractuelle (et une fréquence comprise entre 48Hz et 53Hz).

L'aptitude de l'installation de production à rester en fonctionnement lorsque la fréquence ou la tension sur le réseau public de distribution d'électricité atteint des valeurs exceptionnelles pendant des durées limitées. [16]

Le gestionnaire du réseau public de distribution d'électricité identifie l'éventuel impact que le raccordement de l'installation de production pourrait avoir sur [16] :

- L'intensité maximale admissible dans les ouvrages du réseau public de distribution d'électricité.
- le pouvoir de coupure des disjoncteurs, la tenue thermique et la tenue aux efforts électrodynamiques des ouvrages du réseau public de distribution d'électricité ainsi que, d'une façon générale, sur le fonctionnement des dispositifs de protection de ce réseau.
- Le niveau de la tension au point de livraison de l'installation de production.
- Le niveau de la tension aux points de livraison des autres utilisateurs du réseau public de distribution d'électricité déjà raccordés, y compris les postes HTA/BT.
- Le fonctionnement du plan de protection du réseau public de distribution d'électricité

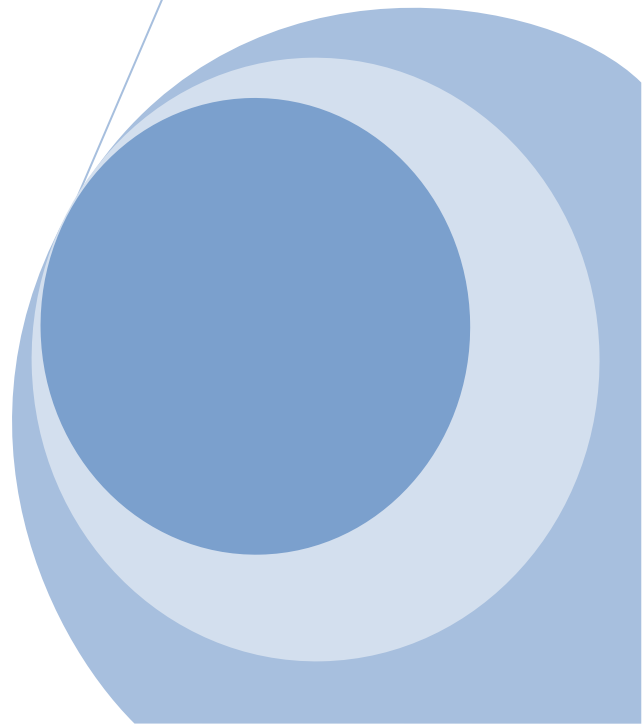
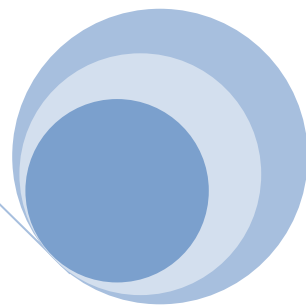
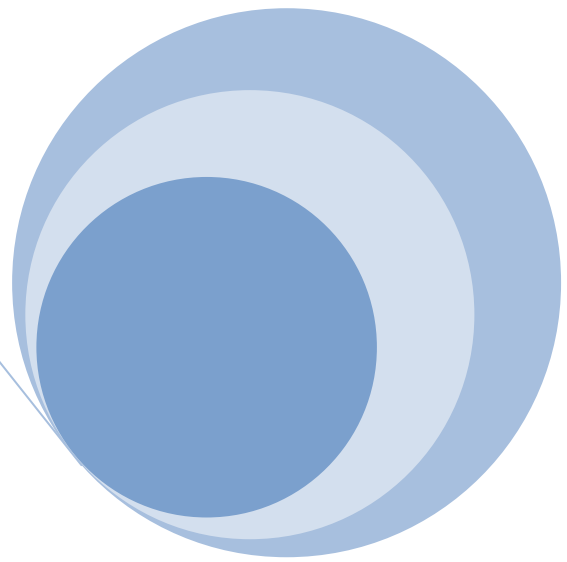
Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons énuméré un aperçu sur les réseaux électriques en générale à savoir les réseaux haute tension, moyenne tension et basse tension. Ces réseaux sont très importantes et très sensibles, ce qui nécessite une protection contre les différents types d'anomalies telles que les court-circuits, les surtensions, les surintensités, ...etc.

Les équipements de protection des réseaux moyenne et haute tension assurent une fonction de sûreté primordiale. Ils doivent garantir la protection des matériels et des personnes tout en assurant la disponibilité de l'énergie. Leurs dysfonctionnements peuvent infliger aux exploitants des pertes financières élevées. Il est donc essentiel qu'ils répondent à de hautes exigences de fiabilité, sécurité et disponibilité.

CHAPITRE

**Topologie d'un onduleur adapté
au centrale PV**



III.1. Introduction

Dans une centrale photovoltaïque connectée au réseau électrique, l'onduleur est un élément important dans la conversion de l'énergie continue produite par les modules PV en une énergie alternative, qui sera injectée dans le réseau. De multiples efforts de recherche et développement dans le domaine de l'électronique de puissance, ont été développés dans le but d'améliorer les performances techniques. De nombreux onduleurs de tous types ont été développés pour augmenter le rendement et la rentabilité de la centrale photovoltaïque pour améliorer la qualité de l'énergie injectée au réseau [22].

Dans ce chapitre nous présenterons différentes topologies d'onduleur adaptées aux centrales PV.

III.2. Principe de fonctionnement d'un onduleur PV

Un onduleur photovoltaïque doit remplir plusieurs fonctions essentielles dans une installation photovoltaïque raccordée au réseau [22].

- L'onduleur connecté au réseau est un convertisseur de puissance permettant de convertir le courant et la tension continue (CC), produit par le générateur photovoltaïque en courant ou tension alternatif (CA), qui doit être compatible avec le réseau. Il doit être capable de supporter le courant et la tension maximum du champ photovoltaïque.
- La protection de découplage.
- Le contrôle de l'isolement de la partie CC de l'installation photovoltaïque.
- L'onduleur est caractérisé aussi par un temps d'enclenchement automatique très rapide pour une insolation faible.
- La possibilité de limiter la puissance injectée dans le réseau selon la consigne de l'exploitant.
- Haute qualité et précision dans la recherche du point de puissance maximale.
- Le taux d'harmonique de courant injecté THD est inférieur à 3%.
- L'armoire de l'onduleur doit posséder un degré de protection élevé adapté à la région de l'installation.

On distingue des onduleurs de tension et des onduleurs de courant, et cela en fonction de la source d'entrée continue, source de tension ou source de courant.

- **onduleur de tension** : un onduleur qui est alimenté par une source de tension continue, c'est-à-dire par une source d'impédance interne négligeable ; sa tension u n'est pas affectée par les variations du courant i qui la traverse. La source continue impose la tension à l'entrée de l'onduleur et donc à sa sortie [23].

- **onduleur de courant** : (souvent appelé commutateur de courant) est alimenté par une source de courant continu, c'est-à-dire par une source d'inductance interne. La source continu impose le courant à l'entrée du convertisseur et donc à sa sortie [23].

III. 3. Critères de choix

Il existe plusieurs critères qui vont intervenir dans le choix de cet appareil électronique sophistiqué [23] :

- Une qualité élevée limitant les pannes et interventions sur site.
- Un service local efficace.
- Une bonne facilité de montage.
- Un paramétrage aisé au démarrage.
- Des interfaces permettant le suivi à distance.
- La réputation du fabricant est encore un paramètre important.

III.4. Différentes technologies d'onduleur pour système photovoltaïque

Il existe différentes technologies et topologies disponibles pour les systèmes PV connectés au réseau qui sont classés en fonction du nombre d'étages de puissance. Dans les applications de centrales photovoltaïques, divers concepts technologies sont utilisées pour connecter le générateur PV au réseau électrique [8]. Chaque technologie a ses avantages et inconvénients par rapport à d'autres, on peut distinguer :

- **Onduleur modulaires (module inverter)**

C'est une technologie constituée de modules solaire simples connectés au réseau par le biais d'un onduleur. Un meilleur rendement est obtenu par rapport aux onduleurs mono chaîne car un MPPT est mis en œuvre pour chaque module [11]. En intégrant le module PV et l'onduleur dans un seul appareil, le module photovoltaïque devient un dispositif pose, et il peut être utilisé par des personnes sans aucune connaissance en installation électrique. Le concept des onduleurs modulaires ne s'applique principalement qu'aux applications PV d'une puissance allant de 50 W à 400W. Le tableau suivant récapitule les caractéristiques d'un onduleur modulaire [23] :

Tableau III.1. Les caractéristiques d'un onduleur modulaire.

Onduleur modulaire (Module inverter)
<ul style="list-style-type: none"> - Topologie simple. - Applications résidentielles à petite échelle. - Modules avec convertisseur DC / DC et onduleurs individuels. - Chaque unité de module a des fonctions indépendantes. - Haut rendement. - Conception flexible.

- **Onduleurs centralisés (central inverter)**

Un onduleur centralisé de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de cellules solaires en courant alternatif. Dans chaque chaîne une diode anti-retour placée en série avec les modules pour éviter le retour du courant inverse et aussi éviter les pertes dans les câbles. Pour cette architecture, les panneaux photovoltaïques sont connectés en parallèle à un onduleur central. Cette configuration est utilisée pour les centrales électriques triphasées, avec des gammes de puissance entre 10 et 1000 kW.

Le principe avantage d'onduleur centraux est le haut rendement (faible pertes dans l'étape de conversion de puissance) et le faible cout en raison de l'utilisation d'un seul onduleur.

Les inconvénients de cette topologie sont les longs câbles DC pour connecter les modules PV à l'onduleur et les pertes causées par des diodes an- retour dans les chaines [22].

Tableau III.2. Les caractéristiques d'un onduleur Central.

Onduleur central (centralized inverter)
<ul style="list-style-type: none"> - Application dans les systèmes photovoltaïques triphasés. - Puissance ≥ 10 kW. - Raccordement des modules à un bus de courant continu. - Pertes de forte puissance. - Tension suffisamment élevée pour éviter l'utilisation de transformateurs ou convertisseurs DC/DC. - Pour les applications de forte puissance (quelques MW) plusieurs onduleurs sont mis en dérivation. - Facteur de puissance entre 0.6 et 0.7 [10]

- **Onduleurs mono- chaîne (string- inveter)**

La connexion en série des modules est appelée une chaîne. La tension d'une chaîne PV peut être comprise entre 150 V et 1000 V pour des systèmes PV connectés au réseau. L'onduleur mono- chaîne, est une version réduite de l'onduleur centrale, Ou une seule de modules PV est reliée à l'onduleur. La tension d'entrée peut être suffisamment élevée pour éviter l'amplification de tension. [23]

Pour cette topologie, chaque chaîne a son propre onduleur et donc les diodes By-pass sont éliminées conduisant ainsi à une réduction des pertes totales des systèmes.

L'intérêt dans ce concept est d'utiliser un plus grand nombre d'onduleurs du même type. Cela réduit les coûts de production et apporte un intérêt supplémentaire : si un onduleur tombe en panne, seule la production de la rangée concernée est défaillante. Le tableau suivant présente les caractéristiques d'un onduleur mono-chaîne [23]:

Tableau III.3. Les Caractéristiques d'un onduleur mono-chaîne

Onduleur mono-chaîne (String inverter)
<ul style="list-style-type: none">- Petites applications domestiques.- Puissance allant de 0,5 kW à 1 kW.- version réduite de l'onduleur central avec une chaîne reliée à un onduleur, ce qui facilite le MPPT.- Configuration très flexible.- Chaque groupe a une orientation différente de l'espace.- Travail en parallèle de plusieurs onduleurs augmente la fiabilité du système.

