



Département physique

Energie renouvelable et efficacité énergétique

Projet fin d'étude :

Pour l'obtention du licence professionnelle sous thème :

Étude, simulation et dimensionnement d'une installation photovoltaïque de 120 KWC raccordée au réseau de basse tension.

Elaboré par : ELMAZOUZI Chaimae

Encadrant académique : ZAZOUI Mimoun

Encadrent professionnelle : HANAOUI Naima

Année universitaire : 2020/2021

Dédicace

A ma très chère mère Fatna

Affable, honorable, aimable : vous êtes la source de tendresse, le symbole de la bonté par excellence et l'exemple du sacrifice qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi.

A mon très cher père Ali

Mon idole, aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous tes sacrifices depuis ma naissance, durant mon enfance et même à l'âge adulte.

A mon très cher frère Saad et mes sœurs

Toujours présents dans tous mes moments par votre soutien moral et vos sacrifices et votre gentillesse sans égale. Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité.

A toute ma famille et mes amis, Et à tous ceux que j'aime et je respecte, Je dédie ce modeste travail.

Remerciements :

Il m'est agréable d'exprimer ma profonde gratitude à toutes les Personnes dont l'intervention au cours de ce travail a favorisé son aboutissement.

Je tiens à exprimer mes expressions de remerciements et de respect à Monsieur ZAZOUI MIMOUN mon encadrant pédagogique de la faculté des sciences et techniques de Mohammedia, qui nous a fait bénéficier de son savoir-faire, de ses précieux conseils, et pour l'intérêt qu'il a porté à ce projet.

Je tiens également à exprimer mon respect et remerciement à tout le personnel de la société DARDIS, à leur tête NAIMA HANAOUÏ pour ses conseils et son regard avisé ainsi de m'avoir laissé la liberté nécessaire pour accomplir ce projet dans les meilleures circonstances. Ainsi que d'avoir partagé son expertise afin qu'on profite de cette chance d'évoluer dans le domaine professionnel dans une firme leader dans son domaine d'activité.

J'adresse mes remerciements à tous le corps actif de DARDIS qui m'a présenté toutes les informations et la documentation nécessaires pour mener à bien ce travail.

Je tiens aussi à remercier tous les membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger mon travail sans oublier tous le corps professoral de la faculté des sciences et techniques de Mohammedia et notamment celui du Département de physique.

Enfin, je remercie tous ceux et celles ayant contribué, de près ou de loin, à l'accomplissement de ce travail, trouvent l'expression de ma parfaite considération et mes vifs remerciements.

Résumé :

Le Maroc accorde une importance particulière à la préservation de l'environnement et à l'inscription de ses plans de développement socio-économiques dans une vision de développement durable.

Afin de concilier les besoins énergétiques croissants du pays avec les exigences de la préservation de l'environnement, une stratégie énergétique nationale ambitieuse a été mise en place pour l'objectif d'accroître la part des énergies renouvelables - hydraulique, éolien, solaire, mais aussi biomasse et, à terme, d'autres ressources propres - dans la capacité totale de production d'électricité du pays. L'objectif fixé à l'horizon 2030 est d'atteindre 52% du mix énergétique, d'origine renouvelable.

C'est dans cette optique que s'inscrit mon projet de fin d'études qui a pour objectif d'étude et simulation d'une installation photovoltaïque raccordées au réseau de basse tension.

La première partie de ce projet représente une introduction générale sur les réseaux électriques, ses origines et ses constitutions.

La seconde partie porte sur le système photovoltaïque les éléments de base d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau de basse tension,

La troisième partie représente les normes du dimensionnement des installations photovoltaïque raccordé au réseau.

La dernière partie sera consacrée à une étude de cas pratique pour d'une installation photovoltaïque située à la ville d'Agadir à travers un dimensionnement et une analyse technico-économique.

Liste des abréviations :

- PV : Photovoltaïque
- Si : Silicium
- I_{ph} : Le photo-courant
- V_{oc} : La tension de circuit ouvert
- GPV : générateur photovoltaïque
- I_{cc} : Le courant du court-circuit
- MPPT : Maximum power tracker
- P_{max} : Puissance maximale
- P&O : La technique de la Perturbation et d'Observation.
- AC : Courant alternatif
- DC : Courant continu
- CTS : Conditions de teste standard
- I_{scr} : Le courant inverse maximal
- I_{scSTC} : Le courant inverse dans les conditions standard

Table des matières

Introduction Générale	10
Présentation de l'organisme d'accueil	12
I. Généralités sur la société DARDIS :	12
Chapitre1 : Réseaux électriques	13
Introduction :	13
I. Réseau électrique :	13
1. Définition :	13
2. La problématique des réseaux électriques :	14
3. Le cadre règlementaire et législatif d'intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique Marocain	15
II. Description des réseaux électriques :	17
1. Réseaux de transport THT :	17
2. Réseaux de répartition HTB :	17
3. Réseaux de distribution HTA :	17
4. Réseaux de livraison BTA :	17
III. Constitution des réseaux électriques :	18
1. Les centrales électriques :	18
2. Les postes électriques :	18
a. Différents types de postes électriques :	18
b. Les fonctions principales des postes électriques :	19
3. Les lignes électriques :	19
Chapitre 2 : Système photovoltaïque	20
Introduction :	20
I. Energie solaire :	20
1. Chaleur passive :	20
2. Solaire thermique :	20
3. Energie photovoltaïque (PV) :	20
II. Energie photovoltaïque :	20
III. Système photovoltaïque :	21
IV. Cellule photovoltaïque :	21
1. Effet photovoltaïque :	22
2. Les différents types des cellules photovoltaïques :	23
3. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque :	25
4. Caractéristiques d'une cellule solaire :	26
V. Les générateurs de photovoltaïques :	27
1. Association des panneaux /des cellules photovoltaïques :	27

2.	Constitution d'un panneau photovoltaïque :	30
3.	Caractéristique I-U d'un panneau photovoltaïques :	30
4.	Caractéristiques P-U d'un panneau photovoltaïques :	31
5.	Influence des différents paramètres sur les caractéristiques I(V):	32
VI.	Installations photovoltaïques :	34
1.	Eléments centrales d'une installation photovoltaïques :	35
a)	Les modules photovoltaïques :	35
b)	Les batteries de stockages :	35
c)	Régulateur de charge :	36
d)	Les onduleurs/ convertisseurs :	37
e)	Les organes de protection et de sécurité :	38
f)	Les câbles :	41
g)	Les connecteurs :	41
VII.	Les types des installations photovoltaïques :	42
1.	Installation photovoltaïque isolé/autonome :	42
2.	Installation photovoltaïque hybride :	43
3.	Installation photovoltaïque raccordées au réseau :	44
Conclusion :		45
Chapitre3 : Dimensionnement des installations photovoltaïques raccordées au réseau électrique :		46
Introduction :		46
I.	Calculer la puissance crête :	46
1.	La puissance crête à partir de la surface d'installation :	46
i.	L'installation des panneaux intégrée à la toiture (inclinaison 0°)	46
ii.	Installation des panneaux non-intégrée au toit (inclinée).	47
2.	La puissance crête à partir de la consommation journalière :	49
3.	La puissance crête à partir du budget du client :	50
II.	Dimensionnement d'onduleur :	50
1.	Compatibilité en puissance :	51
2.	Compatibilité en courant :	51
3.	Compatibilité en tension :	52
III.	Dimensionnement des câbles :	53
1.	Chute de tension :	53
2.	Calcul de section de câble côté DC :	53
3.	Calcul de section de câble côté AC :	54
IV.	Dimensionnement des organes de protection :	55
1.	Partie courant continu :	55

2. Partie courant alternatif :.....	56
Chapitre4 : Étude de cas : étude et dimensionnement d’une installation photovoltaïque de 120 KWC raccordée au réseau de basse tension :.....	57
I. Présentation de site de projet :.....	57
1. Situation géographique et météorologique du site :	57
2. Estimation d’irradiations reçue par le site d’étude :.....	58
II. Choix de la technologie des modules photovoltaïques et de l’onduleur :.....	59
1. Choix et calcul de nombre des panneaux solaires :	59
2. Choix d’onduleur :	59
III. Dimensionnement des câbles :	62
1. Câbles DC :.....	62
2. Câble AC :.....	63
IV. Dimensionnement des éléments de protection :.....	64
1. Partie DC :.....	64
2. Partie AC :.....	65
3. Les composants de la gestion intelligente d’énergie PV :.....	65
V. Simulation PVsyst :	66
1. Conception et dimensionnement de l’installation :.....	67
1. Résultats de la simulation :	69
VI. Analyse financière du projet :	70
1. Temps de retour sur investissement de l’installation photovoltaïque :	70
VII. Etude écologique du projet :.....	71
Conclusion :	71
Conclusion :	72
Bibliographie :	73

Les figures :

Figure 1: réseau électrique.....	14
Figure 2: formation jonction P-N.....	22
Figure 3: La génération du photo-courant	23
Figure 4: cellule monocristalline	23
Figure 5: cellule poly-cristalline.....	24
Figure 6: cellule amorphe.....	24
Figure 7: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.....	26
Figure 8: branchement de panneaux en série.....	28
Figure 9: branchement de panneaux en parallèle	29
Figure 10: Composition d'un panneau photovoltaïque	30
Figure 11: Caractéristiques courant / tension.....	31
Figure 12: Caractéristique puissance/tension.....	32
Figure 13: la caractéristique I-V sous l'effet de l'éclairement.....	33
Figure 14: la caractéristique P-V sous l'effet de l'éclairement.....	33
Figure 15: la caractéristique I-V sous l'effet de la température	34
Figure 16: les panneaux photovoltaïques.	35
Figure 17: batterie de stockage.....	36
Figure 18: onduleur mono-tracker.	38
Figure 19: onduleur muti-tracker.	38
Figure 20: fusible	39
Figure 21: parafoudre de deux pôles.	40
Figure 22: interrupteur sectionneur.....	40
Figure 23: les câbles DC.....	41
Figure 24: les connecteurs	42
Figure 25: installation isolé	43
Figure 26: installation photovoltaïque hybride.....	44
Figure 27: installation raccordée au réseau	45
Figure 28: installation photovoltaïques non-incliné.	47
Figure 29: installation photovoltaïque incliné.....	48
Figure 30: Une vue aérienne du site	57
Figure 31: L'irradiation mensuelle globale du site étudié.....	59
Figure 32: fiche technique du panneau photovoltaïque JKM465M-7RL-3V	59
Figure 33: fiche technique de l'onduleur, FRONIUS ECO 27.0-3-S.....	60
Figure 34: la fiche technique de smart meter	66
Figure 35: diagramme de configuration.....	66
Figure 36: Situation et météo, PVsyst	67
Figure 37: Orientation, PVsyst.....	68
Figure 38: définition du système réseau	69
Figure 39: design de l'installation.....	70

Les tableaux :

Tableau 1: la fiche technique de la société DARDIS.....	12
Tableau 2: Courants admissibles dans les câbles de chaîne P V et choix des fusibles de protection ...	55
Tableau 3: Condition d'installation des parafoudres sur la partie CC.....	56
Tableau 4: Dimensionnement de panneaux pour les 4 champs.	69
Tableau 5: paramètres de l'installation PV	70

Introduction Générale

La consommation mondiale d'électricité observée durant ces dernières décennies est fortement liée au développement de l'industrie, du transport et des moyens de communications.

De nos jours, une grande partie de la production électrique est produite à partir de ressources non renouvelables comme le charbon, le gaz naturel, le pétrole et l'uranium. Leur vitesse de régénération est extrêmement lente à l'échelle humaine. Ce qui entrainera à plus ou moins courte échéance un risque non nul d'épuisement de ces ressources.

D'autre part, ce type de consommation énergétique n'est pas neutre sur l'impact environnemental. Pour les hydrocarbures et le charbon par exemple, d'importantes émissions de gaz à effet de serre sont générées quotidiennement jouant un rôle prépondérant au niveau du dérèglement climatique et de l'augmentation de la pollution. Ce constat pousse à rechercher de plus en plus de solutions innovantes palliant le déficit énergétique et limitant l'impact négatif sur l'environnement. Ainsi, le développement des sources non-polluantes à base d'énergie renouvelable est de plus en plus sollicité à la fois par les producteurs d'énergie et les pouvoirs publics.

Dans un contexte de réchauffement planétaire, les risques dévastateurs de changement climatique et d'élévation du niveau de la mer, sont de plus en plus préoccupants. La communauté internationale se mobilise et le Maroc est en phase avec les décisions mondiales de limiter les émissions de CO₂ ou de développer les énergies renouvelables comme alternatives aux carburants polluants, mais également face à la pénurie mondiale des hydrocarbures. La hausse des prix du pétrole et la dépendance énergétique quasi-totale (93%) des importations du Maroc l'ont conduit à mettre en place un plan stratégique pour le développement de l'énergie renouvelable dans lequel l'énergie solaire devrait prendre une place plus importante. Le Maroc vit une dépendance quasi-totale de l'étranger pour son approvisionnement en carburant car dépourvu de ressources pétrolières. Certes, la consommation d'énergie par habitant est faible, mais avec les nombreux chantiers engagés (construction d'autoroutes et de logements sociaux...) Le Maroc dispose d'autres sources minimales comme le charbon ou le gaz naturel, les énergies renouvelables principalement le solaire et l'éolien mais leurs apports restent trop faibles, c'est pourquoi le Maroc est

ouvertement résolu à réserver aux énergies renouvelables une place de choix dans sa politique énergétique.

Dorénavant, ce domaine demeure un secteur d'activité potentiel dont les entreprises peuvent en profiter pour augmenter leur chiffre d'affaire. C'est dans ce sens que CENTRELEC « DARDIS » compte s'affirmer comme un acteur majeur d'un marché encore peu mature au MAROC, en commençant par des installations photovoltaïques de petite gamme. Notre principale mission est le dimensionnement de ces installations solaires, en introduisant les différents facteurs cernant la réussite d'un tel projet à savoir les météorologiques, électriques, techniques et aussi économiques. Tout ceci sera relaté dans le présent rapport via quatre parties. Ainsi, il sera question de présenter tout d'abord l'organisme d'accueil ainsi que les généralités sur les systèmes photovoltaïques.

La première partie représente une définition sur les réseaux électriques et leurs constituants.

La deuxième et la troisième partie seront consacrées à la présentation des éléments principaux d'une installation solaire photovoltaïque à savoir les modules et les onduleurs photovoltaïques en détaillant leurs technologies de fabrication ,les commandes utilisés pour l'optimisation de leur rendement, avec plus de détails sur la commande Maximum power point tracking ainsi que les organes de protection et leur dimensionnement.