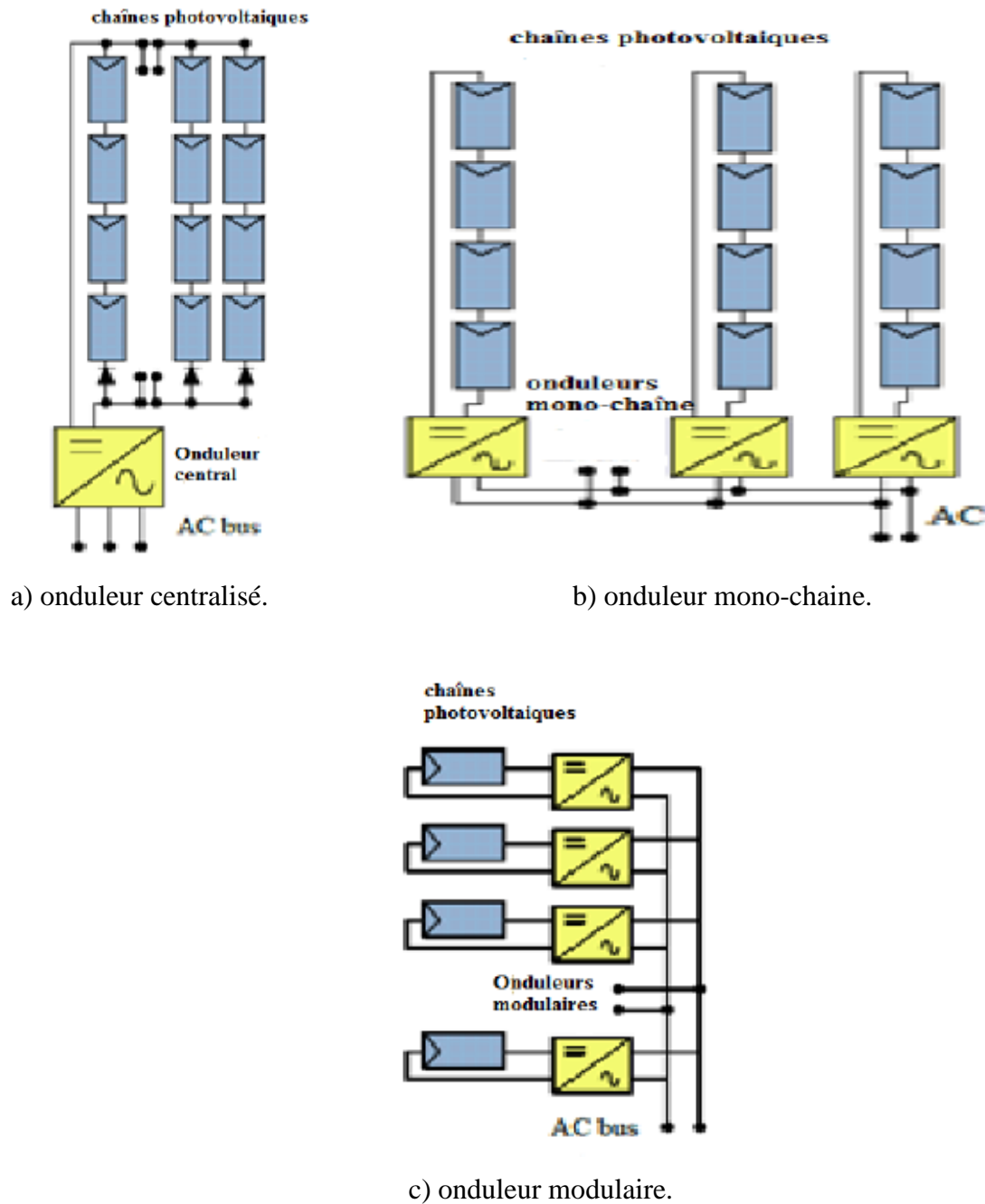


Figure.III.1. Différents types d'onduleur pour le PV [11].

III.5. Classification des onduleurs pour systèmes photovoltaïques

Qu'ils soient monophasés ou triphasés, les topologies d'onduleur sont classées sur la base du nombre d'étages de traitement de puissance, l'emplacement des condensateurs de découplage de puissance, s'ils emploient des transformateurs ou non et les types de l'interface réseau [24].

III.5.1 Classification selon le type du système photovoltaïque

Les onduleurs se classent selon le type du système photovoltaïque.

III.5.1.1. L'Onduleurs pour installation autonomes

Dans les installations autonomes familiales, la plupart des appareils fonctionnent directement sur le circuit continu de la batterie (12, 24, ou 48V). L'usage d'un onduleur occasionne des pertes importantes, et devrait être réservé aux appareils non disponibles sur le marché en version courant continu, ou à l'emploi occasionnel d'appareil standard.

La gamme de puissance des onduleurs domestiques va de 100 à 2000W. Ils fonctionnent avec une tension d'entrée fixe, et une puissance de sortie variable selon la charge. La forme du signal peut être carrée, trapézoïdale ou sinusoïdale. Pour une utilisation prolongée, la consommation à vide est un facteur déterminant [24].

III.5.1.2. Onduleur raccordés au réseau

Les onduleurs pour la connexion au réseau ont une puissance nominale d'environ 2 MW, Ils fonctionnent généralement en 230V monophasé, alors qu'au-dessus, ils doivent être triphasés (basse ou moyenne tension). Etant connecté directement sur le champ photovoltaïque, leurs tension et leurs courant d'entrée sont donc très variables avec les conditions d'ensoleillement et de température ambiante.

L'une des fonctions importantes de l'onduleur réseau est donc la recherche du point de puissance maximum MPPT (Maximum Power Point Tracking), c'est-à dire l'adaptation permanente de l'impédance d'entrée afin d'optimiser, à chaque instant, le produit $P=U*I$ sur la caractéristique du champ photovoltaïque. L'onduleur doit ensuite construire une (ou trois) tension(s) sinusoïdale(s) correspondant aux normes requises par le réseau. Les impératifs techniques suivants doivent alors être satisfaits [24] :

- Une parfaite synchronisation avec le réseau.
- Déclenchement automatique en cas de coupure du réseau.
- Limitation de la tension de sortie à la valeur maximale admissible pour le réseau.
- Ne pas occasionner de déphasage important.
- Faible taux de fréquences harmoniques (signal proche de la sinusoïde).
- Faibles perturbations électromagnétique (hautes fréquences).
- Insensibilité aux signaux de commande du réseau.
- L'isolation galvanique (entre le champ et le réseau) est souhaitable.
- Les onduleurs sans transformateur.

III.6. Onduleur avec transformateur BF-onduleur en pont avec transformateur

- Les modules photovoltaïques sont raccordés en entrée de l'onduleur via un filtre qui élimine les interférences électromagnétiques (filtre EMI – non représenté sur le schéma).
- Un pont des transistors IGBT convertit ensuite le courant continu (DC) fourni par les convertisseurs DC/DC en courant alternatif(AC) en utilisant la technique de largeur d'impulsion MLI dont le fondamental est à la fréquence de 50 Hz.
- Un filtre élimine les harmoniques à hautes fréquence pour obtenir une onde sinusoïdale.
- transformateur basse fréquence augmente la tension à la sortie de l'onduleur jusqu'au niveau de la fréquence du réseau et assure une isolation galvanique PV et le réseau.
- Enfin, les interférences sont une dernière fois filtrées en sortie de l'onduleur [24].

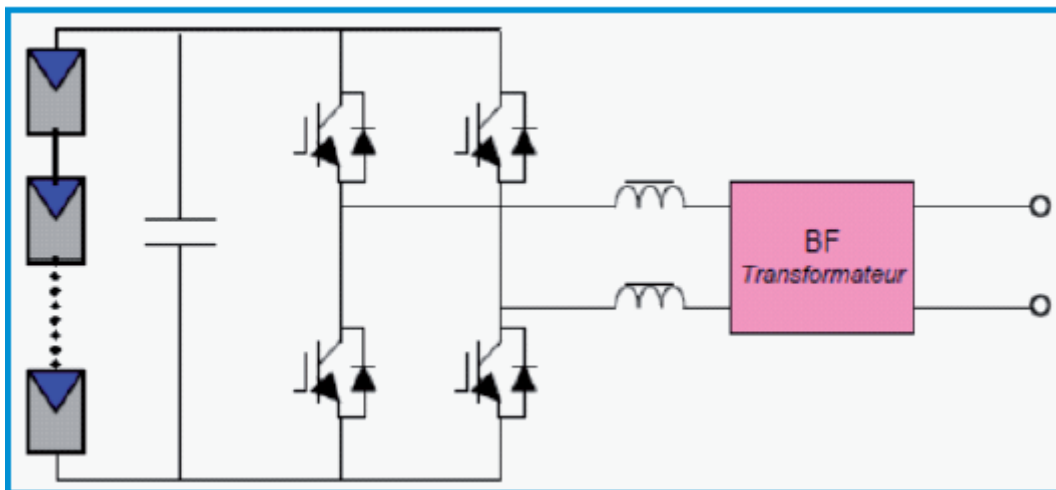


Figure III.2. Onduleur en pont avec transformateurs BF [24]

III.7. Onduleur avec transformateurs HF- onduleur en pont avec convertisseur DC/DC flyback et transformateur HF

La tension du générateur PV passe par un convertisseur DC/DA qui se compose :

- D'un convertisseur flyback convertissant le courant continu DC fourni par les panneau PV en courant continu avec un niveau de tension désiré en utilisant la technique de modulation de largeur d'impulsion avec une fréquence de découpage de 16 à 20 kHz.
- D'un transformateur HF augmentant la tension à niveau de tension nécessaire pour l'onduleur et assure une isolation galvanique.
- D'un pont redresseur transformant le courant alternatif HF en courant continu.

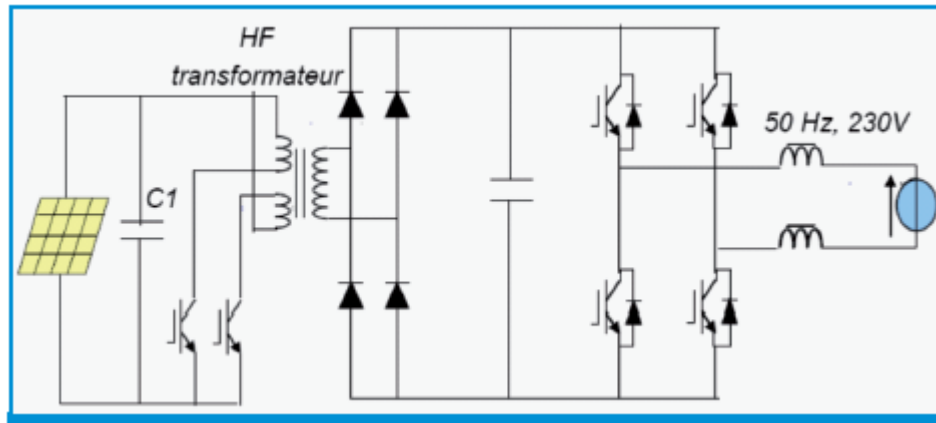


Figure III.3. Onduleur en pont avec transformateur HF [24].

Après filtrage, un pont de transistors IGBT convertit ensuite le courant continu (DC) fourni par le convertisseur DC/CD en courant alternatif (AC) en utilisant la technique de modulation de largeur d'impulsion dont le fondamental est à la fréquence de 50 HZ. Enfin, les interférences sont une dernière fois filtrées en sortie de l'onduleur [24].

La figure (III.4) Montre comment un signal formé de créneau de largeur variable peut ne différer d'une sinusoïdale que par des harmonique de fréquence élevée.

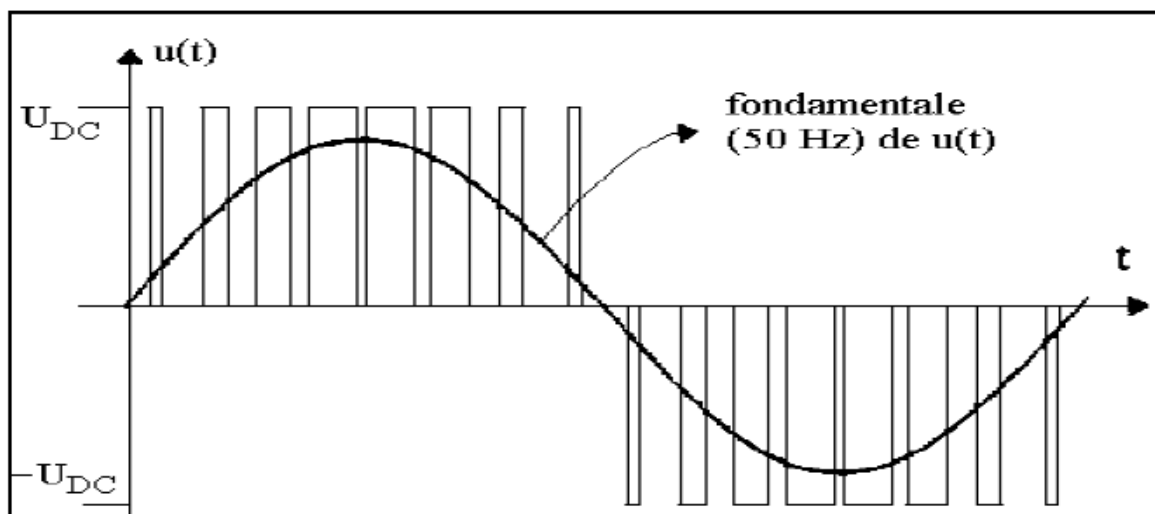


Figure III.4. Principe de signaux sinusoïdaux en électronique de puissance.

III.8. Onduleur sans transformateur-onduleur en pont sans convertisseur DC/DC

Les onduleurs sans transformateurs sont des onduleurs photovoltaïques dont la technologie est à venir. Cela est dû au fait que les transformateurs fonctionnant à la fréquence du réseau sont encombrants et coûteux et produisent des pertes. En outre, le transformateur limite la liberté de contrôler le courant injecté au réseau [24].

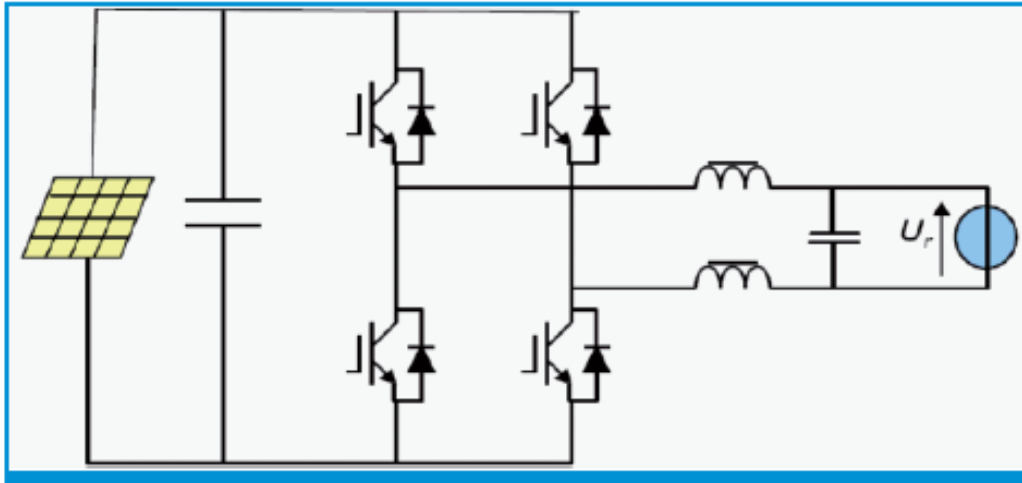


Figure III.5. Onduleur sans pont sans transformateur [24].

Une façon d'omettre, le gros transformateur est de fonctionner à des fréquences plus élevées. Les topologies HF, sont une bonne solution lorsque l'isolement galvanique est nécessaire. Chaque fois que l'isolement galvanique n'est pas important, les onduleurs PV sans transformateur deviennent plus intéressants. Se sont des topologies simples, ont des rendements plus élevés et sont moins chers.

On distingue deux catégories d'onduleur qui dépendent de la puissance du champ photovoltaïque installé :

III.9. Onduleur monophasé

Selon leur topologie, ce type d'onduleur est généralement destiné aux [25] :

- **Onduleur monophasé en demi- pont**

Le schéma de principe d'un tel onduleur monté en demi- pont est montré sur la figure suivante :

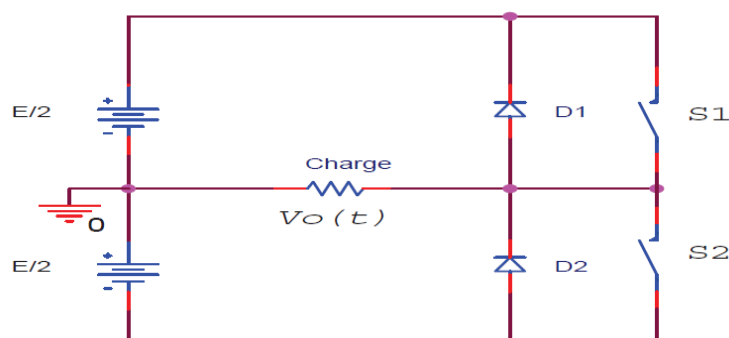


Figure III.6. Schéma principale d'un onduleur monophasé en demi- pont

Il est constitué principalement de deux interrupteurs de puissance notés S1 et S2 à commande complémentaire. La durée de conduction de chacun des interrupteurs est alors d'un demi-cycle (180°) correspondant à la fréquence du signal de sortie requis.

Lors de la fermeture de l'interrupteur S1, la tension aux bornes de la charge serait donc de $+E/2$, et prend la valeur $-E/2$ quand le second interrupteur S2 fermé.

Les diodes D1 et D2 dites de récupération, assurent la conduction d'un courant négatif en cas de déphasage de ce dernier par apport à la tension aux bornes de la charge [25].

- **Onduleur monophasé en pont**

Il comporte quatre interrupteurs de puissance désignée par S1, S2, S3 et S4 sont fermés simultanément la tension imposés aux bornes de la charge prend la valeur $+E$ et de $-E$ lors de la fermeture simultanée des deux autres interrupteurs S3 et S4. Deux interrupteurs du même bras ne peuvent pas conduire simultanément, à cause d'un court circuit de la source de tension [25].

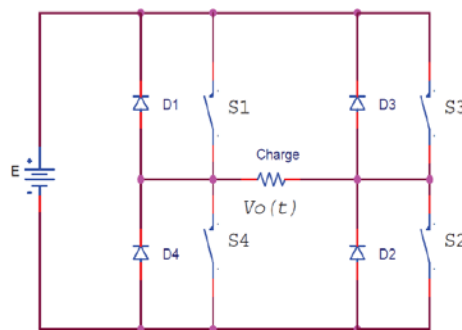


Figure III.7. Schéma principale d'un onduleur monophasé en pont.

III.10. Onduleur triphasé

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance. La structure de ce convertisseur se fait par l'association, en parallèle de trois onduleurs monophasés en demi-pont ou un pont donnant trois tensions de sortie déphasées de 120° , l'une par apport à l'autre [25].

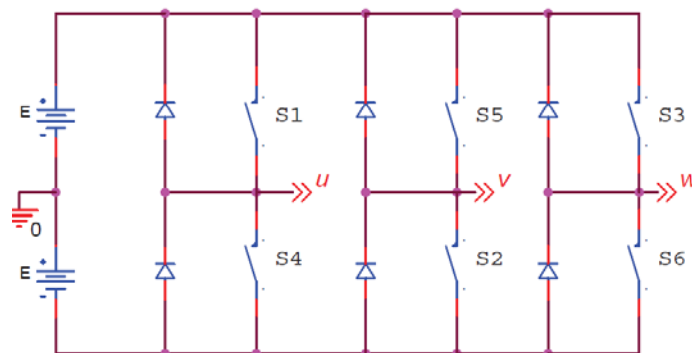


Figure III.8 Schéma principale d'un onduleur triphasé en pont

- **Topologie des onduleurs triphasés**

Un problème général qui se pose lors de la conversion DC/AC vient du fait qu'un circuit alternatif monophasé ne peut transmettre qu'une puissance fluctuante, puisque la puissance transmise s'annule chaque fois la tension ou le courant s'annulent, donc au moins deux fois par période (**figure III.9**) [25].

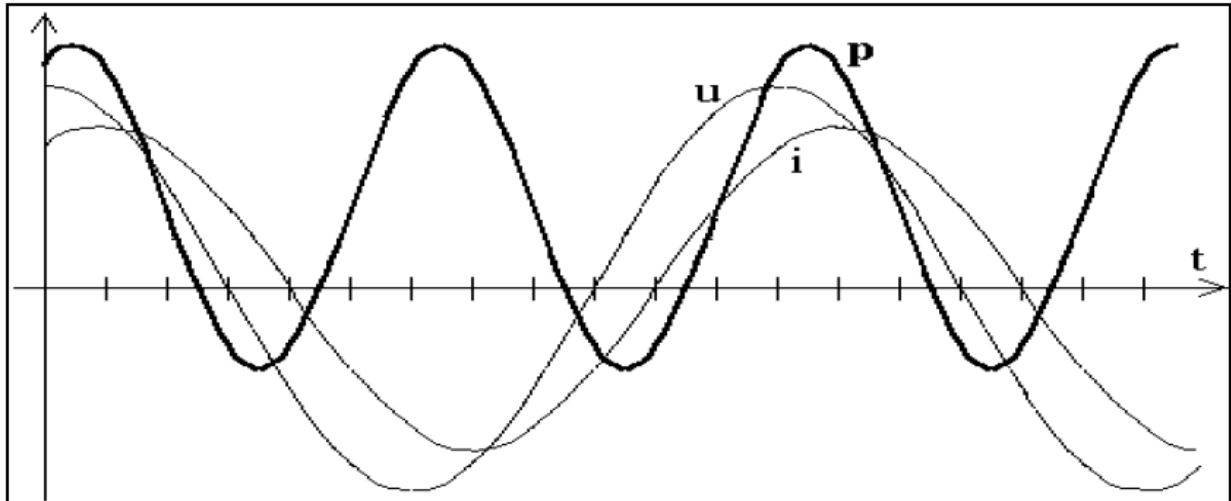


Figure III.9. Évolution de la puissance dans un circuit alternatif.

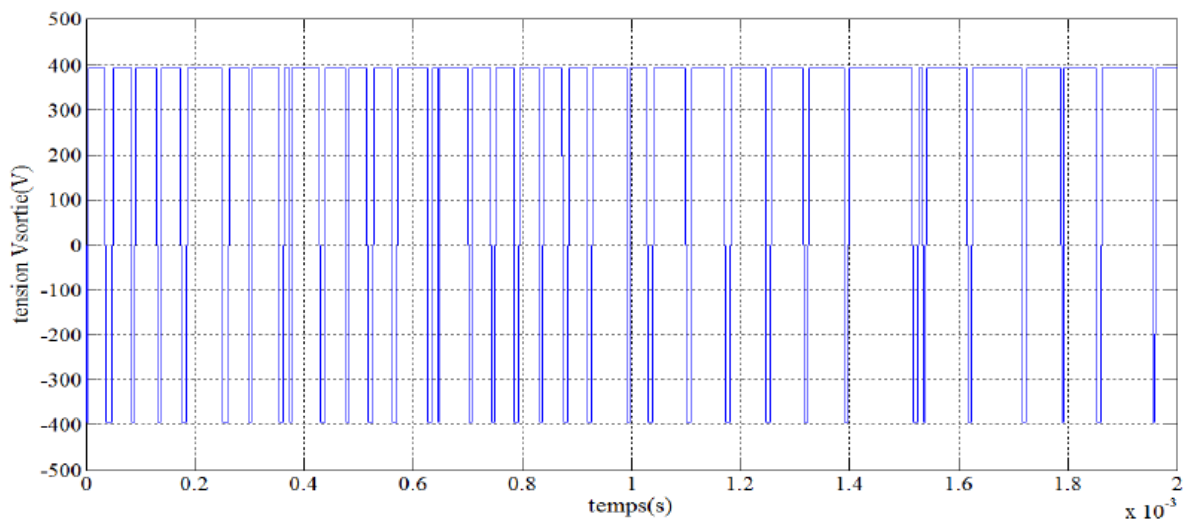


Figure III.10. La tension de sortie de l'onduleur avant le filtre.