La quatrième et dernière partie traitera une étude de cas pratique, à savoir son analyse financière ; l'étude de faisabilité technico-économique et une étude écologique.

Présentation de l'organisme d'accueil

I. Généralités sur la société DARDIS :

DARDIS est une société marocaine qui a démarré ses activités en 2013, elle est localisé à Casablanca spécialisé dans la distribution des produits et solutions courant faible (la téléphonie, l'alarme, l'interphonie et les systèmes de détection incendie), courant fort (les prises électriques, le chauffage, la ventilation) et énergie renouvelable (les panneaux photovoltaïques, les onduleurs, les câbles).

Ville	Casablanca
Raison sociale	DARDIS
Date de création	2013
Forme juridique	Société anonyme
Secteur d'activité	Distribution des produits et des solutions courant fortes, courant faible et énergie renouvelable
Domaine d'activité	✓ Photovoltaïque ✓ Démarrage et variation de vitesse ✓ Gaine à barre /Compensation ✓ Système de câblage structuré ✓ Automatisation
Capital	2500000 DH
Total effectif employé	39
Identification fiscale	14413029
Téléphone	+212 5 22 34 57 57
Siege social	34, Bd MLY SLIMANE, Roches Noires, CASABLANCA
E-mail	dardis@dardis.ma
Site Web	Dardis.ma
Logo	

Tableau 1: la fiche technique de la société DARDIS

Chapitre1 : Réseaux électriques

Introduction :

Les installations photovoltaïques connectées au réseau électrique représentent la majorité des installations photovoltaïques actuellement installées dans le monde (en 2015). En effet, ces installations photovoltaïques utilisent le réseau comme un stock et transforment la totalité de l'électricité produite en courant alternatif.

I. Réseau électrique :

1. Définition :

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité. Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production, transport, consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble. Un réseau électrique étant composé de machines de production et de consommation, ainsi que de structures (lignes, transformateurs) pour les relier, les réseaux électriques ne sont apparus que vers la fin XIX^e siècle, lorsque chaque élément avait atteint une maturité technologique suffisante.



Figure 1: réseau électrique

2. La problématique des réseaux électriques :

La gestion du réseau électrique ne consiste pas seulement à faire en sorte que les transits de puissance soient inférieurs aux capacités de transport du réseau. Il faut également surveiller plusieurs paramètres techniques, dont le niveau de tension : la tension électrique doit rester dans une plage autorisée en tout point du réseau, dans toutes les situations de production et de consommation prévisibles. En effet, la tension peut localement être dégradée, par exemple les Jours de forte consommation, dans ce cas, les transits à travers les lignes du réseau sont importants, ce qui provoque une chute de tension dans ces lignes.

Les problèmes majeurs du réseau électrique sont les perturbations, facteurs entachant la qualité des grandeurs électriques. L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants :

- La fréquence.
- L'amplitude des trois tensions.
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde.
- La symétrie du système triphasé (égalité des modules des trois tensions, leur déphasage et l'ordre de succession des phases).

Ces perturbations dégradant la qualité de la tension et de la fréquence peuvent résulter de :

- Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients (court-circuit dans un poste, dans une ligne aérienne, dans un câble souterrain)

- Installations perturbatrices (fours à arc, soudeuse, variateurs de vitesse....)
- D'une très grosse variation de puissance de la source due à un appel fort de courant par la charge.

3. Le cadre réglementaire et législatif d'intégration des énergies renouvelables dans le réseau électrique Marocain

Ces dernières années, le Maroc a entrepris plusieurs réformes en vue de faire évoluer son mix énergétique en développant la part des énergies renouvelables. Dans ce cadre une stratégie énergétique nationale a été mise en pour sécuriser son approvisionnement énergétique dans un contexte de forte croissance de la demande énergétique, pour maîtriser les coûts futurs des services énergétiques par rapport à la tendance haussière des cours des produits pétroliers et enfin pour préserver l'environnement en atténuant les émissions de gaz à effet de serre.

Cette stratégie énergétique favorise l'introduction des énergies renouvelables au niveau national en développant l'énergie hydroélectrique, l'énergie éolienne et l'énergie solaire (solaire thermique et solaire photovoltaïque) qui produiront respectivement 2000 MW à l'horizon 2020, portant ainsi à 42% la contribution des énergies renouvelables à la production électrique et fixée comme un objectif de porter à 52% la part d'utilisation des énergies renouvelables à l'horizon 2030 est d'une capacité totale de 10100 MW, dont 4560 MW solaires, 4200 MW d'éolien et 1330 MW hydroélectriques.

Afin de dérouler dans les meilleures conditions la stratégie énergétique nationale, un nombre de mesures d'ordre législatif et réglementaire ont été élaborées dans l'optique de doter le secteur énergétique national d'une meilleure visibilité au niveau de sa gouvernance.

Notre étude s'articule sur le raccordement de l'énergie solaire dans le réseau électrique public, don va citer seulement les lois relatives à ce sujet. [1]

La loi n ° 13 – 09 relative aux énergies renouvelables :

La loi n ° 13 – 09 relative aux énergies renouvelables a été promulguée par le dahir n ° 1–10–16 du 26 Safar 1431 (11 février 2010) dans l'objectif d'augmenter la part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national et dans la production d'électricité, en particulier par une augmentation significative de l'utilisation de la ressource éolienne, solaire et hydraulique et de donner la visibilité nécessaire aux opérateurs privés dans le domaine.

Cette loi introduit quatre innovations majeures :

- ❖ L'accès au réseau électrique national MT, HT et T HT pour tout producteur d'électricité d'origine renouvelable (article 5 de la loi).
- ❖ L'ouverture à la concurrence de la production d'origine d'électricité renouvelable.
- ❖ La possibilité d'exporter de l'électricité d'origine renouvelable par l'utilisation du réseau national et des interconnexions.
- ❖ La possibilité pour un développeur de construire une ligne de transport directe en cas d'insuffisance de capacité de réseau électrique national de transport et des interconnexions.

Malgré les importantes avancées enregistrées par ladite loi, sa mise en œuvre a révélé certaines insuffisances et lacunes qui se rapportent notamment à : La possibilité d'accès au réseau électrique de distribution de basse tension pour les installations utilisant les sources d'énergie renouvelable ainsi l'exclusion des projets de dont la puissance est supérieure à 12 MW dans la loi relatives à l'énergie électrique de source hydraulique. Pour combler les lacunes précitées dans la loi n° 13 – 09, la loi n° 58 – 15 a été élaborée par le Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau de l'Environnement. Les grands principes de cette loi sont :

- ❖ Possibilité de vente de l'excédent de la production électrique de sources renouvelables dans le cadre des installations connectées au réseau national de (HT) (T HT) MT et BT à l'ONEE et aux gestionnaires de réseaux de distribution.
- ❖ Augmentation du seuil de la puissance installée pour les projets d'énergie de source hydraulique de 12 à 30 MW.
- ❖ Ouverture du marché électrique de sources renouvelables de la Basse Tension (BT)

Pourtant la loi n° 58 – 15 était censée pour pallier les insuffisances en la matière de cadre législatif et réglementaire donné par la loi n° 13 – 09 et en faciliter l'application, en vue notamment d'accompagner le développement du secteur des énergies renouvelables et d'adapter aux évolutions technologiques futures. Mais la possibilité donnée aux producteurs d'électricité à partir des sources renouvelables d'accéder aux réseaux électriques publics de basse tension souffre toujours de l'absence des décrets d'applications.

II. Description des réseaux électriques :

1. Réseaux de transport THT :

C'est généralement le réseau qui permet le transport de l'énergie depuis les centres éloignés de production vers les centres de consommation (national, interconnexion et les zones urbaines). C'est sur le réseau THT que sont en principe branchées les centrales de grandes puissances et avec tension jusqu'à 400 KV

2. Réseaux de répartition HTB :

La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers les grands centres de consommation qui sont :

- ✓ Soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution MT.
- ✓ Soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MVA) La structure de ces réseaux est généralement de type aérien (parfois souterrain à proximité de sites urbains). Les protections sont de même nature que celles utilisées sur les réseaux de transport, les centres de conduite étant régionaux.

3. Réseaux de distribution HTA :

Les utilisateurs peuvent être groupés d'une façon très dense comme dans les villes ou bien séparés les uns des autres par des distances plus ou moins grandes comme dans les campagnes. Ils sont desservis par un réseau de distribution alimenté par un poste de répartition qui reçoit l'énergie, provenant de centrales éloignées, par l'intermédiaire du réseau de transport. Des lignes de distribution HTA partent des postes de répartition et alimentent des postes de transformation répartis en différents endroits de la zone à desservir ; ces postes de transformation abaissent la tension à une valeur convenable pour alimenter le réseau de distribution publique auquel les abonnés sont raccordés par des branchements avec de tension varie entre 15 KV et 30 KV

4. Réseaux de livraison BTA :

C'est le réseau qui nous est en principe familier puisqu'il s'agit de la tension 400/230V. Nous le rencontrons dans nos maisons via la chaîne : compteur, disjoncteur, fusibles. La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution HTA aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès aux abonnés BTA. Il représente le dernier niveau dans une structure électrique. 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. Ces réseaux sont le plus souvent exploités manuellement.

III. Constitution des réseaux électriques :

1. Les centrales électriques :

Il existe cinq principaux types de centrales électriques :

- Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dites centrales thermiques classiques,
- Les centrales nucléaires qui sont également des centrales que l'on peut qualifier de thermiques.
- Les centrales hydroélectriques.
- Les centrales solaires ou photovoltaïques : Cet autre moyen de fabriquer de l'électricité avec l'énergie solaire utilise les rayonnements lumineux du soleil, qui sont directement transformés en un courant électrique par des cellules à base de silicium ou autre matériau ayant des propriétés de conversion lumière/électricité. Chaque cellule délivrant une faible tension, les cellules sont assemblées en panneaux
- Les centrales éoliennes : L'énergie éolienne est produite sous forme d'électricité par une éolienne. Des éoliennes formées d'un mat surmonté d'un générateur électrique entraîné par une hélice, sont positionnées idéalement sur les plans d'eau ou les collines ventées.

Les éléments indispensables à la production de courant électrique sont :

- ✓ Une turbine en mouvement.
- ✓ Un alternateur : c'est-à-dire un aimant entraîné par la turbine et entouré d'une bobine qui produit le courant électrique.

2. Les postes électriques :

a. Différents types de postes électriques :

Il existe plusieurs types de postes électriques :

- Postes de sortie de centrale : le but de ces postes est de raccorder une centrale de production de l'énergie au réseau.
- Postes d'interconnexion : le but est d'interconnecter plusieurs lignes électriques.

- Postes élévateurs : le but est de monter le niveau de tension, à l'aide d'un transformateur.
- Postes de distribution : le but est d'abaisser le niveau de tension pour distribuer l'énergie électrique aux clients résidentiels ou industriels.

b. Les fonctions principales des postes électriques :

Les postes électriques ont 3 fonctions principales :

- le raccordement d'un tiers au réseau d'électricité (aussi bien consommateur que producteur type centrale nucléaire)
- l'interconnexion entre les différentes lignes électriques (assurer la répartition de l'électricité entre les différentes lignes issues du poste)
- la transformation de l'énergie en différents niveaux de tension.

3. Les lignes électriques :

Nous distinguons quatre types de lignes :

- Ligne de distribution à basse tension : Ce sont les lignes installées à l'intérieur des édifices, usines et maisons pour alimenter les moteurs, cuisinières, lampes, etc.
- Ligne de distribution à moyenne tension : Ce sont les lignes qui relient les clients aux postes de transformation principaux de la compagnie d'électricité
- Ligne de transport à haute tension : Ce sont les lignes reliant les postes de transformation principaux aux centrales de génération.
- Ligne de transport à très haute tension : Ce sont les lignes qui relient les centrales éloignées aux centres d'utilisation. Ces lignes peuvent atteindre des longueurs de 1000 km et elles fonctionnent à des tensions allant jusqu'à 800 kV.

Et deux types de ligne électrique :

- Lignes aériennes : Une ligne aérienne est composée de pylônes (supports), de câbles conducteurs et des isolateurs.
- Lignes souterraines : La structure des réseaux souterrains est un seul type de ligne : les dorsales. Ces réseaux de faible longueur et forte section des conducteurs sont le siège de chute de tensions réduites. De ce fait, et tenant compte de l'importance des incidents, il sera prévu une réalimentation soit par les réseaux voisins soit par un câble de secours. [1]

Chapitre 2 : Système photovoltaïque

Introduction :

L'épuisement des ressources fossiles, à plus ou moins long terme, et la flambée des cours du brut, la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie : l'utilisation et le développement des énergies renouvelables.

On considère qu'une énergie est renouvelable, toute source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable (d'où son nom) à l'échelle de l'homme mais aussi dans certains cas de l'humanité (solaire par exemple). Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil (l'énergie solaire mais aussi hydraulique, éolienne et biomasse...), la Lune (énergie marémotrice, certains courants : énergie hydrolienne...) et de la Terre (géothermique profonde...).

I. Energie solaire :

Peut être utilisée essentiellement de trois façons :

1. Chaleur passive :

Il s'agit de la chaleur que nous recevons naturellement du soleil. Cet élément peut être pris en compte dans la conception des bâtiments afin de réduire les besoins en chauffage.

2. Solaire thermique :

Technologie utilisant l'énergie du soleil pour fournir de l'eau chaude (ou du chauffage) aux maisons et aux piscines.

3. Energie photovoltaïque (PV) :

Technologie utilisant l'énergie du soleil pour fournir l'électricité alimentant appareils électriques et éclairage. Un système photovoltaïque produit de l'électricité grâce à la lumière du jour et non pas uniquement grâce à la lumière du soleil.

II. Energie photovoltaïque :

Désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale

solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée.

La cellule photovoltaïque est le composant électronique de base du système. Elle utilise l'effet photoélectrique pour convertir en électricité les ondes électromagnétiques (rayonnement) émises par le Soleil. Plusieurs cellules reliées entre elles forment un module ou capteur solaire photovoltaïque et ces modules regroupés entre eux forment une installation solaire. L'électricité est soit consommée ou stockée sur place, soit transportée par le réseau de distribution et de transport électrique.

III. Système photovoltaïque :

Un système photovoltaïque est un procédé ou une solution technique de construction, rigide ou souple, composé d'un module ou d'un film photovoltaïque et d'éléments non productifs assurant des fonctions de fixation aux éléments mitoyens, de résistance mécanique ou d'étanchéité. L'ensemble est conçu spécifiquement pour la production d'électricité d'origine photovoltaïque.

L'énergie solaire captée à l'aide de panneaux photovoltaïques représente une alternative énergétique viable pour la production d'électricité puisque cette dernière est une source renouvelable, à la fois propre, illimitée et avec un niveau de risque très réduit. Son potentiel est très important à l'échelle du besoin de l'activité humaine, il est aussi très largement reparté sur l'ensemble du globe ce qui lui confère un intérêt partagé par tous. Avec la diminution du prix des modules photovoltaïques (PV) et l'augmentation du prix des énergies fossiles, l'exploitation de cette ressource, à fort potentiel de développement, avec des systèmes de génération PV devient viable et rentable. [2]

IV. Cellule photovoltaïque :

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

1. Effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la lumière est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau (n) diffusent dans le matériau (p). la zone initialement dopée (n) devient chargée positivement, la zone initialement dopée n devient chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone n et les trous dans la zone (p). Une jonction (P-N) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la bande d'énergie interdite E_g communiquent leur énergie $h\nu$ aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi une paire électron-trou.

Sous l'effet de champ E , les électrons (e^-) migrent vers la zone N et les trous (e^+) vers la zone p, cela permet de générer un courant I électrique continu dans le circuit extérieur (le photocourant) sous une tension V non nulle dont la puissance est simplement $P = U$

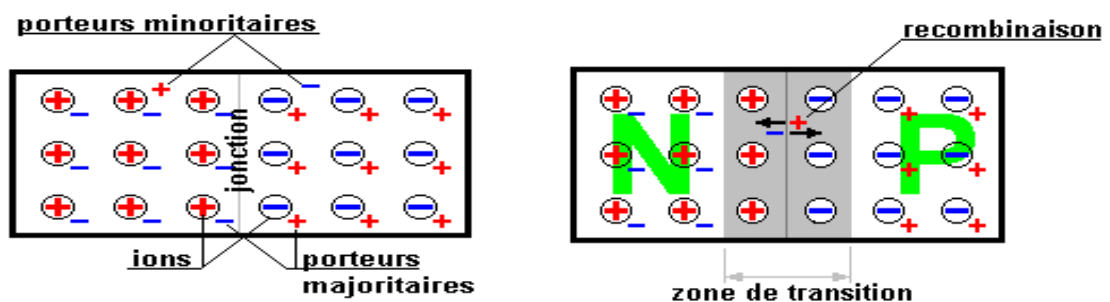


Figure 2: formation jonction P-N

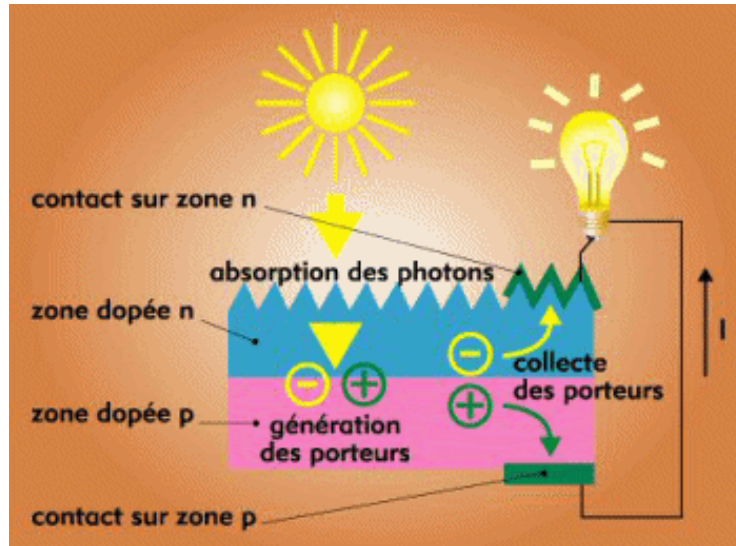


Figure 3: La génération du photo-courant

2. Les différents types des cellules photovoltaïques :

Les différentes techniques utilisées de nos jours, ont permis de mettre au point divers types de cellules au silicium : monocristallin, poly-cristallin, amorphe. Il existe aussi d'autres types de cellules qui utilisent d'autres types de matériaux.

- ✓ Cellule monocristallin : ce sont des cellules élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal.

Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grandes dimensions. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme. Les cellules monocristallines sont les plus commercialisés offrant un bon rendement électrique compris entre 10% et 17%, mais font appel à une méthode de production plus complexe et donc coûteuse. En effet, l'obtention d'un cristal pur nécessite une grande quantité d'énergie.



Figure 4: cellule monocristalline

- ✓ Cellule poly-cristallines : ce sont des cellules élaborées à partir d'un bloc silicium cristallisé en forme de cristaux multiples, les cristaux sont orientés d'une manière aléatoire.

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. La cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux. Les cellules poly-cristallines ont un rendement électrique compris entre 11% et 15%. Leur procédé de fabrication consomme moins d'énergie. Elles ont ainsi un coût de production plus faible mais un rendement légèrement inférieur à celui des cellules monocristallines. [3]

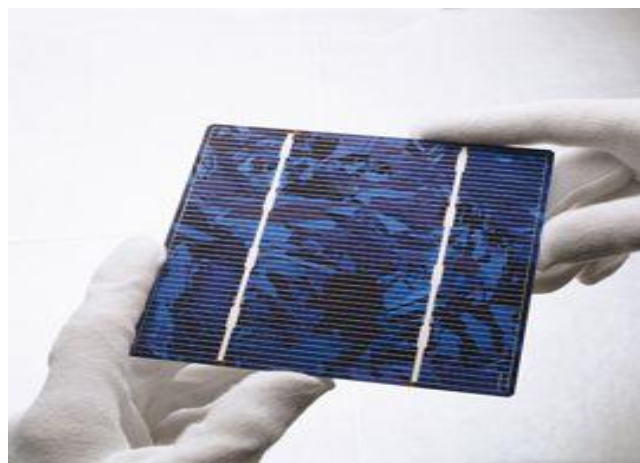


Figure 5: cellule poly-cristalline

- ✓ Cellule amorphes : ces cellules sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est disposé une fine couche de silicium (l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal)

Le silicium lors de sa transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est marronne. C'est la cellule des calculatrices et des montres dites « solaires », leurs coûts de fabrication sont les plus intéressants, mais elles ont un rendement compris entre 5 et 7%.

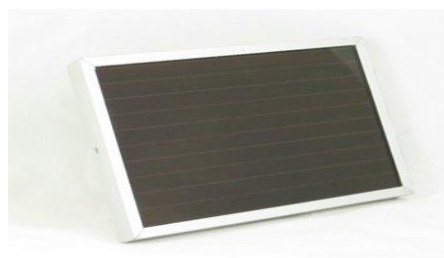


Figure 6: cellule amorphe

3. Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque :

L'expérience montre qu'à l'obscurité, une cellule solaire suit le comportement d'une diode classique, elle commence à conduire lorsque la tension appliquée est supérieure à la tension de seuil V_s . Dans le cas d'une cellule idéale à l'obscurité, caractéristique I-V peut être représenté par la relation suivant :

$$I_{obs} = I_s * \exp\left(\frac{V}{n * V_{th}} - 1\right)$$

- I_s : le courant de saturation en Ampère (A).
- n : le facteur de qualité de la diode, sans dimension.
- V_{th} : Le potentiel thermique en Volt(V), il est donné par : $V_{th} = (K T) / q$
- K : la constante de Boltzmann ($1.38066 \times 10^{-23} \text{J/K} = 8.61400 \times 10^{-5} \text{eV/K}$).
- T : la température absolue en Kelvin (K).
- q : la charge absolue d'un électron en coulomb ($1.60281 \times 10^{-19} \text{C}$).

Sous éclairement, un terme I_{ph} , tenant compte du photo-courant généré est rajouté, On obtient le circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque idéale sous éclairement qui est représenté par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_{obs} = I_{ph} - I_s * \exp\left(\frac{V}{n * V_{th}} - 1\right)$$

Dans le cas d'une cellule photovoltaïque réelle, d'autres paramètres tenant compte des effets résistifs et des fuites vers les bords, qu'ils doivent être pris en considération et l'équation de la caractéristique I-V devient alors :

$$I = I_{ph} - I_{obs} = I_{ph} - I_s \left(\exp\left(\frac{V}{n * V_{th}}\right) - 1 \right) - \frac{V + I * R_s}{R_{sh}}$$

Et par conséquence le schéma équivalent d'une cellule solaire réelle est représenté sur la figure par un générateur de courant (I_{ph}), une diode et deux résistances parasites (R_s) et (R_{sh}).

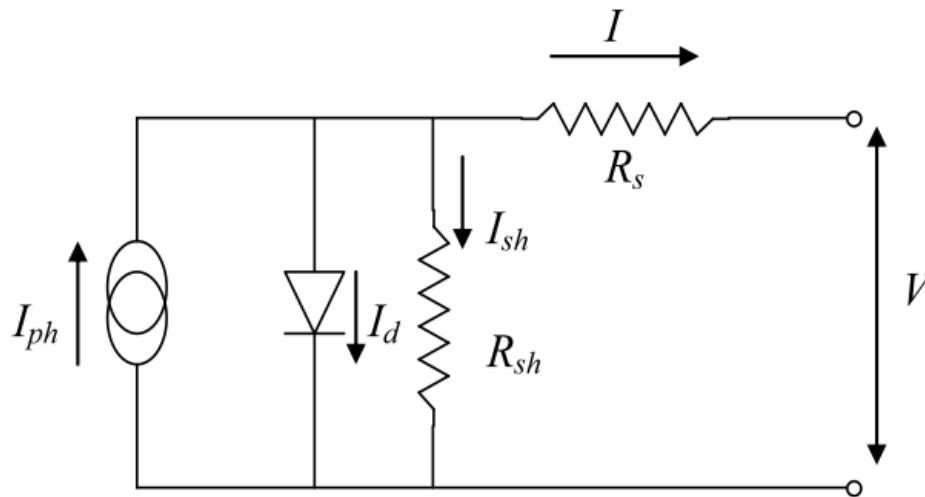


Figure 7: Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque

- Le générateur du courant (I_{ph}) : il délivre le courant I_{ph} correspondant au courant photogène.
- La diode (D) : modélise la jonction P-N.
- La résistance série R_s : modélise les pertes résistives au sein de la photopile.
- La résistance parallèle R_{sh} : correspond à une résistance de fuite entre les deux zones N et P de la jonction, il en résulte qu'une partie du courant I_{ph} sera dérivée par cette résistance et ne pourra être délivrée à la charge. Cette résistance devra être la plus élevée possible.

4. Caractéristiques d'une cellule solaire :

Les caractéristiques d'une cellule solaire photovoltaïque sont caractérisées par un certain nombre de paramètres extraits de la caractéristique courant-tension [

- La tension de circuit ouvert (V_{oc})

C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule et pour laquelle le courant débité par la cellule solaire est nul, elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = n * V_{th} * \log\left(1 + \frac{I_{ph}}{I_s}\right)$$

- Courant de court-circuit I_{cc} :

Est le courant qui circule dans la cellule sous éclairage sans application de tension. Il est exprimé par :

$$I_{cc} = I_{ph}$$

- Point du fonctionnement P_m (V_m , I_m) :

La puissance maximale d'une cellule photovoltaïque éclairée est la grandeur essentielle pour évaluer sa performance, elle est donnée par la relation :

$$P_m = V_m * I_m$$

Elle traduit sur la caractéristique I-V le point du fonctionnement P_m (V_m , I_m) qui est situé au coude de la caractéristique I-V et dit point de puissance maximale où les valeurs de tension V_m et du courant I_m appelées également tension et courant maximums respectivement.

- Facteur de forme FF :

Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale et le produit $I_{cc} \times V_{co}$ ce facteur est donné par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_m}{I_{cc} * V_{co}} = \frac{I_m * V_m}{I_{cc} * V_{co}}$$

- Rendement η :

Il est défini comme le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule.

$$\eta = \frac{P_m}{(P_{inc} * S)}$$

- P_{inc} : Puissance incidente

- S : Surface de la cellule photovoltaïque

V. Les générateurs de photovoltaïques :

Les générateurs photovoltaïques ou bien les panneaux photovoltaïques sont le regroupement de plusieurs cellules solaires en série et/ou en parallèle afin de permettre leur utilisation à des tensions et à des courants pratiques, tout en assurant leur isolation électrique et leur protection contre les facteurs extérieurs par l'encapsulation. Cette protection nous permet d'augmenter la durée de vie des panneaux photovoltaïques. L'encapsulation consiste à la mise en sandwich d'un ensemble de composants. [2]

1. Association des panneaux /des cellules photovoltaïques :

- ✓ Panneaux en série :

Une association de NS cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation () résume les caractéristiques électriques d'une association série de NS cellules.

$$V'_{co} = N_s * V_{co}$$

Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ($V_{cons} = 0.6 \text{ V} \times 36 = 21.6 \text{ V}$).

V_{co} : La tension du circuit ouvert.

Branchement de panneaux en série

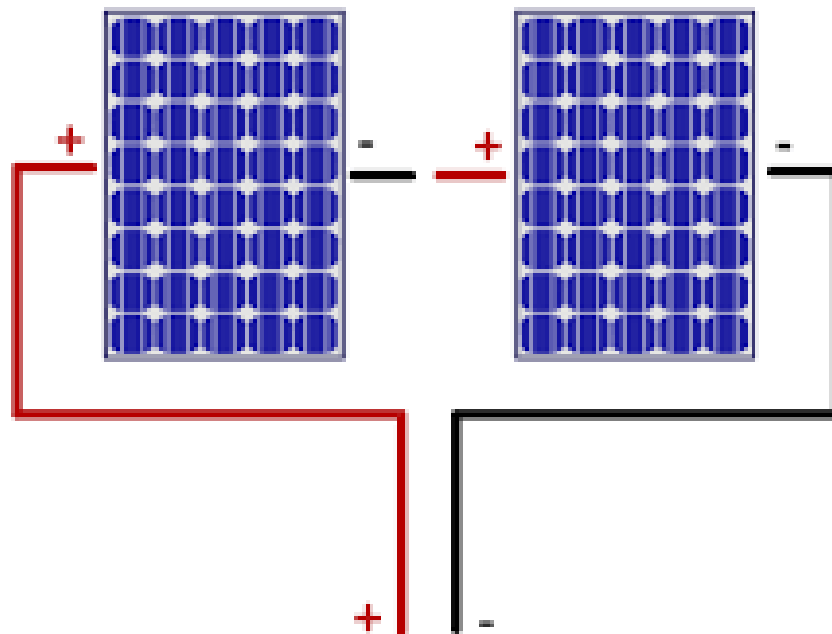


Figure 8: branchement de panneaux en série

✓ Panneaux en parallèle :

D'autre part, une association parallèle de NP cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie de générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique

résultant du groupement est obtenue par addition des courants. L'équation () résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de NP cellules :

$$I'_{cc} = N_p * I_{cc}$$

Si l'on désire avoir un générateur PV ayant une courant de sortie plus intense, on peut soit faire appel à des cellules PV de plus grande surface et de meilleur rendement, soit associer en parallèle plusieurs modules PV de caractéristiques similaires. Pour qu'un générateur PV ainsi constitué puisse fonctionner de façon optimal, il faut que les (NS, NP) cellules se comportent toutes de façon identique. Elles doivent pour cela être issues de la même technologie, des mêmes conditions de fonctionnement (éclairage, température, vieillissement et inclinaison).