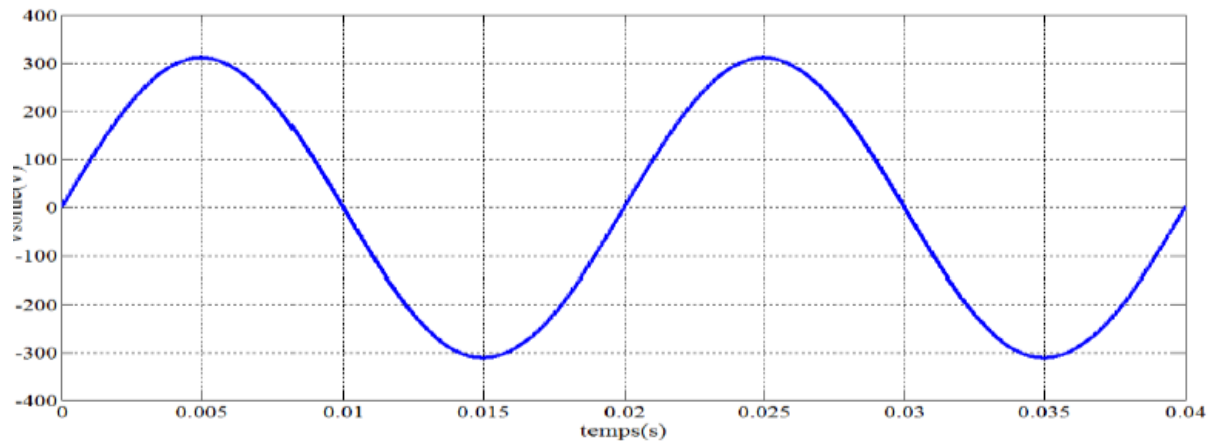


Figure III. 11. Tension de sortie de l'onduleur après le filtre.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques caractéristiques des onduleurs pour les systèmes photovoltaïques. Nous avons mentionné leurs types (autonomes ou non autonome), leurs configurations, rendement et le critère d'un choix d'onduleur et leurs fonctionnements. Selon la forme de la tension de sortie, ils pourraient être rectangle ou en forme de sinus.

The page features several decorative elements: a large blue circle with a gradient in the top right, a smaller similar circle below it, and a large blue circle with a gradient in the bottom right. Thin blue lines cross the page diagonally. A horizontal grey line is positioned below the word 'CHAPITRE'.

CHAPITRE

**Dimensionnement d'une
centrale PV de Naâma 20
MW raccordée au réseau**



Chapitre VI Simulation d'une centrale PV de Naâma 20MW raccordée au réseau

VI.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons dimensionner une centrale photovoltaïque raccordée à un réseau de puissance 20MW. Après avoir donné toutes les caractéristiques des panneaux photovoltaïques, de l'onduleur, ainsi que les caractéristiques climatiques du site (Naâma, Algérie), nous présentons les résultats obtenus après une simulation à l'aide du logiciel PV SYS []. Les principaux résultats sont la puissance (énergie), la trajectoire de soleil, les pertes générées par l'installation.

VI.2. Présentation de la centrale de Naâma

L'installation photovoltaïque de Naâma sera raccordée au réseau de la société Algérienne de gestion du réseau de transport de l'électricité (GRTE) au niveau de la sous-station PS Naâma, sur le jeu de barres 60 kV.

La tension de fonctionnement de la centrale photovoltaïque de Naâma est de 30 kV, une sous-station est donc nécessaire afin d'élever la tension à 60 KV. Concernant le raccordement de l'installation au réseau, Belectric a été chargé de la réalisation d'une évaluation d'impact sur le réseau avec une analyse de la configuration du projet.

L'objectif principal de cette étude est de déterminer la conformité avec les exigences techniques de l'exploitation du réseau en Algérie et l'impact sur le réseau en lui-même. Les données et les caractéristiques d'équipement du réseau ont été fournies directement par GRTE.

L'installation PV Naâma est composée de dix supports fixes photovoltaïque à double onduleur 2×800 KVA, raccordés à une station de collecte par biais de câbles souterrains. Le réseau électrique AC dispose d'une configuration avec deux boules de 5 supports d'onduleurs, chacun des supports étant composé de deux modules d'onduleur parallèles SMA SC800CP XT. chacune des boucles recueille la puissance de 5 transformateurs 1800 KVA 30/0,360 KV via 5 unités RUM dans la station de collecte de l'installation PV.

VI.3. Modèle de simulation

Les circuits du réseau électrique ainsi que les données du réseau, comme par exemple la puissance de court circuit sur les jeux de barres sélectionnés, les valeurs de charge et les caractéristiques techniques des transformateurs ont été modélisées conformément.

Un élément de réseau externe a été utilisé pour représenter la participation du réseau, sous forme de source de tension avec une impédance interne, ce qui correspond à une représentation simplifiée du réseau vu depuis le circuit. Cet élément utilise le bus Slack (bus

Chapitre VI Simulation d'une centrale PV de Naâma 20MW raccordée au réseau

de référence) sur lequel le point de consigne de tension et l'angle de référence sont exprimés en degrés.

VI.3.1 Type de l'onduleur

En leur qualité de dispositifs de commutation non linéaires, les onduleurs de l'installation PV ont été sélectionnés en utilisant des éléments de systèmes photovoltaïques équivalents, qui prennent également en charge la fonction d'analyse harmonique du logiciel.

Les caractéristiques techniques utilisées pour le type de l'onduleur utilisé pour la simulation, ont été mesurées directement sur un modèle d'usine fourni par le fabricant.

Le tableau (VI.1) représente les caractéristiques d'un onduleur sunny central 800CP- JP.

Tableau VI.1 : caractéristique technique d'un onduleur Sunny central 800CP-JP [26].

Caractéristiques techniques	Sunny Central 800CP-JP
Entrée (DC)	
Puissance DC max.($\cos\phi=1$)	898 W
Tension d'entrée max	1000 V
Tension d'entrée minimale/ U_{mpp} min pour $I_{mpp}<I_{DCmax}$	535 V / 535V
Plage de tension MPP (25°C/50°C pour 50Hz)	583 V-850 V/583 V-850 V
Plage de tension MPP (25°C/50°C pour 60Hz)	530 V-850 V/530 V-850 V
Tension d'entée assignée	641 V
Courant d'entée Max	1400 A
Nombres d'entrées MPP indépendantes	1
Nombres d'entrées DC	9
Sortie (AC)	
Puissance assignée 25°C/puissance nominale AC 50°C	88 KVA/ 800 KBA
Tension nominale AC/plage de tension nominale AC	360 V/324 V-414 V
Fréquence/tension du réseau assigné	50Hz/360 V
Courant de sortie Max	1411 A
Taux distorsion harmonique Max	< 3%
Facteur de puissance à la puissance assignée/facteur de déphasage réglable	1/ 0.9 inductif.....0.9 capacitif

VI.4.1Modèle du transformateur

Les transformateurs à trois enroulements 1800 KVA 30/0,360 KV de l'installation PV ont été utilisée conformément à la fiche technique présentées dans le tableau suivant :

Chapitre VI Simulation d'une centrale PV de Naâma 20MW raccordée au réseau

Tableau VI.2. Transformateur à trois enroulements [26]

Type		DNTG 1800 H/30
Capacité nominale	[kVA]	1800
Capacité secondaire	[kVA]	900 / 900
Tension nominale	[kV]	30
Tension secondaire	[kV]	0,360 / 0,360
Courant nominal HT	[A]	31,5
Courant secondaire	[A]	945 / 945
Plage de réglage HT		+15%, +2x, -1x 2,5%
Niveau d'isolement	[kV]	36 / 1,1 / 1,1
Couplage		Dy11y11
Méthode de refroidissement		KNAN
Fréquence	[Hz]	50
Tension de court-circuit 75°	[%]	6
Pertes à vides	[kW]	2
Pertes en charge à 75°	[kW]	15

VI.5. Présentation du logiciel PVSYST

PVSYST est un logiciel développé par l'université de Genève, il fait la conception technique d'une installation de forte puissance connectée au réseau électrique. En vue de déterminer le comportement du système suivant sa base de donnée avec le site géographique. Ce logiciel, étudie le dimensionnement de panneaux solaires permettant d'obtenir diverse informations telles que la production d'énergie, l'irradiation et le coût de l'installation, la surface nécessaire, ou la production annuelle d'énergie.

Le logiciel comprend principalement deux modes de fonctionnement, le premier est une application de pré dimensionnement assez simple à prendre en main et accessible. Le deuxième permet une étude approfondie et prend en compte beaucoup plus de paramètre. De plus il se base sur les matériels concrets pour ces calculs, contrairement au premier mode qui effectue ses calculs pour un cas très général.

Pour chacune des deux modes, le principe est le même on donne d'abord la localisation géographique de l'installation, puis en rentre les données concernant l'installation [27].

Chapitre VI Simulation d'une centrale PV de Naâma 20MW raccordée au réseau

VI.5.1. Simulation avec logiciel PVSYST

Pour lancer la simulation de logiciel PVSYST il faut :

- Choix du site.
- Potentiel solaire du site, en premier lieu il faut se procurer des données climatiques.
- Spécifier la puissance désirée ou la surface disponible.
- Choisir les modules PV dans la base de données interne.
- Choisir l'onduleur dans la base de données interne.

VI.6. Dimensionnement de la station photovoltaïque de Naâma

Une des difficultés majeures de la production d'électricité à l'aide d'une centrale photovoltaïque est son caractère aléatoire. En effet, beaucoup de paramètres tels que la météo, la situation géographique, l'orientation et l'inclinaison des panneaux solaires, peuvent pour un système donné fournir des résultats très différents. Pour maîtriser au mieux ces paramètres très fluctuant, nous utiliserons le logiciel PVSYST.

VI.6.1. Données géographiques

La zone d'étude se situe dans la région sud-ouest de l'Algérie, elle appartient à la wilaya de Naâma. Les coordonnées terrestres de site sont les suivantes :

Latitude : 33.3° Nord

Longitude : 0.4°

Altitude : 1174 m

Inclinaison : 15°

Azimut : 0°


Orientation : sud

VI.6.2. Données météorologique

Obtention des données météorologique, température et l'irradiation mensuelle du lieu de notre site, à partir de logiciel PVSYST.

Chapitre VI Simulation d'une centrale PV de Naâma 20MW raccordée au réseau

Tableau IV.3. Données météorologique de Naama [27]

Site	Naâma (Algeria)			
Source des données	Données satellite NASA-SSE, 1983-2005			
	Irrad. Glob. kWh/m ² .ms	Diffus kWh/m ² .ms	Tempér. °C	Vit. vent m/s
Janvier	87.7	29.4	5.8	0.00
Février	109.5	31.6	8.2	0.00
Mars	152.2	47.1	12.0	0.00
Avril	189.6	51.9	15.6	0.00
Mai	222.3	59.5	20.6	0.00
Juin	227.7	58.5	26.0	0.00
Juillet	237.2	55.8	29.5	0.00
Août	209.3	53.6	28.9	0.00
Septembre	163.2	46.8	23.9	0.00
Octobre	124.0	40.9	17.9	0.00
Novembre	89.1	31.2	11.7	0.00
Décembre	79.0	27.6	7.2	0.00
Année	1890.7	534.1	17.3	0.0
	 <input type="button" value="Coller"/>	<input type="button" value="Coller"/>	<input type="button" value="Coller"/>	<input type="button" value="Coller"/>

D'après le tableau (IV. 3), on peut déduire que le rayonnement solaire globale annuel de Naâma est 1890,7 KWh/ m² .ms, avec des températures ambiante de 17, 3°C et la valeur de rayonnement diffus 534,1 KWh/m².ms, Ce sont des paramètres qui influencent la production du panneau et du système photovoltaïque.