Branchement de panneaux en parallèle

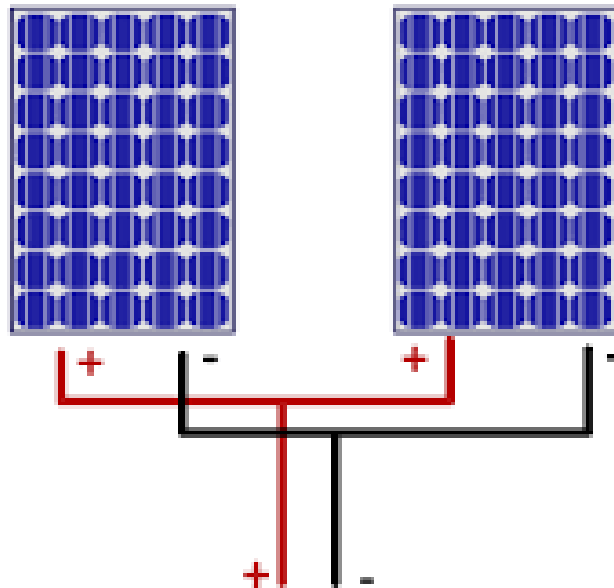


Figure 9: branchement de panneaux en parallèle

✓ Panneaux en série-parallèle :

Les panneaux solaires sont généralement limités par un facteur, le régulateur de charge. Les régulateurs de charge sont uniquement conçus pour accepter une certaine quantité d'ampérage et de tension. Souvent, pour les grands systèmes. L'association série-parallèle de panneaux solaires nécessite également l'emploi de diodes anti-retour, afin que le courant ne parcourt pas une chaîne de panneaux en sens inverse. Ces diodes sont à placer en sortie de

chaque bloc de panneaux montés en série (de chaque « string », donc), avant de relier ces blocs en parallèle.

2. Constitution d'un panneau photovoltaïque :

Le panneau photovoltaïque (ou module PV) est composé de cellules solaires qui ont les mêmes caractéristiques électriques, connectées entre elles puis enrobées dans une résine transparente, l'EVA. Les faces avant et arrière des cellules sont recouvertes respectivement d'un verre et d'un film multicouche étanche.

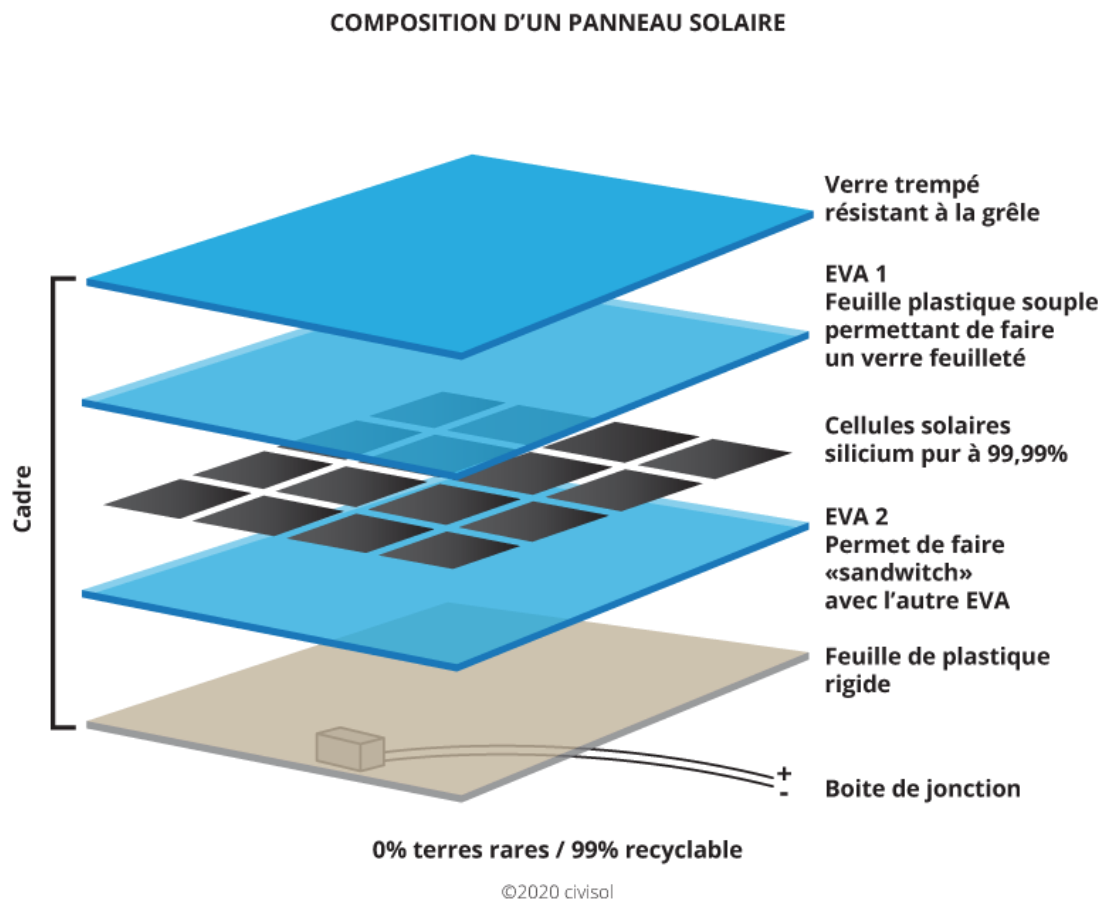


Figure 10: Composition d'un panneau photovoltaïque

3. Caractéristique I-U d'un panneau photovoltaïques :

(La figure) représente la courbe $I = f(U)$ d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température.

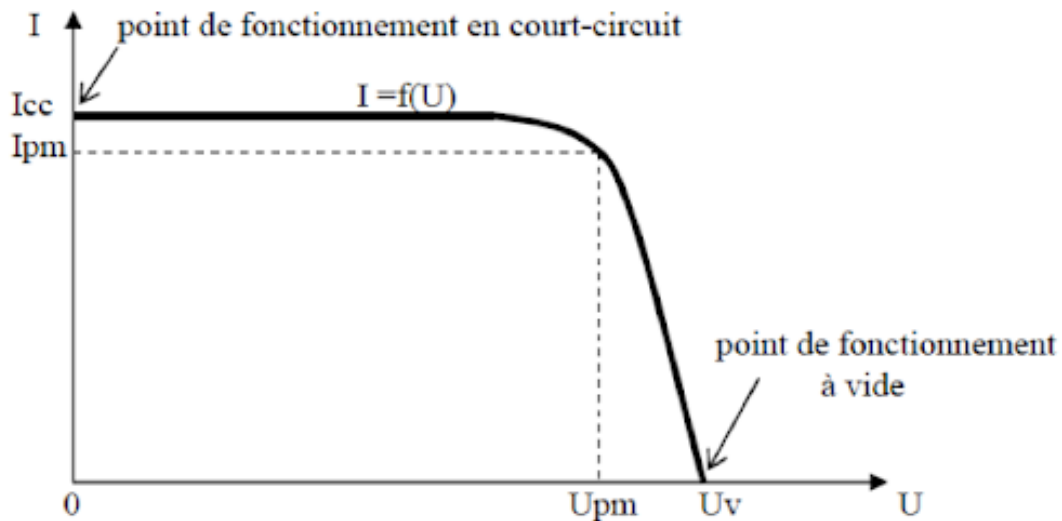


Figure 11: Caractéristiques courant / tension.

Sur cette courbe, on repère :

- le point de fonctionnement à vide : U_v pour $I = 0A$
- le point de fonctionnement en court-circuit : I_{cc} pour $U = 0V$

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un module photovoltaïque sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le module photovoltaïque est considéré comme une source de puissance avec un point P_m où la puissance se trouve être maximale. Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée.

4. Caractéristiques P-U d'un panneau photovoltaïques :

La puissance délivrée par la cellule a pour expression $P = U.I$. Pour chaque point de la courbe précédente, on peut calculer la puissance P et tracer la courbe $P = f(U)$.

Cette courbe a l'allure suivante :

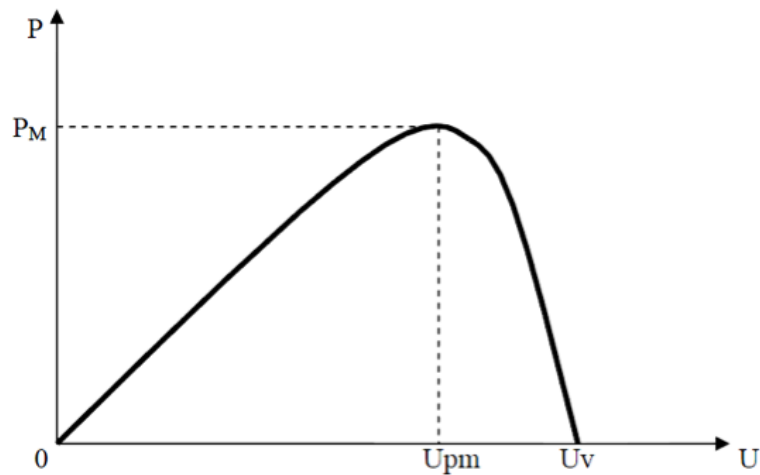


Figure 12: Caractéristique puissance/tension

Cette courbe passe par un maximum de puissance (P_M). A cette puissance correspond, une tension U_{pm} et un courant I_{pm} que l'on peut aussi repérer sur la courbe $I = f(U)$.

Il y a un compromis entre la tension et le courant du panneau pour avoir une puissance maximale.

Pour une cellule monocristalline de $10 \times 10 \text{ cm}$, les valeurs caractéristiques sont : $P_M = 1,24 \text{ W}$, $U_{pm} = 0,45 \text{ V}$, $I_{pm} = 2,75 \text{ A}$ ($G = 1000 \text{ W/m}^2$ et $\theta = 25^\circ \text{C}$).

L'éclairement et la température modifient la caractéristique $I - V$ des modules photovoltaïques. [2]

5. Influence des différents paramètres sur les caractéristiques $I(V)$:

L'éclairement et la température modifient la caractéristique $I-V$ de la cellule solaire, pas dans sa forme générale mais pour les valeurs I_{cc} , V_{co} , I_m et V

➤ Influence de l'éclairement :

La figure () présente les caractéristiques courant-tension d'une cellule monocristalline typique de $(10 \times 10) \text{ cm}^2$ pour plusieurs intensités du rayonnement solaire. On remarque que le courant du court-circuit I_{cc} est directement proportionnel à l'intensité lumineuse incidente ; la variation d' I_{cc} avec l'éclairement est donnée sous la forme suivante :

$$I_{cc} \approx I_{ph} = \alpha(t) * E * S$$

Où :

E : est l'éclairement en W/m^2 .

S : est la surface de la cellule en m^2 .

$\alpha(T)$: coefficient dépendant faiblement de la température, il est exprimé en A/W .

D'autre part, l'accroissement de l'éclairement provoque une amélioration de la puissance produite par le module photovoltaïque et une légère augmentation de la tension en circuit ouvert V_{co} .

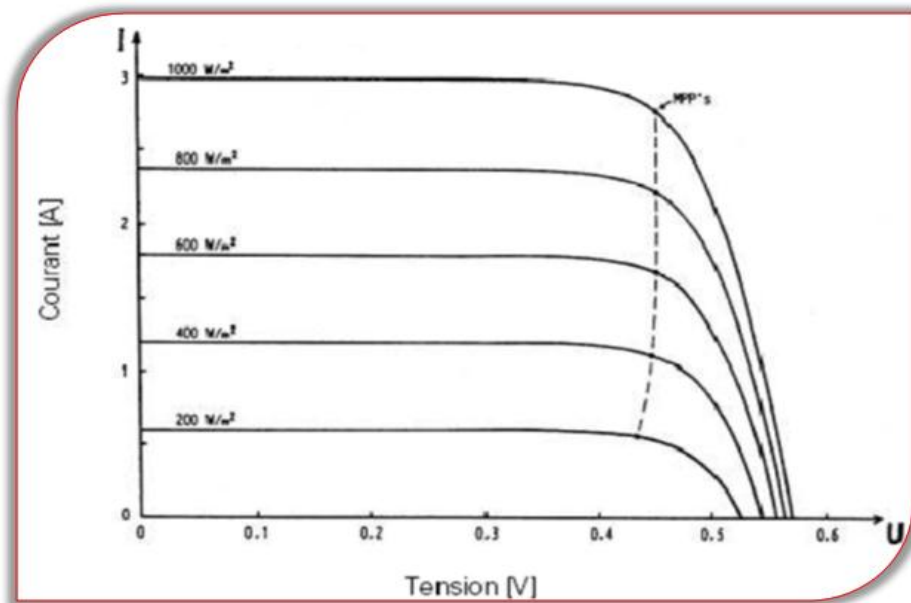


Figure 13: la caractéristique I-V sous l'effet de l'éclairement

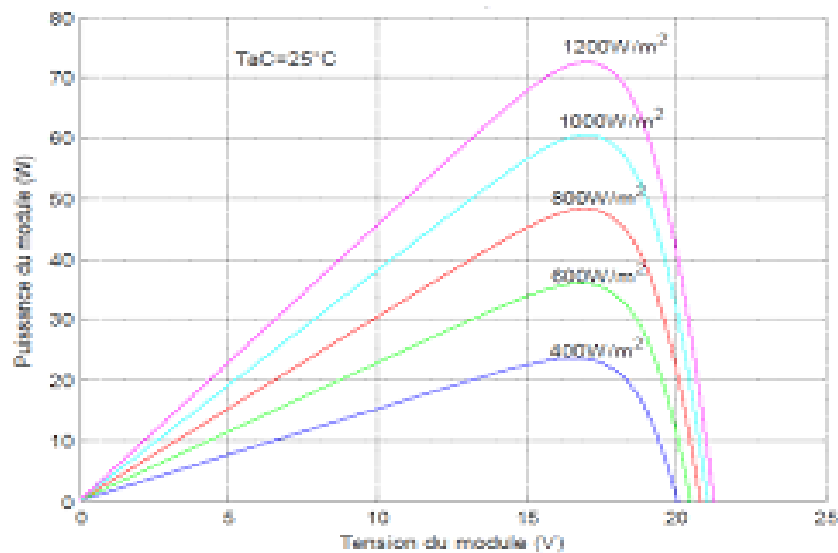


Figure 14: la caractéristique P-V sous l'effet de l'éclairement

➤ Influence de la température :

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires puisqu'elles sont exposées au rayonnement solaire.