Chapitre VI Simulation d'une centrale PV de Naâma 20MW raccordée au réseau

Figure IV.1. Choix des composants du système [27]

The screenshot displays a software interface for configuring a PV system. It is divided into several sections:

- Configuration globale du système:** Shows 1 type of sub-field and a simplified schema button.
- Résumé système global:** A table of key metrics:

Nombre de modules	76360	Puissance PV nominale	19854 kWp
Surface modules	122826 m ²	Puissance PV maximale	19297 kWdc
Nbre d'onduleurs	20	Puissance AC nominale	16000 kWac
- Champ PV:** Details for 'Champ PV' with a fixed inclination of 15° and azimuth of 0°.
- Aide au dimensionnement:** Options for 'Pas de prédim.' (with desired power of 20000.0 kWc) or 'ou surface disponible(modules)' (with 123732 m²).
- Sélection du module PV:** Selected 'Canadian Solar Inc.' 260 Wp 26V Si-poly CS6P - 260P MIX. Shows required modules approx. 76923 and operating voltages (25.9 V and 41.8 V).
- Sélection de l'onduleur:** Selected SMA 800 kW 530 - 850 V TL 50/60 Hz Sunny Central 800CP-JP. Shows 20 inverters and global power of 16000 kWac.
- Dimensionnement du champ:** 23 modules in series, 3320 chains. Shows operating conditions (V_{mpp}, V_{oc}) and irradiance (1000 W/m²). Total power at STC is 19854 kWp.

VI.7. Caractéristiques générales

Le solarpark Naâma est composé de 3320 chaîne, chaque chaîne est composée de 24 modules canadiens Solar CS6P, d'une puissance unitaire de 260Wc. Au totale, cette installation PV dispose d'une puissance CC de 19.854 MWc.

- Quantité d'électricité produite annuellement : 34678000KWh/ an.
- Nombre de modules : 79680 modules.
- Dimension d'un panneau : 163.8*98.2 cm soit 1.608 m².
- Type de cellule : Silicium polycristallin.
- Orientation de l'installation ; plein sud.

Chapitre VI Simulation d'une centrale PV de Naâma 20MW raccordée au réseau

- Angle d'inclinaison : 15°.
- Espacement entre les rangées de structure est de 6 m, afin qu'il y n'ait pas d'ombre portée d'une rangée sur l'autre. Cette distance rend également très aisée la circulation d'engins entre deux lignes de panneaux.

VI.7.1. Caractéristique de module

Les modules photovoltaïques sont fixés sur des structures métalliques entre 8.078 et 10.08 m de long et de 6.368 m de large. La hauteur maximale au-dessous du niveau du sol est d'environ 3 m et la hauteur minimale est d'environ 0.6 m. les structures sont orientées vers le Sud avec une inclinaison de 15°.

Tableau VI.4 : Caractéristiques électriques de module CS6P-260 W dans les conditions normalisées
STC

Puissance nominale maximale (P_{max})	260 W
Tension en fonctionnement optimal (V_{mpp})	30.4 V
Courant en fonctionnement optimal (I_{mpp})	8.56 A
Tension en circuit ouvert (V_{oc})	37.5 V
Intensité de court-circuit (I_{sc})	9.12 A
Rendement par panneau	15.88%
Température de fonctionnement	-40°C~ +85°C
tension maximal du système	1000 V
Calibre maximal des fusibles en série	15 A
Classification des applications	Class A
Tolérance de puissance	0~ +5 W

Tableau VI.5 : Caractéristiques électrique de module CS6P-260P dans les conditions NOCT

Puissance nominale maximale (P_{max})	191 W
Tension en fonctionnement optimal (V_{mpp})	28 V
Courant en fonctionnement optimal (I_{mpp})	6.83 A
Tension en circuit ouvert (V_{oc})	34.9 V
Intensité de court-circuit (I_{sc})	7.36 A

Chapitre VI Simulation d'une centrale PV de Naâma 20MW raccordée au réseau

VI.7.2. Condition du site

On réalité les panneaux fonctionnent souvent en conditions environnementale différentes par celles standard :

- Température des cellules : 25°C.
- Radiation solaire (sur le plan du panneau) : 1000W/m²

Et pour mieux représenter les conditions opératives du panneau photovoltaïque, on a défini la température de la cellule en conditions opératives nominales », NOCT (Operating Cell Température), pour déterminer l'influence de la température sur la puissance.

Dite condition opératives nominales sont ainsi définies :

- Radiation solaire (sur le plan du panneau) : 800W/m²
- Température ambiante (de l'air) : 20°C
- Vitesse du vent sur la face arrière du panneau : 1m/s

D'autres paramètres significations pour le dimensionnement :

- Température maximale des cellules $T_{cell\ max}$.
- Température minimale des cellules $T_{cell\ min}$.
- Tension maximale du système $V_{sys\ max}$.
- Tension de circuit ouvert V_{co} .

. IV.6.2.1. Température maximale et minimale des cellules

Le comportement thermique de la cellule, influe fortement sur les performances électriques, est déterminé par le bilan d'énergie entre la température ambiante et L'échauffement de la cellule dû à l'irradiante sur le panneau, en accord à la formule suivante :

$$U*(T_{cell}-T_{amb}) = Alpha* G_{inc}*(1-E_{ff}) \quad (1)$$

Qui conduit à:

$$T_{cell}=T_{amb}+\frac{Alpha *G_{inc}*(1-E_{ff})}{U} \quad (IV.1)$$

(¹) : Formule délivrée du programme de simulation PV syst.

Alpha : est le coefficient d'absorption de la radiation solaire (valeur typique 0.9).

E_{ff} : est le rendement du panneau (relatif à l'air du panneau), c'est-à-dire l'énergie produite par le panneau.

G_{inc} : est la radiation sur le panneau.

Chapitre VI Simulation d'une centrale PV de Naâma 20MW raccordée au réseau

T_{amb} : température ambiante.

U : est le facteur de perte thermique, qui peut être partagé entre une partie constante U_0 et une partie U_v proportionnelle à la vitesse du vent v_v (vitesse moyenne du vent).

$$U=U_0+U_v*v_v =29 \quad (IV.2)$$

Il faut déterminer le coefficient U à partir l'équation VI.1 aux conditions NOCT (Nominal Operating Cell Temperature) dites conditions opératives nominales sont ainsi définies :

T_{cell} =Température NOCT du panneau an accord à la fiche technique.

$E_{ff}=0$ parce que la température NOCT est par définition, en circuit ouvert, c'est-à-dire que le panneau ne produit pas d'énergie.

$G_{inc}=800 \text{ W/m}^2$ (NOCT).

$T_{amb}= 20^\circ\text{C}$ (NOCT).

Une fois déterminé U , nous l'employons dans l'équation VI.1 aux conditions limites du site, c'est-à-dire $T_{cell}=T_{max}$. (À Naâma la température maximale est plus de 49°C).

Concernant la vérification de la température minimale, elle est réalisée en comparant la température minimale de site avec la température minimale du panneau déclarée par le constructeur. La température minimale de site est -5°C tandis que la température minimale de panneau est -40°C .

VI.7.2.Tension maximale de la chaîne

Selon les conditions d'installation, il doit être vérifié que la température maximale de la chaîne, à la plus basse température ambiante, ne dépasse pas la tension maximale admissible de système.

$$V_{0C_chaîne_MAX}=N_{PVCH}*V_{0C}*[1+\frac{C_{coeff.VC0(2)}}{100}*(T_{amb_min}-25)] \quad (VI.3)$$

Où :

N_{PVCH} : Nombre de panneau par chaîne.

V_{0C} : tension circuit ouvert.

$C_{coeff.Vc(2)}$: coefficient de température pour la tension V_{0C} à basse température.

$T_{amb-min}$: température ambiante minimale à l'extérieur.

Chapitre VI Simulation d'une centrale PV de Naâma 20MW raccordée au réseau

VI.6.2.3. Protection de courant inverse

La contribution de court-circuit à partir d'autres chaînes reliées à la boîte de jonction doit être inférieure au courant inverse maximal du panneau. Afin de garantir ces critères, chaque chaîne doit être protégée par un fusible.

$I_{n-fusible}$: est défini selon la formule suivante :

$$1.43 * I_{MPP} \leq I_{n-fusible} \quad (IV.4)$$

Où :

I_{MPP} = courant à puissance maximale du panneau photovoltaïque

IV.7. Résultats des vérifications

Les résultats des vérifications pour les panneaux photovoltaïques de Naâma sont les suivant :

Tableau VI.6 : calculs de vérification module

Caractéristique électrique		
Type de panneau	Canadian Solar CS6P-260P	
Technologie de panneau	Silicium Poly cristallin	
$T_{amb-min}$	Température ambiante maximale à l'extérieur	49°C
$T_{amb-min}$	Température ambiante minimale à l'extérieur	-5°C
$V_{SYS-max}$	Tension maximale du système	1000 V
N_{PVCH}	Nombre de panneaux par chaîne	23
Alpha	Facteur d'absorption de rayonnement	0.9
U	Facteur de perte thermique calculée	29
$T_{cell-max-cal}$	Température maximale calculée de la cellule	75°C
$V_{0C-chaîne-max}$	Chaîne V_{0C} à température ambiante minimale	984V
Protection	$11.87A \leq I_{n-fusible}$	15A

Chapitre VI Simulation d'une centrale PV de Naâma 20MW raccordée au réseau

VI.8. Résultats de la simulation

Les principaux résultats des simulations à partir logiciel PVSYST seront présentés sous forme de graphiques et de tableaux.

Figure IV.2 : principaux résultats de la simulation [27]

PVSYST V6.61		02/07/17	Page 2/3
Système couplé au réseau: Résultats principaux			
Projet :		Naama_Nasa_1983 a 2005.SIT	
Variante de simulation :		VARIANTE FINALE	
Principaux paramètres système	Type de système	Couplé au réseau	
Orientation plan capteurs	inclinaison	15°	azimut 0°
Modules PV	Modèle	CS6P - 260P MIX	Pnom 260 Wc
Champ PV	Nombre de modules	76360	Pnom total 19854 kWc
Onduleur	Modèle	Sunny Central 800CP-JP	Pnom 800 kW ac
Batterie d'onduleurs	Nombre d'unités	20.0	Pnom total 16000 kW ac
Besoins de l'utilisateur	Charge illimitée (réseau)		
Principaux résultats de la simulation			
Production du système	Energie produite	34678 MWh/an	Productible 1747 kWh/kWc/an
	Indice de performance (PR)	84.41 %	

IV.8.1. Trajectoire de soleil

On remarque à la figure (VI. 3) Que la trajectoire de soleil, est la période entre le lever et le coucher du soleil, durant laquelle, le soleil se lève, en parcourant un trajet jusqu' atteindre une hauteur maximale à 13h temps solaire vrai, dans ce point il atteint son max et notre système solaire son maximum de rendement.

Après cette phase, il descend lentement jusqu'au coucher avec une diminution de rayonnement émis du à des valeurs positives de l'ombrage dans le ciel, ce qui cause une baisse de rendement du système tout en étant plus proche de coucher.

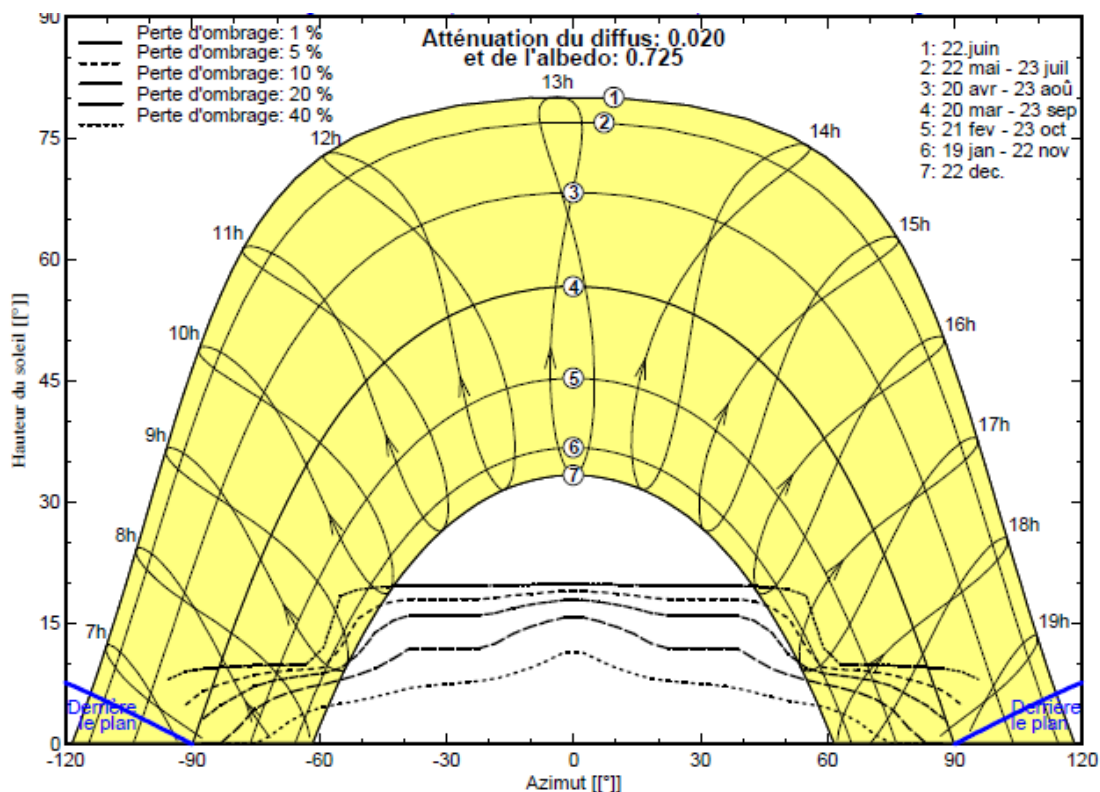


Figure IV. 3 : Trajectoire de soleil à Naâma [27]

IV.8.3.Énergie utile produite

C'est le chiffre principal qui intéresse l'investisseur et l'exploitant de la future centrale, cette valeur absolue doit être analysée en fonction des composants installés pour avoir estimé une sorte de rapport prix / qualité .

La figure (IV.4) représente l'énergie utile Y_f produite par la centrale photovoltaïque (à la sortie de l'onduleur) qui atteint la valeur maximum (479 Kwh/kw_p/J) à l'heure d'été (juin et juillet), tandis que en mois janvier et décembre est généralement baisse .Et les pertes L_s , L_c sont des pertes qui correspond respectivement au champ PV et dues à l'onduleur.

Chapitre VI Simulation d'une centrale PV de Naâma 20MW raccordée au réseau

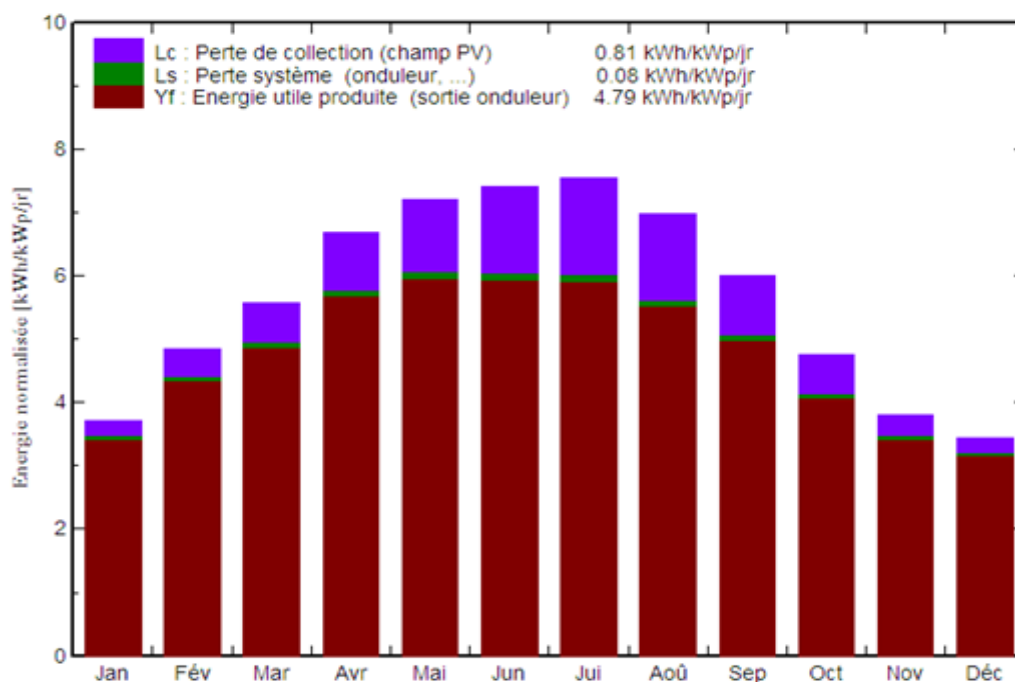


Figure IV.4 : Diagramme solaire disponible [27]

IV.8.4. Indice de performance

Cet indice de performance PR est un chiffre exprimant la qualité générale du système, la figure IV.5 représente l'indice de performance qui est défini par le rapport de la production du système (y_f) par l'énergie incidente de référence (y_r) tel que :

$PR = Y_f / Y_r$. Autrement dit, il représente l'efficacité globale du système ($PR = 84.4\%$).

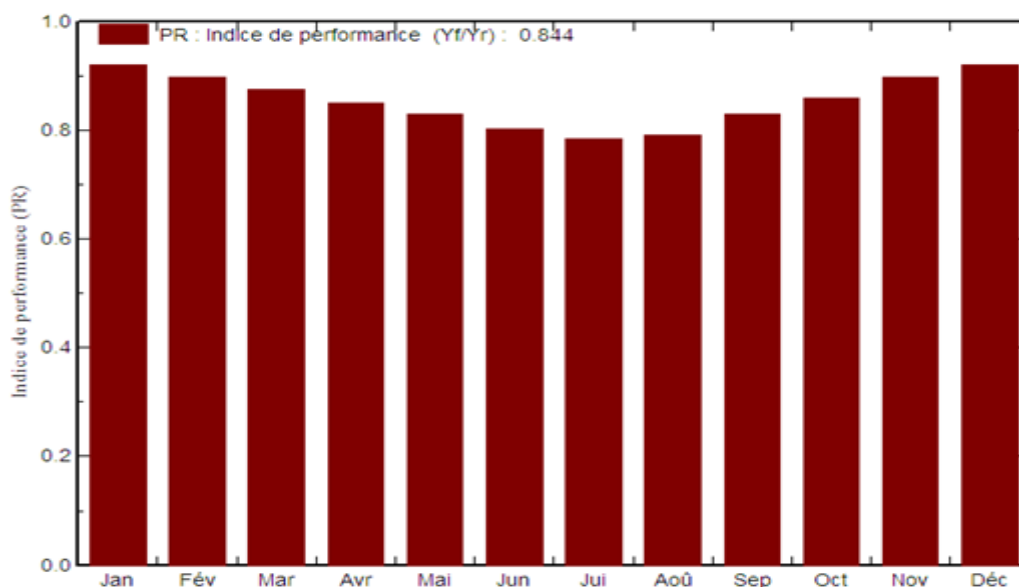


Figure IV.5. Indice performance [27]

Chapitre VI Simulation d'une centrale PV de Naâma 20MW raccordée au réseau

IV.8.6. Les pertes

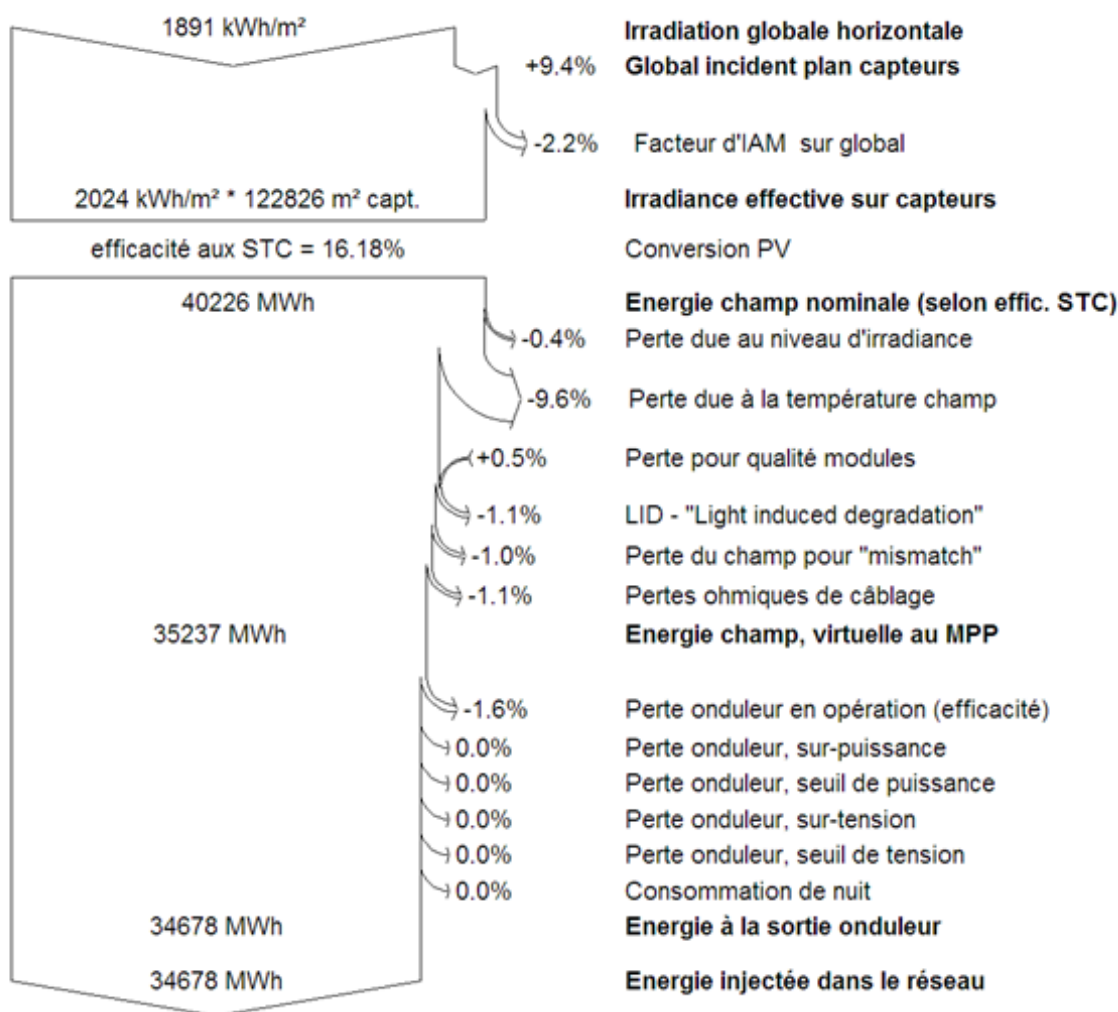


Figure IV.7 : Diagramme de pertes [27]

La figure (IV.4) résume les pertes influençant la production du système PV ; les pertes du système (perte onduleur, perte onduleur-seuil de puissance, perte onduleur sur tension, consommation de nuit) et les pertes de captage (pertes ohmiques des Câblages, perte due à la température du champ). Nous remarquons que la contribution la plus importante est les pertes au niveau du système de captage elles sont dues à la température du champ.

IV.9. SKID

Ils assurent la transformation de courant continue basse tension en courant alternatif moyenne tension. Ils comprennent deux onduleurs et un transformateur.

Chaque deux onduleur disposé dans des armoires de protection résistantes aux intempéries et à une plage de températures étendue.

Chapitre VI Simulation d'une centrale PV de Naâma 20MW raccordée au réseau

IV.9.1. Le poste de livraison

Le poste de livraison électrique assure l'évacuation de l'énergie produite vers le poste source. Il est installé à proximité de l'accès au site en limite de la clôture. Il est constitué de deux parties, séparées par une cloison :

- Une salle d'évacuation ; local électrique HTA.
- Une salle Tableau Général Basse Tension

L'accès à ces locaux nécessite une habilitation électrique. L'aire d'exploitation dédiée au poste de livraison comprend un dispositif de commande de l'alimentation électrique du réseau et un dispositif de centralisation du système de détection intrusion qui sont réunis dans le poste de commande.