La figure (15) montre l'influence de la température, sur la caractéristique $I(V)$ de la cellule solaire lorsque la température varie. On observe que l'augmentation de la température provoque une augmentation du courant du court-circuit (I_{cc}), en même temps on assiste à une diminution nette de la tension en circuit ouvert (V_{co}). L'augmentation de la température entraîne une diminution de la tension (V_m) et un léger accroissement du courant (I_m) et par la suite une baisse relative de la puissance maximale (P_m).

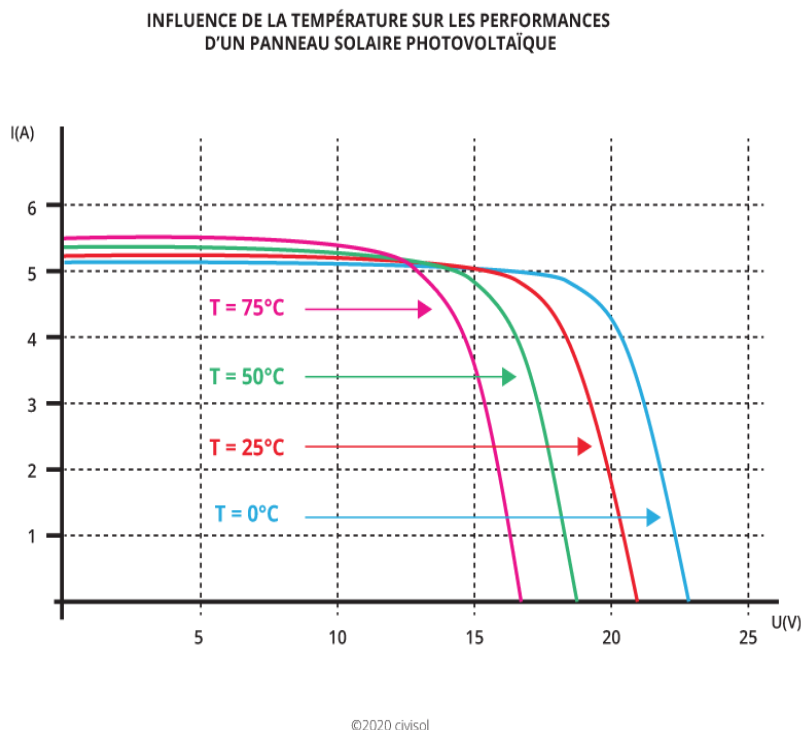


Figure 15: la caractéristique I-V sous l'effet de la température

VI. Installations photovoltaïques :

Un système photovoltaïque est un procédé ou une solution technique de construction, rigide ou souple, composé d'un module ou d'un film photovoltaïque et d'éléments non productifs assurant des fonctions de fixation aux éléments mitoyens, de résistance mécanique ou d'étanchéité. L'ensemble est conçu spécifiquement pour la production d'électricité d'origine photovoltaïque.

1. Eléments centrales d'une installation photovoltaïques :

a) Les modules photovoltaïques :

Le module photovoltaïque est par définition un ensemble de photopiles assemblées pour générer une puissance électrique exploitable lors de son exposition à la lumière. En effet une photopile élémentaire ne génère pas suffisamment de tension : entre 0,5 et 1,5V selon les technologies. Il faut toujours plusieurs photopiles en série pour générer une tension utilisable.

Figure 16: les panneaux photovoltaïques.



b) Les batteries de stockages :

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes est en général assuré par des batteries, composants utilisés dans la majorité des cas. Seules quelques applications utilisant l'énergie au fil du soleil par exemple du pompage ou de la ventilation peuvent se passer d'accumuler l'énergie ; aussi, la maîtrise des batteries est un élément essentiel au succès des systèmes autonomes. Dans ces systèmes, le stockage d'énergie représente environ 13 à 15% des investissements initiaux mais sur une durée d'exploitation de vingt ans, ce coût peut atteindre 50% des frais totaux ; il est donc primordial d'essayer de réduire ce prix en augmentant la durée de vie des batteries. En effet, elle est toujours inférieure à celles des panneaux, il faut donc les remplacer plusieurs fois au cours de la durée de service du système (tous les deux, cinq ou dix ans selon le cas). Les batteries utilisées dans les systèmes solaires autonomes sont en général de type plomb-acide (Pb). Les batteries cadmium-nickel (Ni-Cd) ne sont plus que rarement utilisées car leur prix est beaucoup plus élevé et elles contiennent du cadmium (toxique). Leurs remplaçantes, les batteries nickel-métal-hydrure (Ni-MH) sont intéressantes, leur emploi étant plus fréquent dans les applications professionnelles haut

gamme, ou de très petite taille ($< 2 \text{ Ah}$). On peut connecter en série/parallèle des batteries solaires exactement identiques et de même âge. La mise en parallèle n'est pas cependant pas recommandée ; il faut la réserver aux installations ou la fourniture de grands éléments n'est pas possible. Dans ce cas, il faut veiller à l'équilibrage des courants par un câblage symétrique. Pour chaque chaîne de batteries (ensemble de batteries câblées en série), il faut monter un fusible en série dans le câblage. Pour les petits systèmes, il est toujours avantageux de surdimensionner une batterie au départ, la mise en parallèle de batteries d'âges différents étant fortement déconseillée, la batterie la plus âgée faisant vieillir prématurément la nouvelle.



Figure 17: batterie de stockage

c) Régulateur de charge :

Le régulateur est l'élément central d'un système photovoltaïque autonome : il contrôle les flux d'énergie. Il doit protéger la batterie contre les surcharges (solaire) et décharges profondes (utilisateur). Il doit également assurer la surveillance et la sécurité de l'installation (surcharge, alarmes, fusibles et inversement de polarité). Dans un système plus élaborés, il peut aussi commander la recharge par d'autres sources d'énergies (génératrice d'appoint, éolienne, hydraulique). Dans certain cas, il peut réaliser une transformation de puissance (recherche du point de puissance maximum, Maximum Power Point Tracker, MPPT). Les régulateurs de charge de systèmes PV autonomes peuvent être classés en trois groupes principaux :

- les régulateurs séries, qui incorporent un interrupteur entre le générateur et l'accumulateur pour arrêter la charge.
- Les régulateurs shunt, dont l'interrupteur court-circuite le générateur solaire en fin de charge.

- Les régulateurs à recherche de point de puissance maximum (MPPT), qui utilisent un circuit électronique spécial permettant de soutirer en permanence du champ de capteurs sa puissance maximal.

A ces types de circuits, on ajoute en général un régulateur de décharge pour empêcher les décharges profonde de la batterie.

d) Les onduleurs/ convertisseurs :

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer le courant continu fourni par les panneaux ou les tensions continues délivrées par les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, soit à une tension alternative. Les convertisseurs utilisés dans les systèmes PV sont de types DC/DC et DC/AC.

Les principales fonctions de l'onduleur sont les suivantes :

- Conversion du courant continu généré par les champs photovoltaïques en courant alternatif et injection dans le réseau de distribution.
- Ajustement de la tension à l'entrée de l'onduleur pour un fonctionnement à puissance maximale des champs photovoltaïques. D'autre part des fonctions de sécurité sont généralement intégrées dans l'onduleur couplé au réseau à savoir :
- Protection des biens et des personnes. - Protection du réseau électrique par découplage.
- Le suivi de $P_{\max}$ du champ P V en fonction de l'ensoleillement et de la température (MPPT tracking)

Le Maximal Power Point Tracker (MP P T) est un système intégré à l'onduleur et qui permet de caler le courant et la tension d'entrée de l'onduleur sur le point de puissance maximale du groupe photovoltaïque. Il est peut être calculé. Grâce à des méthodes et des algorithmes. Dans notre cas on va se limiter seulement à la méthode de la Perturbation et l'Observation (P & O).

On distingue entre deux types des Trackers (MPPT) :

- **Onduleur mono-tracker** : Il est composé d'un seul système MP P T (Maximal Power Point Tracking), d'un convertisseur continu → alternatif, d'une protection différentielle et d'une protection de découplage.

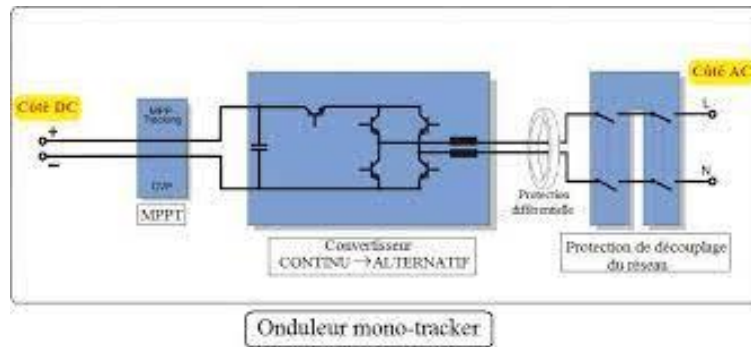


Figure 18: onduleur mono-tracker.

- **Onduleur multi-tracker** : Il est constitué d'un convertisseur continu → continu, d'un convertisseur continu → alternatif, d'une protection différentielle et d'une protection de découplage.

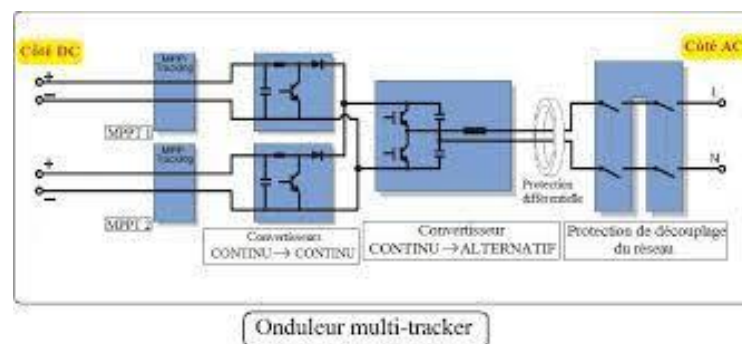


Figure 19: onduleur multi-tracker.

La principale caractéristique de l'onduleur destiné aux systèmes P V est la recherche du meilleur point de fonctionnement du système. L'unité de régulation de l'onduleur assure un fonctionnement du générateur P V au point de fonctionnement optimal (Point de Puissance Maximale ou MP P) pour garantir une production de puissance électrique maximale.

e) Les organes de protection et de sécurité :

Un générateur photovoltaïque est par définition une installation électrique extérieure qui doit être protégée contre les effets des intempéries telles que la pluie, le vent, la foudre ainsi que les surtensions et les surintensités.

i. Coffret de protection DC :

- **Protection contre les surintensités :**



Figure 20: fusible

- **Protection contre la foudre et la surtension :**

Investir dans les systèmes photovoltaïques est coûteux et suppose une technologie sophistiquée. Mais la durée de vie de ces systèmes se mesure en décennies et cet investissement, même élevé peut être récupéré. Pour fonctionner correctement pendant tout ce temps.

le système doit être protégé contre les coups de foudre directs et les surtensions induites. Ces mesures de protection doivent être prises en compte dès la conception du projet. Un parafoudre doit être installé avant et après l'onduleur. Pour des raisons de sécurité d'incendie, dans la plupart des cas, un parafoudre est installé directement auprès des panneaux solaires.



Figure 21: parafoudre de deux pôles.

- **Coupure et Sectionnement :**

L'interrupteur sectionneur est un dispositif qui se déplace général en amont de l'onduleur, remplissant la fonction de coupure en charge préalable à tout sectionnement. Le sectionneur DC permet d'isoler électriquement le champ P V afin de permettre des opérations de maintenance en sécurité.



Figure 22: interrupteur sectionneur.

ii. **Coffret de protection AC :**

La partie alternative d'une telle installation photovoltaïque nécessite la mise en place d'un interrupteur-sectionneur de tête, d'un dispositif de protection différentielle ainsi que de parafoudres AC.

- **Le Disjoncteur différentiel :**

Le disjoncteur différentiel est constitué de l'association d'un disjoncteur magnétothermique et d'un bloc différentiel. Il a pour rôle de réaliser la protection des biens et des personnes en protégeant notamment l'onduleur contre les surcharges et en éliminant les risques de contact indirect.

- **Parafoudre AC :**

Pour des raisons équivalentes au parafoudre DC, un parafoudre dans le côté alternatif est nécessaire. Le parafoudre AC doit être installé au plus près de l'onduleur une distance inférieure 30 m. Il faut également veiller à ce que sa tension maximale soit supérieure à la tension maximale en sortie de l'onduleur.

f) **Les câbles :**

Les câbles DC Ce sont Les câbles reliant entre les modules et alimentant les entrées DC de l'onduleur. Ces câbles doivent assurer un câblage résistant aux intempéries et aux variations de température du climat, des rayons UV. Leur durée de vie est de 25 ans.



Figure 23: les câbles DC

g) **Les connecteurs :**

Afin d'éviter tout risque d'inversion de polarité lors raccordement des modules photovoltaïques entre eux et du raccordement des câbles d'extrémité des strings, les fabricants proposent des connecteurs type "male" et "femelle". Ces connecteurs spécifiques disposent également de très bonnes caractéristiques diélectriques et d'étanchéité.



Figure 24: les connecteurs

VII. Les types des installations photovoltaïques :

La puissance photovoltaïque requise est la puissance que doit fournir l'ensemble des panneaux photovoltaïques pour couvrir le besoin en énergie électrique de l'application, quelles que soient les conditions. Elle est calculée sur la base de la consommation électrique totale (pour un système autonome) ou des surfaces disponibles (pour un système raccordé au réseau) d'une part et, d'autre part, de l'ensoleillement journalier et de l'efficacité des composants du système : batterie, panneau photovoltaïque, onduleur, câblage...etc.

Le générateur photovoltaïque convertit la radiation solaire incidente en puissance électrique et en général, on distingue deux types d'installation des systèmes photovoltaïques

1. Installation photovoltaïque isolé/autonome :

Ces installations ne sont pas connectées au réseau et elles sont utilisées pour électrifier des circuits isolés, distants du réseau électrique, difficile à alimenter car ils sont situés dans des zones peu accessibles ou caractérisées par de basses consommations d'énergie qui rendent presque inutile un quelconque branchement au réseau public. Dans ces installations il est nécessaire de stocker l'énergie produite par les modules photovoltaïques en utilisant des batteries pour garantir une continuité d'énergie, de nuit ou lorsqu'il n'y a pas assez de soleil.