IV.9.2. Le poste de commande

Le poste de commande est contigu au poste de livraison. Il est constitué de deux parties séparées par une cloison :

- Une salle de commande dotée d'un bureau avec un ordinateur centralisant toutes les informations sur la centrale photovoltaïque. A partir de ce poste, une maintenance préventive et/ou curative est établie. Toutes les données de production de la centrale sont répertoriées grâce à un logiciel de commande.
- Une salle stockage et maintenance permettant d'emmagasiner le matériel et outils de petite et moyenne taille nécessaires à la maintenance de l'installation photovoltaïque.

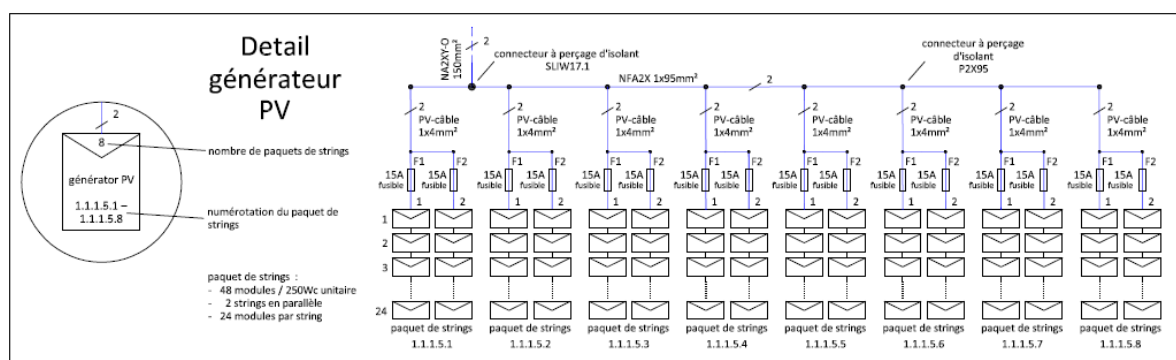


Figure IV.8 : Détail d'un générateur PV

Chapitre VI Simulation d'une centrale PV de Naâma 20MW raccordée au réseau

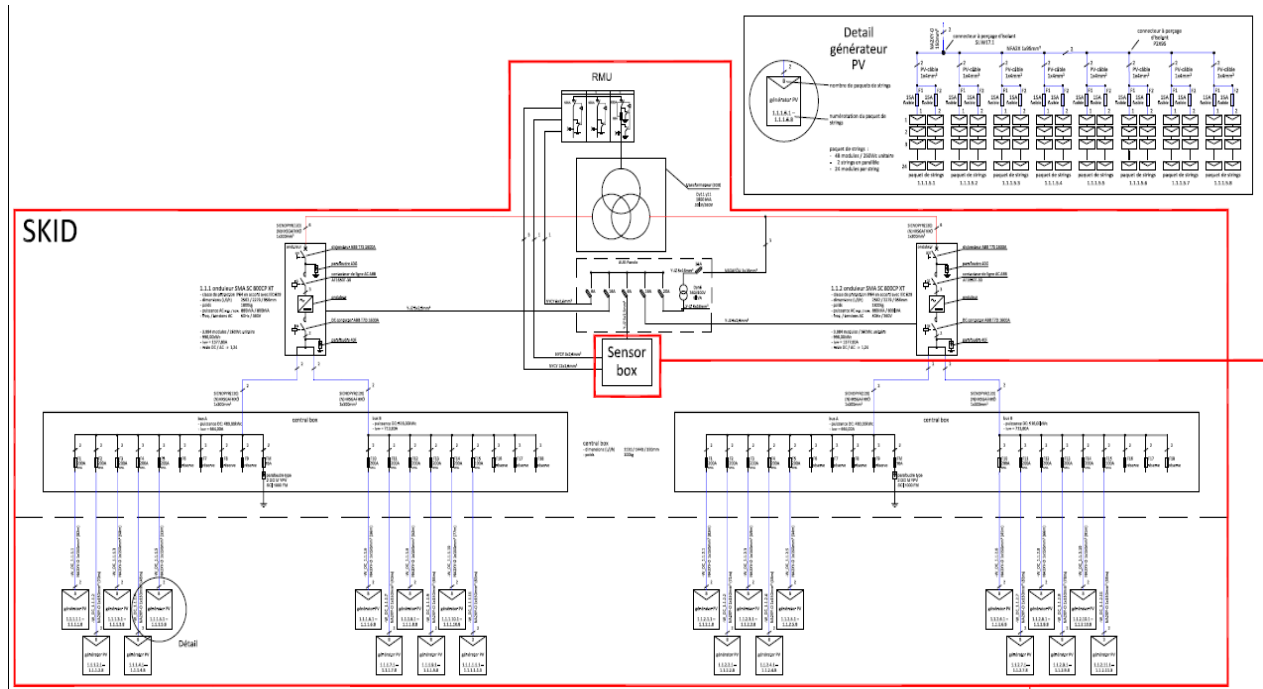


Figure VI.8 : Schéma d'un SKID de Naâma

Conclusion

Les installations photovoltaïques doivent être dimensionnées pour qu'elles puissent fournir l'énergie dans les conditions les plus favorables, ce qui nous permet d'obtenir à une meilleure optimisation des installations photovoltaïques.

Nous avons présenté dans ce chapitre les étapes de Simulation d'une centrale PV avec logiciel PVSYST. À base des résultats de simulation, nous avons conclu que la centrale de Naâma permet une production maximale d'énergie.

Les pertes dues à la qualité de l'onduleur ont une influence importante sur l'énergie produite Par la centrale PV, d'où la nécessité d'opter pour une technologie permettant la meilleure Efficacité annuelle de ce composant qui représente l'élément clé et plus délicat d'une Installation PV.

The background features three large, overlapping blue circles of varying sizes, each with a gradient from light to dark blue. Two thin, light blue lines intersect at the top left, forming a large 'V' shape that frames the central text.

Conclusion générale

Conclusion générale

Conclusion générale

Les exigences du protocole de Kyoto imposent que notre avenir énergétique doit être basé sur des énergies non polluantes ayant des ressources importantes. Pour cela on a recours aux énergies renouvelables qui sont issues de phénomènes naturels réguliers où constants provoqués principalement par le soleil.

Aujourd'hui, l'énergie est essentielle pour répondre aux besoins des individus, des industries ou des transports. Ces impacts environnementaux, sont minimes par rapport aux avantages à long terme et les avancées dans ce domaine en feront une énergie de plus en plus propre aux fils des années. Ainsi on peut dire que le photovoltaïque répond aux exigences du protocole de Kyoto, et que c'est une énergie qui sera exploitée et utilisée.

Les installations photovoltaïques doivent être dimensionnées pour qu'elles puissent fournir l'énergie dans les conditions les plus favorables, ce qui nous permet d'aboutir à une meilleure optimisation des installations photovoltaïques.

Notre travail consiste l'étude d'une centrale PV à Naâma de puissance de 20 MW connectée au réseau de distribution électrique moyenne tension.

Un système raccordé au réseau, non seulement permettrait de réduire le coût de l'installation, en supprimant le coût des batteries, car le stockage ne sera plus nécessaire, mais permettrait d'avoir en plus une possibilité de rendre l'énergie excédentaire au réseau et ainsi faire des profits, ce qui amortirait le prix d'investissement initial.

Nous avons constaté que l'installation de la centrale PV interconnectée au réseau est intéressante du point de vue énergétique, à cet effet le développement du marché photovoltaïque nécessite de connaître parfaitement la production électrique de ces systèmes sur différents sites en particulier et en prenant en compte des pertes dans le système, des données météorologiques et aussi de l'état de l'art des composants afin d'estimer sa rentabilité économique et améliorer son rendement.

Références bibliographiques

- [1] J. Royer et T. Djiako et E. Schiler, B. Sadasy, " Le pompage photovoltaïque, Mémoire de magister en Automatique "Université d'Ottawa, 1998.
- [2] Julien LABBÉ, " l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés ", thèse de doctorat de l'école des mines de paris, Spécialité "Énergétique" le 21 décembre 2006.
- [3] Mr M. SLAMA FATEH, "Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïque interconnectés au réseau électrique", Mémoire de magister en électrotechnique, université de Sétif, 2011.
- [4] Smaïl SEMAOUI, " Etude de l'électrification d'un village avec de l'énergie solaire photovoltaïque ", Mémoire de Magister, Université de Ouargla, 2004.
- [5] I.Vechiu, "Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome", Thèse de doctorat l'université du havre, Paris, décembre 2005.
- [6] Salaheddine MANSOUR, " Etude de Dimensionnement optimal d'une station solaire autonome en site isolé ", Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2014.
- [7] OWEIS EL MELKI Marielle, SALHAB Miled, SOUEID Tania, "Système de contrôle d'alimentation : EDL-Générateur- Photovoltaïque pour application domotique", Mémoire de magister en Génie Electrique, université Libanaise, 2012/2013.
- [8] M. Petibon Stéphane, "Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques ", Thèse de Doctorat, Université ToulouseIII Paul Sabatier, 2009.
- [8] LABOURET Anne et Michel VILLOZ, "ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE" 4eme édition, Edition LE MONITEUR, DUNOD 2009
- [9] Fatith DJALOUD, "Etude et optimisation du fonctionnement d'un système optimisation", Mémoire de master en automatique, université KASDI MERBAH-OUARGLA, 2011/2012.

Références bibliographiques

- [10] S.ABADA, "Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur sepic", Mémoire Maître es Sciences, Université laval, 2011.
- [11] A. Karima, "Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance 1MW interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension", Mémoire de Master Electronique, UMMTO 2015.
- [12] H. Belmili, M. Ayad, E. Berkouk et M. Haddadi, " Optimisation de dimensionnement des installations photovoltaïques autonomes – Exemples d'applications, éclairage et pompage au fil du soleil ", Revue des énergies renouvelables, 2008.
- [13] Xuan Linh Dang, "Contribution à l'étude des systèmes Photovoltaïque (PV)/Stockage distribués. Impact de leur intégration à un réseau fragile", thèse de doctorat de l'école NORMALE SUPERIEURE DE CACHAN, 1 Octobre 2015.
- [14] Clarence SEMASSOU, "AIDE A LA DECISION POUR LE CHOIX DE SITES ET SYSTEMES ENRGETIQUES ADAPTES AUX BESOINS DU BENIN", thèse de doctorat de l'université du BORDEAUX 1, 15 Décembre 2011.
- [15] T. Tran-Quoc, S. Bacha, C. Kieny, P. Cabanac, S. Grenard, D.Goulielmakis "Solution to Avoid Unwanted trips for PV Systems Connected to LV network Facing Voltage Sags", 1er atelier international sur l'intergénérationnel de l'énergie solaire Power in Power Systems, Aarhus, Danemark (2011).
- [16] Thi Minh Chau le "Couplage Onduleurs Photovoltaïque et réseau, aspects contrôle/ commande et rejet de perturbations " thèse de doctorat université de grenoble, 25 Janvier 2012.
- [17] T.Tran-Quoc, C. Le Thi Minh, S. Bacha, C. Kieny, N. Hadjsaid, C. Duvauchelle, A. Almeida, "Local voltage control of PVs in distribution networks", CIRED, Prague, Czech Republic (2009).