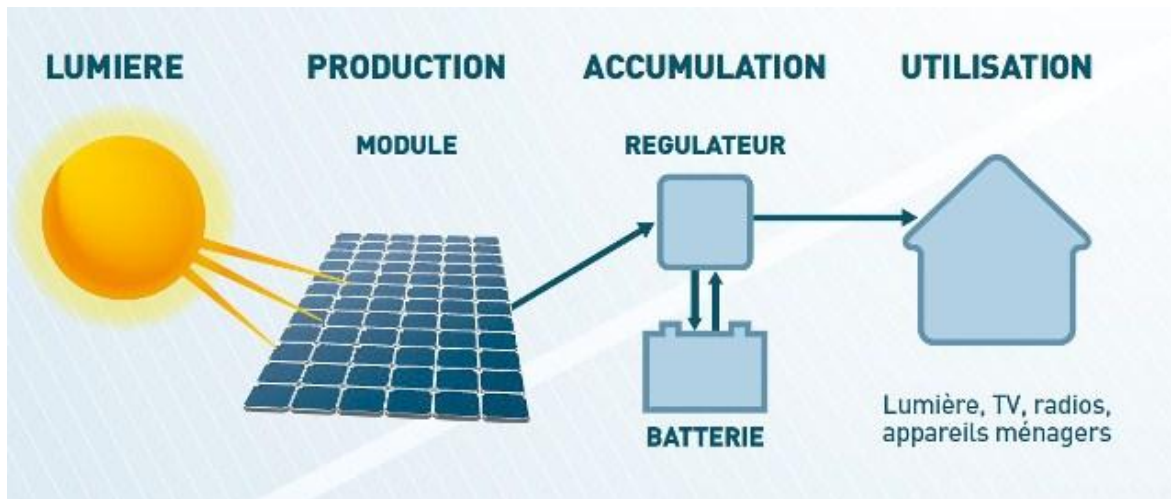


Figure 25: installation isolé

Les principaux éléments d'un système photovoltaïque autonome sont :

- **Le panneau photovoltaïque** : il produit un courant électrique continu
- **Le régulateur** : il optimise la charge et la décharge de la batterie suivant sa capacité et assure sa protection.
- **L'onduleur** : transforme le courant continu en alternatif pour alimenter les récepteur AC.
- **Les batteries** : sont chargées de jour pour pouvoir alimenter la nuit ou les jours de mauvais temps.

2. Installation photovoltaïque hybride :

Actuellement, les systèmes hybrides d'énergie associent au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie sont des générateurs diesels ou bien le réseau électrique public, et au moins une source d'énergie renouvelable. Les sources renouvelables comme le photovoltaïques et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante. Leur association avec des sources classique permet d'obtenir une production électrique continue.

La difficulté de ce type de systèmes est d'équilibrer les différentes sources d'énergie de façon à toutes les optimiser, étant entendu que les sources thermiques (gasoil, gaz) et le réseau électrique public sont toujours les appoints de dernier recours. Étant donné que l'énergie solaire fluctue et que la capacité de production des groupes électrogènes est limitée à une certaine plage, il est souvent possible d'inclure le stockage de la batterie pour optimiser la contribution de l'énergie solaire à la production globale du système hybride.



Figure 26: installation photovoltaïque hybride

3. Installation photovoltaïque raccordées au réseau :

Les systèmes connectés au réseau sont aujourd'hui prisent sérieusement pour compléter la génération conventionnelle d'énergie dans plusieurs pays. Bien qu'ils sont devenus viables dans le développement économique, la participation des Photovoltaïques dans la génération d'énergie de grande échelle est augmentée à cause des effets environnementaux défavorables des sources conventionnelles d'énergie. Elles utilisent le réseau comme un stock, et transforment la totalité de l'électricité produite en courant alternatif de 220 V ou 380 V.

De jour, les installations photovoltaïques couplées au réseau injectent de l'énergie dans le réseau à travers le convertisseur. Au contraire, pendant la nuit le propriétaire de l'installation peut "récupérer" cette énergie. [3]

Ces éléments sont :

- Les panneaux photovoltaïques.
- Un onduleur on Grid.

- Un compteur d'énergie

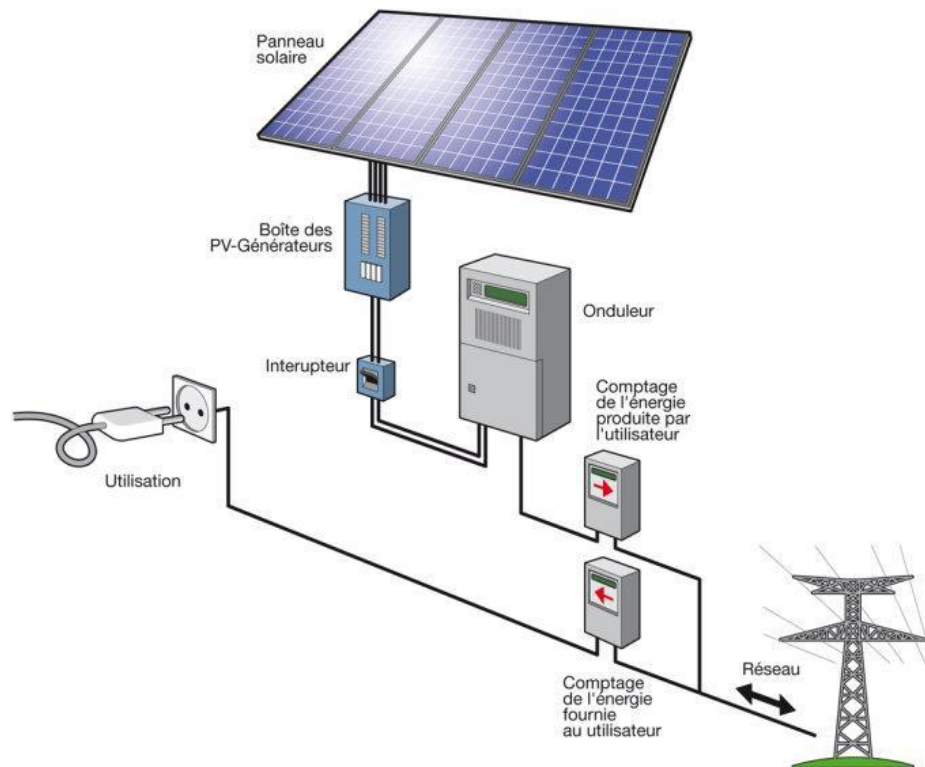


Figure 27: installation raccordée au réseau

Conclusion :

Grâce à des panneaux en électricité, ce phénomène consiste à créer une différence de potentiel aux bornes de la cellule solaire en libérant des électrons sous l'action des photons.

Dans ce chapitre nous avons présenté la structure de cellule solaire dont on a décrit son principe de fonctionnement. La cellule PV présente une caractéristique $I(V)$ non linéaire, présente un point de puissance maximal caractérisé par un courant (l'effet de la variation de la température et de l'éclairement sur les caractéristiques électriques des panneaux solaires).

L'illumination solaire et la température varient pendant la journée, ce qui fait que la puissance solaire extraite du panneau solaire n'est pas toujours égale à la puissance maximale donnée par le constructeur (définie dans les conditions standard cellule de 25°C, air masse AM1.5)

Chapitre3 : Dimensionnement des installations photovoltaïques raccordées au réseau électrique :

Introduction :

Une installation photovoltaïque raccordée au réseau est une installation qui produit de l'électricité grâce au soleil et pour laquelle tout ou partie de l'électricité produite est injectée sur le réseau électrique. Elle est constituée essentiellement de modules photovoltaïques et onduleurs.

« Dimensionner », c'est fixer la « taille », les caractéristiques optimales de chaque élément d'un système dont on connaît la configuration. En effet, le dimensionnement peut amener finalement à changer le système, par exemple s'il s'avère que des éléments « optimaux » sur le plan technique sont très chers, ou indisponible, etc...

La méthode de dimensionnement consiste à déterminer d'abord la puissance crête qui fournit l'énergie électrique nécessaire pendant le mois le moins ensoleillé (généralement décembre). Elle consiste à déterminer le moment où vous avez besoin d'électricité, et à mesurer votre consommation. Cette étape comporte peu de calculs, mais demande relativement beaucoup de réflexion car une erreur à ce stade faussera vos résultats jusqu'à la fin.

I. Calculer la puissance crête :

Il y a trois méthodes pour la détermination de la puissance crête selon le type d'installation d'injection :

- Détermination à travers la surface disponible pour l'installation photovoltaïque.
- Détermination à travers le budget du client.
- Détermination à travers la consommation journalière de la maison.

1. La puissance crête à partir de la surface d'installation :

- i. L'installation des panneaux intégrée à la toiture (inclinaison 0°)



Figure 28: installation photovoltaïques non-incliné.

La surface totale de la toiture est égale à $St = L \times l$ et les dimensions du panneau sont sa longueur L_p et largeur l_p .

La surface du panneau vaut :

$$Sp = Lp * lp$$

Donc le nombre des panneaux (N_p) pour couvrir la totalité de la surface est :

$$Np = \frac{St}{Sp}$$

Et la puissance totale crête à installer sera :

$$Pc = Np * Pp,c$$

Avec :

$P_{p,c}$: La puissance crête d'un panneau unitaire .

ii. Installation des panneaux non-intégrée au toit (inclinée).



Figure 29: installation photovoltaïque inclinée

On peut calculer la surface totale de toiture par la relation suivante :

$$St = L * l$$

Une mauvaise conception du système peut provoquer l'ombrage de modules placés derrière d'autres modules. En règle générale, il faut effectuer une séparation (d) obtenue entre les rangées de modules garantit l'absence de l'ombrage mutuel, même au pire jour d'irradiation (jour où le soleil au zénith est le moins haut).

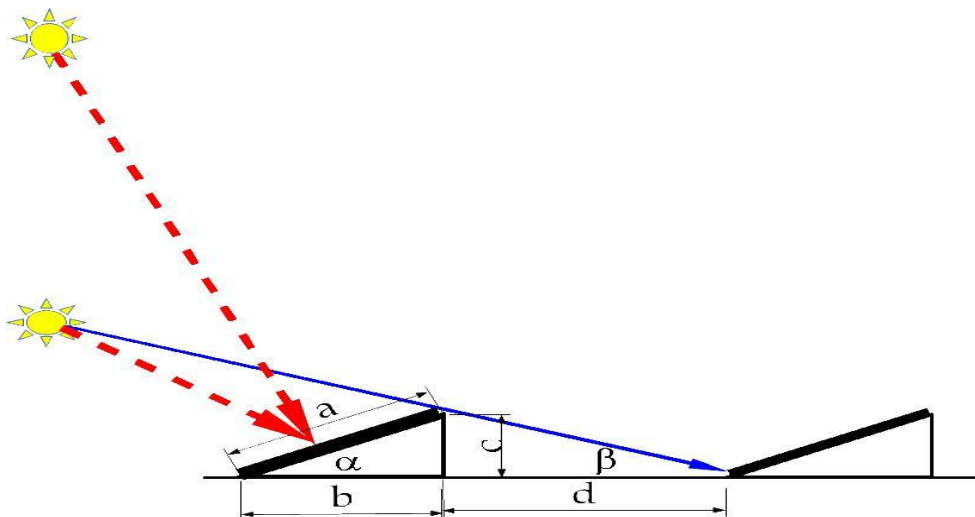


Figure : Représentation de la distance entre les rangées des panneaux photovoltaïques

La distance d entre deux rangées des panneaux est déterminée par la relation :

$$b + d = L * \frac{\sin(\alpha)}{\tan(\beta)} + \cos(\alpha)$$

- L : la hauteur du champ de module (la longueur d'un panneau).
- α : L'inclinaison des panneaux = (30°).
- β : La hauteur du soleil au plus mauvais jour d'irradiation (21 Décembre) (= 25°).

La surface des panneaux photovoltaïques installés dans les deux rangées :

$$S_{active} = L * L' * N$$

- L : La hauteur du champ de module (la longueur d'un panneau).
- L' : La longueur de la surface d'installation.
- N : nombre de range.

Donc Le nombre des panneaux est égal :

$$Np = \frac{S_{active}}{S_{panneau}}$$

Et la puissance crête de l'installation sera :

$$Pc = Np * Pca$$

2. La puissance crête à partir de la consommation journalière :

Dans le cas du photovoltaïque connecté réseau, l'estimation des besoins énergétiques sert à déterminer une puissance à développer, mais la surface disponible et le budget sont deux critères à tenir en compte durant cette étape. Cette étape du calcul comporte peu de calculs, mais demande relativement beaucoup de réflexion car une erreur à ce stade faussera vos résultats jusqu'à la fin. Il s'agit d'estimer la consommation d'équipements supposés connus.

L'objectif est d'obtenir la consommation totale moyenne par jour et par période (été, hivers, vacances...)

L'énergie totale moyenne nécessaire chaque jour E (W h/j) est la somme des consommations énergétiques des divers équipements constituant le système à étudier, à savoir la télévision, les lampes d'éclairage, les appareils électroniques, etc...

Elle est donnée par la loi suivante :

$$\sum Ei = Pi * T$$

Avec :

- E_i : L'énergie consommée par le dispositif en (Wh).
- P_i : La puissance nominale de l'appareil en (W).
- T : Durée d'utilisation en (h/jour).

La puissance crête totale à installer dans ce cas est :

$$P_c = \frac{E_c}{I_{r, moy} * k}$$

Avec :

- P_c : Puissance crête du champ photovoltaïque (W C).
- E_c : L'énergie consommée par jour (W h/j).
- $I_{r, moy}$: L'irradiation journalière horizontale moyenne (kW h/m²j).
- K : Coefficient correcteur ou le rendement du système photovoltaïque $K \in [0.55, 0.75]$
On prend comme valeur moyenne de $K = 0.65$.

3. La puissance crête à partir du budget du client :

A ce stade, la détermination la puissance crête en se base sur le budget du client et non sur le besoin parce que le but du client est d'investir le maximum possible.

II. Dimensionnement d'onduleur :

En phase de conception de l'installation et de choix des composants qui constituent le système photovoltaïque, il est nécessaire de vérifier la compatibilité entre les caractéristiques électriques du générateur photovoltaïque et celles du convertisseur DC/AC, c'est-à-dire de l'onduleur. Les principaux paramètres dont nous devons disposer sont, pour le générateur photovoltaïque, la puissance, la tension et le courant produit par celui-ci dans les différentes conditions de fonctionnement.

Le dimensionnement de l'onduleur photovoltaïque repose sur trois critères :

- ✓ La compatibilité en puissance.
- ✓ La compatibilité en courant.
- ✓ la compatibilité en tension.

1. Compatibilité en puissance :

La puissance de l'onduleur doit être adaptée à la puissance crête des modules P V. Les limites devant être respectées en la matière, dépendent des directives du fabricant de l'onduleur. Si la puissance de l'onduleur est égale à la puissance des modules P V dans les conditions CTS, alors en cas d'ensoleillement plus intense et/ou de température de cellule inférieure, l'onduleur ne pourra pas convertir toute l'énergie (sous-dimensionnement).

Un bon dimensionnement donc entre l'onduleur et le champ photovoltaïque s'avère nécessaire. En règle générale, il faudra plutôt choisir un dimensionnement à 80% de la puissance crête du champ PV lorsque les conditions d'inclinaison et d'orientation sont défavorables (verticale, est ou ouest), les températures moyennes plutôt élevées et les conditions d'irradiation médiocre.

De même, il faudra plutôt choisir un dimensionnement à 100% de la puissance crête du champ PV lorsque les conditions d'inclinaison et d'orientation sont favorables, les températures moyennes plutôt basses et de bonnes conditions d'irradiation. La puissance de l'onduleur doit être adaptée à la puissance crête des modules PV. Les limites devant être respectées en la matière, dépendent des directives du fabricant de l'onduleur. La puissance nominale de l'onduleur donc doit comprise entre :

$$80 \% \times P_{PV \text{ crête}} < P_{1C} < 100 \% \times P_{PV \text{ crête}}$$

2. Compatibilité en courant :

Un onduleur est caractérisé par un courant maximal admissible en entrée. Ce courant d'entrée limite correspond au courant maximal que peut supporter l'onduleur coté DC. Lorsque le courant d'entrée de l'onduleur coté DC est supérieur au courant maximal admissible par l'onduleur, il s'agit d'un cas critique qui peut endommager irréversiblement l'onduleur.

Nombre maximale de chaine en parallèles :

$$N = E\left(\frac{I_{max}}{I_{cc} * 1.25}\right)$$

Avec :

- $E(x)$: est la partie entière inférieure du nombre X.
- I_{max} : est le courant maximal admissible par l'onduleur.
- I_{mpp} : est le courant de puissance maximale des modules.

3. Compatibilité en tension :

Chaque onduleur photovoltaïque contient une plage de tension MPPT et une tension d'entrée maximale, pour la compatibilité de la tension il faut que la tension du champ 50 photovoltaïque appartienne à la plage de tension MPPT de l'onduleur pour assurer le fonctionnement au point maximum de puissance. Pour cela il est nécessaire de déterminer le nombre de modules en série compatible à la plage de tension MPPT de l'onduleur.

La fiche technique de l'onduleur nous renseigne sur les paramètres suivants :

- La tension maximale admissible en entrée de l'onduleur $U_{\max}$.
- La plage de tension MPPT en entrée de l'onduleur est $[U_{\text{mppt}, \min} - U_{\text{mppt}, \max}]$.

Alors le nombre des panneaux P V qu'on peut raccorder en série à l'entrée d'onduleur vaut :

Nombre maximal de modules en série :

$$N_{\max} = E\left(\frac{U_{\text{mpp}, \max}}{U_{\text{mppt}} * K}\right)$$

Nombre minimal de modules en série :

$$N_{\min} = E\left(\frac{U_{\text{mppt}, \min}}{U_{\text{mpp}} * 0.85}\right)$$

Avec :

- E^+ : est la partie entière supérieure du nombre.
- $U_{(\text{mppt}, \min)}$: est la valeur minimale de la tension pour laquelle le tracker (MPPT) fonctionne.
- $U_{(\text{mppt}, \max)}$: est la valeur maximale de la tension pour laquelle le tracker (MPPT) fonctionne.
- U_{mpp} : est la tension de puissance maximale des modules photovoltaïques
- K : est un coefficient de sécurité imposé par le guide de l'UTE C15 – 712 – 1, et qui prend en compte l'élévation de la tension délivrée par les modules lorsque la température des cellules diminue.
- 0.85 est un coefficient de minoration permettant de calculer la tension MP P à 70° C

Et donc le nombre de modules en série doit être entre la valeur du nombre minimal et maximal. [4]

III. Dimensionnement des câbles :

1. Chute de tension :

En théorie, un câble est un conducteur parfait de résistance nulle. En pratique, il n'est pas un parfait conducteur et se modélise par une résistance comme représenté sur la figure à côté.

La résistance R du câble va provoquer une chute de potentiel entre les deux points A et B du câble.

Dans une installation photovoltaïque, l'échauffement induit des pertes de puissance. C'est pourquoi l'optimisation technique et économique d'un central PV conduit à réduire au maximum ces chutes de tension. Une étape préalable de métrage est nécessaire avant d'effectuer le dimensionnement des câbles. [5]

En effet, les pertes dans les câbles à l'origine des chutes de tension augmentent avec la distance de cheminement. C'est pourquoi il est indispensable de réaliser une visite sur site.

La chute de tension est calculée par la relation suivante :

$$\Delta U = \frac{\rho * L * I}{S}$$

ΔU : la chute de tension.

ρ : la résistivité du matériau ($1,6.10^{-8} \Omega m$ pour le cuivre)

L : longueur de câble (allé retour).

S : section du câble

La chute de tension relative % est :

$$\Delta U r = \frac{\Delta U}{U}$$

2. Calcul de section de câble côté DC :

Les câbles DC raccordent les modules entre eux pour former des strings, et branchent plusieurs strings en parallèle. Seuls des câbles dits "solaires" (double isolation, protection UV et ozone, etc.) peuvent être utilisés.

Les câbles principaux de CC doivent être dimensionnés et connectés en respectant certains critères essentiels pour des raisons de sécurité et d'efficacité énergétique :

- Supporter une tension de $1.15 \times$ la tension de circuit ouvert.

- Adapter la capacité du câble au transport du courant DC et AC (section des câbles) et pertes ohmiques dues aux chutes de tension.

Le choix de la section de câble est fonction du courant et de la tension qui circulent dans ces câbles. Étant donné que ces deux grandeurs dépendent de l'ensoleillement et de la température, le dimensionnement est réalisé pour des valeurs de tension et de courant maximales.

Ces valeurs sont données par la fiche technique des modules PV. La norme solaire impose, par ailleurs, des coefficients de sécurité sur ces valeurs :

$$V = 1.15 * V_{co} \text{ et } I = 1.12 * I_{cc}$$

Les sections des conducteurs de chaque string et des conducteurs principaux (après la reprise en parallèle) doivent être telles que le courant nominal les parcourant au point de puissance maximale ne cause pas de chute de tension de plus de 3% de la tension nominale aux extrémités de ces conducteurs.

La section des câbles S , peut se calculer par la formule suivante :

$$S = \frac{2L * \rho * I}{\Delta U * V}$$

Avec:

- ρ : est la résistivité du câble en $8 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. Celle-ci dépend du matériau.
- L : est la longueur du câble en m.
- I : est le courant que traverse le câble en A.
- ΔU : est la chute de tension en V.
- V : est la tension au départ du câble en V Le guide UT E C15–712 relatif aux installations P V indique que la chute de tension de la partie continue ou alternative doit être inférieure à 3% et idéalement 1%.

3. Calcul de section de câble côté AC :

La section des câbles côté alternatif pour les différents chantiers est calculée manuellement en suivant les étapes suivantes :

- Calcul du courant d'emploi I_b : c'est le courant correspondant à la puissance maximale transportée en service :

$$I_b = \frac{Pa}{U * \cos(\varphi)}$$

Dans la section de câbles partie AC vaut :

$$S = (2L * \rho * I * \frac{\cos(\varphi)}{\varepsilon V})$$

IV. Dimensionnement des organes de protection :

1. Partie courant continu :

▪ Protection contre les surintensités :

Les modules supportant un courant inverse maximal I_{sc} au moins deux fois leur courant de court-circuit ($I_{sc} \text{ STC}$), cette protection et les courants admissibles sont donnés dans le Tableau suivant :

Nombre de chaines	Courant inverse susceptible de survenir dans une chaine	Courant assigné I_n du fusible de la chaine	Courant admissible I_z dans le câble de la chaine P V
1 à 2	$1.25 I_{scSTC}$	Sans Objet	$\geq 1.25 I_{scSTC}$
3	$2 \times 1.25 I_{scSTC}$	Sans Objet	$\geq 2 \times 1.25 I_{scSTC}$
≥ 3	$(n-1) \times 1.25 I_{scSTC}$	$1.25 I_{scSTC} \leq I_n \leq 2 I_{scSTC}$	$\geq 2 I_n$
I_{scSTC} correspond au courant d'une chaine n correspond au nombre total de chaines du générateur P V			

Tableau 2: Courants admissibles dans les câbles de chaîne P V et choix des fusibles de protection

▪ Protection contre les surtensions d'origine atmosphérique :

La norme NF EN 61643 – 11 définit deux catégories de parafoudres qui dépendent de la localisation.

- Les parafoudres de type 1 : Ils sont utilisés sur des installations où le risque de foudre est très important, en particulier si le site comporte un paratonnerre.
- Les parafoudres de type 2 : Ils sont destinés à être installés sur des installations où le risque de foudre est faible.

La présence d'un parafoudre sera obligatoire dans le cas où la densité de foudroiement (N_g) est supérieure à 2.5. Le tableau suivant définit les conditions de l'installation des parafoudres coté DC :

Longueur	Locaux d'habitation individuelle	Centrale de production au sol	Bâtiment tertiaires, industriels ou agricoles
$L_{critique}(m)$	$115/N_g$	$200/N_g$	$450/N_g$
$L \geq L_{critique}$	Parafoudre(s) obligatoire coté CC		
$L \leq L_{critique}$	Parafoudre(s) non-obligatoire coté CC		

Tableau 3: Condition d'installation des parafoudres sur la partie CC

▪ **Interrupteur-sectionneur général :**

Le choix d'un interrupteur sectionneur repose sur :

- La tension assignée d'emploi (U_e) doit être supérieure ou égale à la tension maximale $U_{oc\ max}$ du générateur photovoltaïque.
- Le courant assigné I_n doit être au moins égal à $1.25 I_{sc}$ du circuit.

2. Partie courant alternatif :

Choix de disjoncteur différentiel Il est prévu pour supporter le courant d'une phase. Le dimensionnement consiste à choisir le calibre normalisé directement supérieur.

Après l'introduction aux différents éléments d'une installation P V raccordée au réseau. Le chapitre suivant sera le cœur du projet, il comprendra une étude de cas pratique pour appliquer les notions et les démarches déjà mentionnés. [5]

Les conditions climatiques de la ville d'Agadir sont idéales pour la production d'énergie solaire photovoltaïque. Le tableau ci-dessous représente ces données climatiques :

Ville	Agadir
Rayonnement moyen mensuel (KWh/m ²)	190 KWh/mois
Température moyenne (°C)	24 °C
Vitesse du vent (m/s)	13 Km/h
Inclinaison	30° optimale

Tableau 4: Les coordonnées climatiques de la ville d'Agadir.

2. Estimation d'irradiations reçue par le site d'étude :

La connaissance de l'irradiation moyenne journalière ainsi que l'irradiation moyenne annuelle reçue sur le site est une étape primordiale pour le dimensionnement. Ils peuvent être recueillis via le logiciel **PVGIS**.

Ce logiciel de simulation en ligne permet de calculer la production annuelle du système connecté au réseau ainsi de représenter de l'irradiation moyenne d'un tel site donné. L'utilisation de **PVGIS** nous a permis d'avoir les données de l'irradiation mensuelle globale du site

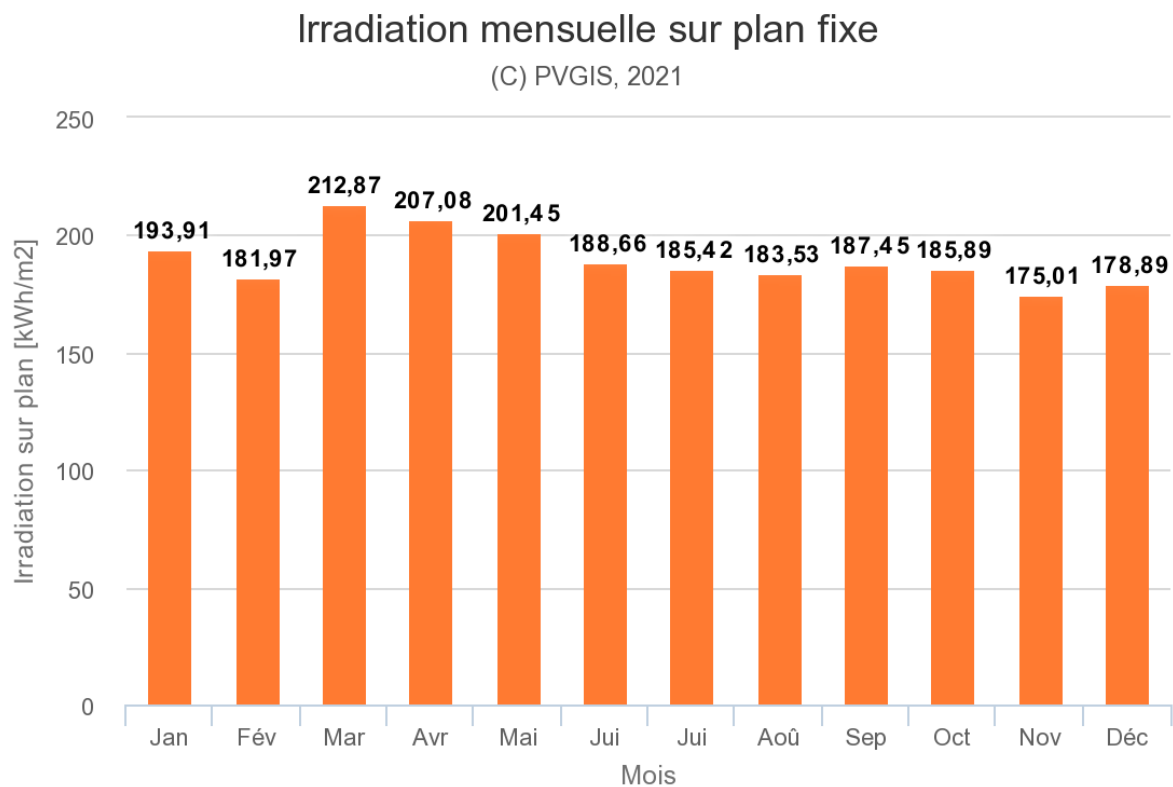


Figure 31: L'irradiation mensuelle globale du site étudié

D'après le graphe ci-dessus, l'irradiation solaire mensuelle moyenne reçue sur le site concerné est estimée par 190 KWh/mois. Cette valeur d'irradiation nous indique sur l'importance du potentiel solaire dans cette zone, d'où les conditions satisfaisantes pour faire le projet.