Références bibliographiques

- [18] T. Tran-Quoc, H. Colin, C. Duvauchelle, B. Gaidon, C. Kieny, C. Le-Thi-Minh, S. Bacha, Saddek, G. Moine, Y. Tangui, “Transformerless inverters and RCD: what's the problem”, 25th EUPVSEC, Valencia, Spain (2010).
- [19] T. Tran-Quoc, C. Le Thi Minh, S. Bacha, C. Kieny, “Behaviour of Grid-Connected Photovoltaic Inverters in Islanding Operation”, IEEE Power Tech, Trondheim, Norvege (2011).
- [20] Fiche technique SONELGAZ.
- [21] C. Le Thi Minh, T. Tran-Quoc, S. Bacha, C. Kieny, P. Cabanac, D. Goulielmakis, C. Duvauchelle “Behaviors of photovoltaic systems connected to MV network during faults”, 26th EUPVSEC, Humburg, Germany (2011).
- [22] Sylvain Brigand, “Dimensionnement installation et mise en œuvre maintenance“, Installations solaires photovoltaïques, 2011.
- [23] Anne Labouret, Michel Villos, “Conception et dimensionnement d’installations raccordées au réseau“5^e édition, Paris, 2012.
- [24] KHERCHI Mouhamed, “Type d’onduleur dans une centrale photovoltaïque connectée au réseau électrique, Recherche et Développement, Alger 2014.
- [25] Smaïl SEMAOUI, “ Etude de l’électrification d’un village avec de l’énergie solaire photovoltaïque ”, Mémoire de Magister, Université de Ouargla, 2013.
- [26] Fiche technique BELECTRIC. / Info @ BELECTRIC.Com
- [27] Logiciel PVSYST 6.6.1, université de Genève, Belgique.

Annexes

Distribution de la puissance du champ

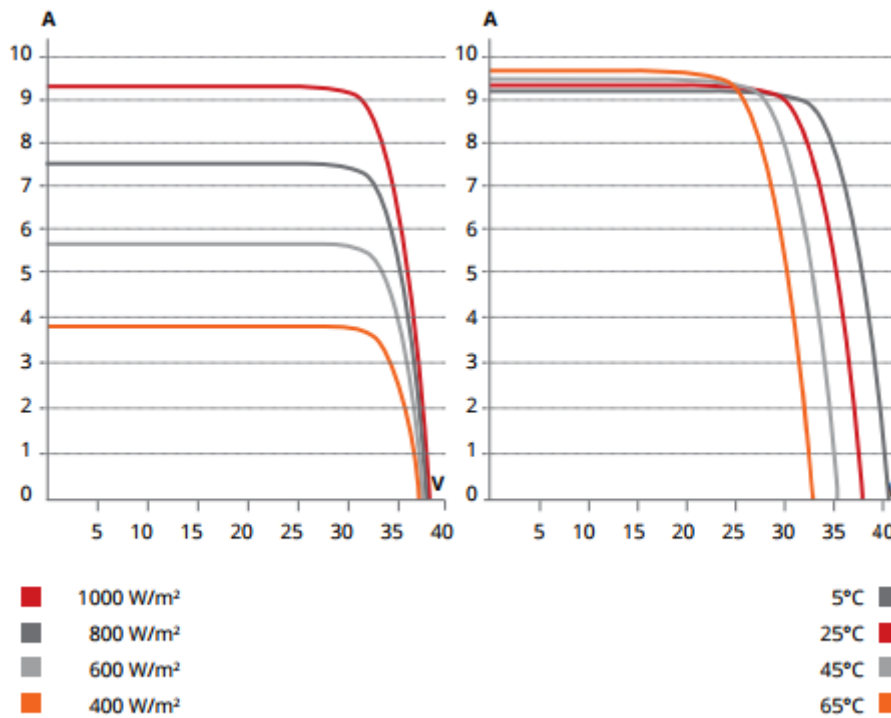
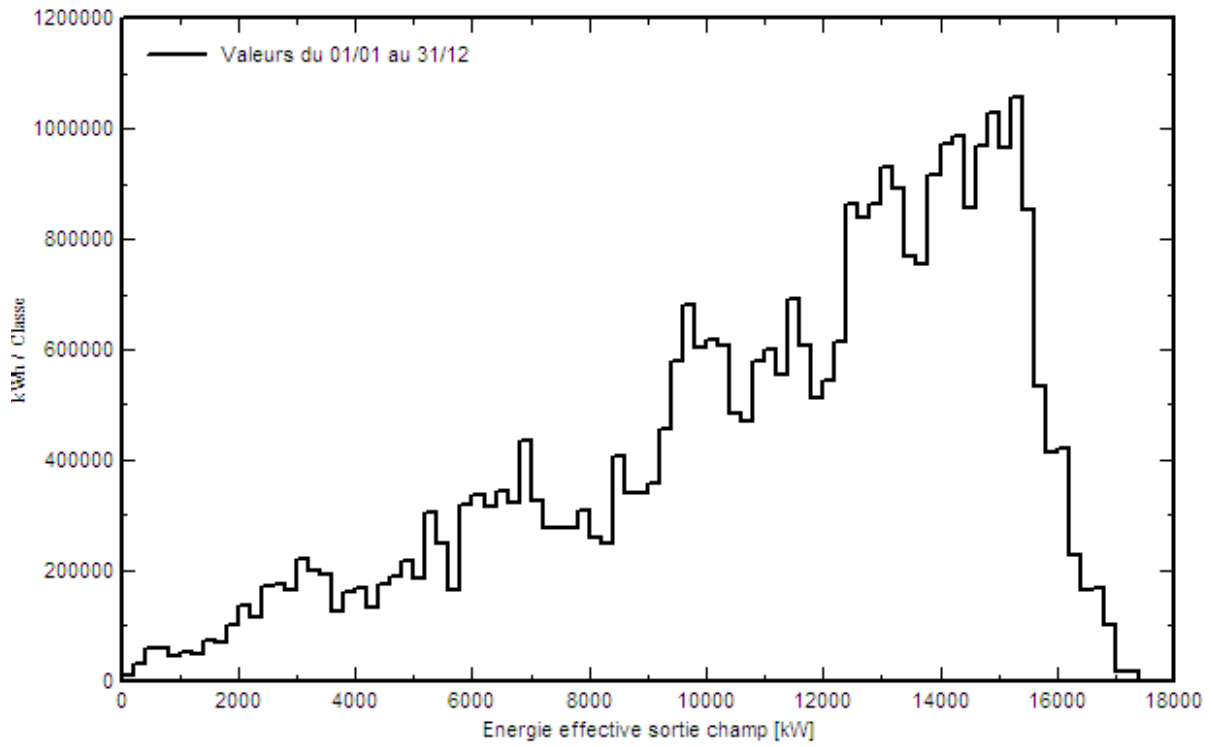
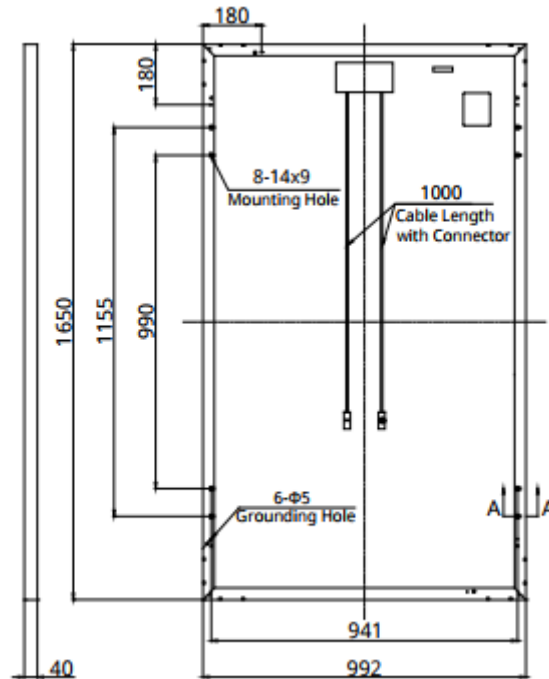


Figure A : Courbe (I-V) de panneau SC6P-260P

Annexes



Type de cellule	Silicium polycristallin 156 x 156 mm, 3 or 4 bus bar
Disposition des cellules	60 (6 x 10)
Dimensions	1638 x 982 x 40 mm (64,5 x 38,7 x 1,57 in)
Poids	19 kg (41,9 lbs)
Face avant	Verre trempé de 3,2 mm
Matériau du cadre	Alliage d'aluminium anodisé
Boîte de raccordement	IP65 or IP67, 3 diodes
Câble	4 mm ² (CEI)/12 AWG(UL), 1000 mm
Connecteurs	MC4 ou comparable à MC4
Emballage (panneaux par palette)	24 pièces
Nombre de panneaux par conteneur (de 40 pieds)	672 pièces (40 pieds)

Figure B : Caractéristique mécanique de module SCP-260P

Annexes

Rang harmonique	courant I crête	Courant [% In]
1	21,7686	100
2	0,2112	0,97
3	0,1524	0,70
4	0,0980	0,45
5	0,2939	1,35
6	0,0174	0,08
7	0,0588	0,27
8	0,0196	0,09
9	0,0087	0,04
10	0,0218	0,10
11	0,0239	0,11
12	0,0044	0,02
13	0,0261	0,12
14	0,0065	0,03
15	0,0044	0,02
16	0,0152	0,07
17	0,0131	0,06
18	0,0044	0,02
19	0,0348	0,16
20	0,0152	0,07
21	0,0109	0,05
22	0,0479	0,22
23	0,0501	0,23
24	0,0065	0,03
25	0,0239	0,11
26	0,0087	0,04
27	0,0022	0,01
28	0,0065	0,03
29	0,0065	0,03
30	0,0022	0,01
31	0,0044	0,02
32	0,0044	0,02
33	0,0022	0,01
34	0,0022	0,01
35	0,0022	0,01
36	0,0000	0,00
37	0,0022	0,01
38	0,0022	0,01
39	0,0000	0,00
40	0,0022	0,01
41	0,0022	0,01
42	0,0000	0,00
43	0,0022	0,01
44	0,0022	0,01
45	0,0000	0,00
46	0,0022	0,01
47	0,0022	0,01
48	0,0000	0,00
49	0,0022	0,01
50	0,0044	0,02

Annexes

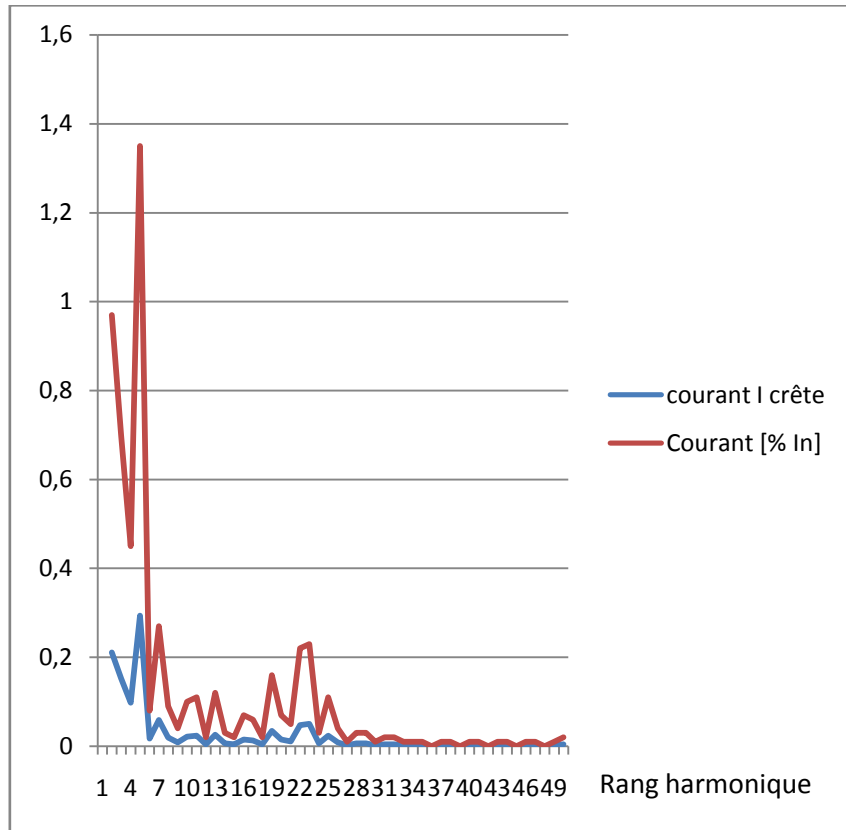


Figure C : Courbe des harmonique.