II. Choix de la technologie des modules photovoltaïques et de l'onduleur :

La technologie des modules photovoltaïques proposée dans cette installation est Jinko-solar monocristallin, leurs référence est JKM465M-7RL3 avec une puissance de 465WC. Ci-dessous les caractéristiques de ces modules :

SPECIFICATIONS

Module Type	JKM450M-7RL3 JKM450M-7RL3-V		JKM455M-7RL3 JKM455M-7RL3-V		JKM460M-7RL3 JKM460M-7RL3-V		JKM465M-7RL3 JKM465M-7RL3-V		JKM470M-7RL3 JKM470M-7RL3-V	
	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT	STC	NOCT
Maximum Power (Pmax)	450Wp	335Wp	455Wp	339Wp	460Wp	342Wp	465Wp	346Wp	470Wp	350Wp
Maximum Power Voltage (Vmp)	42.86V	39.20V	42.97V	39.32V	43.08V	39.43V	43.18V	39.58V	43.28V	39.69V
Maximum Power Current (Imp)	10.50A	8.54A	10.59A	8.61A	10.68A	8.68A	10.77A	8.74A	10.86A	8.81A
Open-circuit Voltage (Voc)	51.50V	48.61V	51.60V	48.70V	51.70V	48.80V	51.92V	49.01V	52.14V	49.21V
Short-circuit Current (Isc)	11.32A	9.14A	11.41A	9.22A	11.50A	9.29A	11.59A	9.36A	11.68A	9.43A
Module Efficiency STC (%)	20.04%		20.26%		20.49%		20.71%		20.93%	
Operating Temperature(°C)	-40°C~+85°C									
Maximum system voltage	1000/1500VDC (IEC)									
Maximum series fuse rating	20A									
Power tolerance	0~+3%									
Temperature coefficients of Pmax	-0.35%/°C									
Temperature coefficients of Voc	-0.28%/°C									
Temperature coefficients of Isc	0.048%/°C									
Nominal operating cell temperature (NOCT)	45±2°C									

Figure 32: fiche technique du panneau photovoltaïque JKM465M-7RL-3V

1. Choix et calcul de nombre des panneaux solaires :

A partir de la puissance crête unitaire des modules PV (465 WC), on détermine le nombre des panneaux P V nécessaire pour cette installation.

$$\text{nombre des panneaux} = \frac{P_c}{P_{pa}} = \frac{120000}{465} = 258 \text{ panneaux}$$

2. Choix d'onduleur :

Dans notre cas on utilise on onduleur de la marque FRONIUS SYMO. SYMO 27-0-3M avec une puissance admissible à l'entrée 37,8 KWC.

Ci-dessous les caractéristiques techniques de cet onduleur :

DONNÉES D'ENTRÉE	FRONIUS ECO 25.0-3-S	FRONIUS ECO 27.0-3-S
Courant d'entrée max. ($I_{dc\ max}$)	44.2 A	47.7 A
Courant de court-circuit max. du champ de modules	71.6 A	
Tension d'entrée min. ($U_{dc\ min}$)	580 V	
Tension de démarrage d'injection ($U_{dc\ start}$)	650 V	
Tension d'entrée nominale ($U_{dc\ r}$)	580 V	
Tension d'entrée max. ($U_{dc\ max}$)	1 000 V	
Plage de tension MPP ($U_{mpp\ min} - U_{mpp\ max}$)	580 - 850 V	
Nombre de trackers MPP	1	
Nombre de connecteurs DC	6	
Puissance max générateur PV ($P_{dc\ max}$)	37.8 kWc	
DONNÉES DE SORTIE	FRONIUS ECO 25.0-3-S	FRONIUS ECO 27.0-3-S
Puissance de sortie nominale AC ($P_{ac\ r}$)	25 000 W	27 000 W
Puissance de sortie max.	25 000 VA	27 000 VA
Courant de sortie AC ($I_{ac\ nom}$)	37.9 A / 36.2 A	40.9 A / 39.1 A
Couplage au réseau (plage de tension)	3-NPE 380 V / 220 V ou 3-NPE 400 V / 230 V (+20 % / - 30 %)	
Fréquence (plage de fréquence)	50 Hz / 60 Hz (45 - 65 Hz)	
Taux de distorsion harmonique	< 2.0 %	
Facteur de puissance ($\cos \varphi_{ac\ r}$)	0 – 1 ind. / cap.	

Figure 33: fiche technique de l'onduleur, FRONIUS ECO 27.0-3-S.

Après le choix et dimensionnement de l'onduleur, une étude de compatibilité (en puissance, en courant et en tension) doit être vérifiée pour savoir la façon de câbler les modules PV entre eux.

On va appliquer les règles de compatibilité qu'on déjà mentionné dans le chapitre précédent. L'installation est composée 258 de panneaux de puissance 465 WC, soit une puissance crête totale de $465 \times 258 = 119.970$ KWC. Les caractéristiques techniques des panneaux photovoltaïques dans notre cas sont :

- $P_c = 465$ WC
- $U_{co} = 51.91$ V
- $U_{MPP} = 43.18$ V
- $I_{cc} = 11.59$ A
- $I_{mpp} = 10.77$ A

La fiche techniques de l'onduleur nous indique les éléments suivants :

Tension d'entrée, $U = 1000$ V

La plage de tension, {580-800}

Déterminons le nombre des modules PV max et min en série compatible avec la plage de tension MPPT de l'onduleur :

$$N_{min} = E \left(\frac{U_{mppt, min}}{U_{mppt} * K} \right) = \frac{580}{43.18 * 0.85} = 16 \text{ panneaux}$$

Avec $K=0.85$

$$N_{max} = E \left(\frac{U_{mppt, max}}{U_{mppt} * 1.15} \right) = \frac{850}{43.18 * 1.15} = 18 \text{ panneaux}$$

D'après le calcul, le nombre des modules en série doit être entre 16 et 18.

Il reste à vérifier qu'avec 18 panneaux en série, on n'atteindra jamais la tension maximale admissible à l'entrée de l'onduleur $U_{max} = 1000V$.

Tension maximale que peut délivrer une chaîne photovoltaïque de 18 panneaux est :

$$U_{max} = 18 * 43.18 * 1.15 = 893.826V < 1000 V$$

Cette tension maximale délivrée par la chaîne PV est bien inférieure à la tension maximale admissible à l'entrée de l'onduleur.

Par conséquent, une configuration à 18 panneaux est compatible avec la tension maximale admissible à l'entrée de l'onduleur.

Dans l'étape suivante on va calculer le nombre des chaînes photovoltaïques à mettre en parallèles.

✓ Compatibilité en courant :

La fiche technique nous indique que la tension maximale de cette onduleur est de $U_{max}=47.7$ A.

Donc :

$$N_{max(parallele)} = \frac{I_{max}}{I_{mpp} * 1.25} = \frac{47.7}{11.59 * 1.25} = 4$$

4 chaînes en parallèle par MPPT.

D'après le calcul, le nombre des chaînes PV, par MPPT. Il reste maintenant à vérifier la compatibilité en puissance.

✓ Compatibilité en puissance :

L'onduleur a une puissance de 37.8 KWC

Nous pouvons mettre au maximum 18 panneaux dans les 4 chaînes avec une puissance unitaire de 465 WC pour chacun.

Cette configuration correspond à une puissance de :

$$18 \times 4 \times 465 = 33 \text{ KWC} < 37.8 \text{ KWC}$$

Cette puissance installée est inférieure à celle admissible par l'onduleur ($P_{\max} = 37.8 \text{ KWC}$), ce qui justifie la compatibilité en puissance.

Donc on a choisi de mettre 4 onduleurs de 27 kWC avec un raccordement de 4 chaînes en parallèle de 17 modules pour chaque chaîne, pour nous donne la puissance de 120 KWC.

Donc :

$$4 \times 17 = 68 \text{ panneaux}$$

68 panneaux de 465 WC nous donne une puissance de :

$$68 \times 465 = 31.62 \text{ KWC}$$

31.62 KWC pour un onduleur. Et alors lorsque on fait 4 onduleurs la puissance maximale totale est de grandeur de :

$$31.62 \times 4 = 126.48 \text{ KWC}$$

C'est que donc compatible avec la puissance maximale (DC) que on veut installer.

Donc on totalité on va installer 272 panneaux a place de 258 pour atteindra la puissance de 120 KWC DC.

III. Dimensionnement des câbles :

1. Câbles DC :

Conformément à la norme C15 – 712, le choix de la section des câbles DC s'effectue selon deux critères majeurs qui sont le courant admissible I_z dans le câble et la chute tension dans le câble.

- Le courant admissible par le câble DC On a vu dans le chapitre précédent que le courant admissible par un câble se varie ça dépend les nombres des chaînes photovoltaïques dans l'installation. Dans le cas au les champs P V en maximum deux chaînes, le courant admissible par le câble DC est $1.25 I_{cc}$ (la norme UT E C15 – 712).

Dans notre cas on a 17 modules formant une seule chaîne en parallèle, alors le courant I_z admissible par le câble DC sera :

$$I_z = 1.25 \times I_{cc} = 1.25 \times 11.59 = 14.48 \text{ A}$$

- La chute de tension admissible par le câble DC On rappelle que la section des câbles se calcule par la relation suivante :

$$S = \frac{2L * I_z * \rho}{\varepsilon v}$$

Dans le cas de cette installation on a :

- $L = 100\text{m}$
- $I = I_z = 14.48 \text{ A}$
- $\varepsilon = 3\%$
- $v = 1.15 \times 17 \times 51.92 = 1015.036 \text{ v}$
- $\rho = 0.028 \Omega.\text{mm}^2 \text{ (aluminum)}$

Alors :

$$S = \frac{(2 * 100 * 0.028 * 14.48)}{0.03 * 1015.036} = 2.66 \text{ mm}^2$$

2.66 Mm² ne correspond pas une telle section existant en cas réel. C'est pour ça on a choisi 4 mm².

2. Câble AC :

On rappelle que la section des câbles AC se calcule par la formule suivante :

$$S = \frac{2L * \rho * I * \cos(\varphi)}{\varepsilon * v}$$

- Le courant maximal que peut débiter l'onduleur est 40.9 A par phase.
- L'onduleur délivre un courant et une tension sinusoïdale parfaitement en phase ($\cos(\varphi) = 1$).
- $\varepsilon = 1\%$.
- La longueur de canalisation entre la sortie de l'onduleur et le point de livraison est 20 m.
- $V = 380 \text{ V}$.
- Les câbles sont en aluminium : $\rho = 0.028 \Omega.\text{mm}^2$.

Donc :

$$S = \frac{2 * 200 * 0.028 * 40.9}{0.01 * 389} = 12.05 \text{ mm}^2$$

12.05 Mm² ne correspond pas une telle section existant en cas réel. C'est pour ça qu'on a choisi 16 mm².

IV. Dimensionnement des éléments de protection :

1. Partie DC :

➤ Les fusibles DC :

Dans une installation photovoltaïque, le nombre des chaînes en parallèles qui exige l'utilisation des fusibles. Selon la norme UTEC15 – 712 – 1, si le générateur PV est constitué d'une chaîne unique, le courant de défaut inverse n'existe pas, et aucun dispositif de protection contre les surintensités n'est exigé. Alors dans notre cas on dispose 4 chaîne des modules PV, donc les fusibles de protection contre les surintensités sont nécessaires (courant inverse non nul).

Donc :

$$I > 1.25 * I_{sc} = 1.25 * 11.59 = 14.48 \text{ A}$$

Alors le courant de fusible DC doit supérieur à 14.48A. On prendre le fusible de 15 A

Donc on totalité on installera 32 fusibles.

➤ Les parafoudres :

La protection des installations photovoltaïques contre les surtensions d'origine atmosphérique est assurée par des parafoudres DC. Pour la protection contre les surtensions d'origines atmosphériques nous avons choisi un parafoudre de tension supérieure à 882.64 V.

Donc on installera un parafoudre de 1000 V.

Le nombre des parafoudres on totale sont 4 parafoudres.

➤ L'interrupteur sectionneur :

Le choix de sectionneur repose sur deux critères :

- $I_n \geq 1.25 I_{cc} = 1.25 * 11.59 * N_p = 57.95 \text{ A}$

Donc on choisit un interrupteur-sectionner de 63A pour chaque onduleur

Alors on a besoin 4 interrupteur-sectionneur.

2. Partie AC :

➤ Choix de disjoncteur :

D'après la norme C le disjoncteur différentiel à mettre en aval de l'onduleur est un disjoncteur de sensibilité 30 mA.

$$U \geq K \times 380V = V.$$

L'onduleur SYMO 27-0-3M délivre un courant de 40.9 A, donc le courant du disjoncteur à utiliser vaut :

$$I_n \geq 1.25 \times 40.9 = 51.1A$$

Donc on prend le disjoncteur de 63 A

Pour le nombre de disjoncteurs nécessaire est 4 disjoncteurs

➤ Parafoudre AC :

Pour la protection contre les surtensions d'origines atmosphériques nous avons choisi un parafoudre de 385 V ($U_{AC} = 380 V < 385V$).

Donc on choisit un parafoudre de 385 V

Pour valider les résultats de dimensionnement photovoltaïque, on a simulé le projet sous le logiciel PV en tant qu'un logiciel de conception et d'évaluation du rendement des installations photovoltaïques. Ce logiciel permet de réaliser une simulation.

3. Les composants de la gestion intelligente d'énergie PV :

Pour aider le consommateur à relever sa consommation énergétique à distance et évitera que des agents doivent le déranger pour la lecture sur place du compteur, on a proposé un Smart Meter de la marque FRONIUS.

Le Fronius Smart Meter est un compteur bidirectionnel permettant d'optimiser l'autoconsommation et d'enregistrer.

Les courbes de charge. Grâce à sa haute précision de mesure et sa communication rapide via l'interface Modbus RTU, le contrôle dynamique de l'injection (lorsque des limites sont imposées) est plus efficace et plus précis qu'avec un compteur S0.

DONNÉES GÉNÉRALES	FRONIUS SMART METER 63A-3	FRONIUS SMART METER 50kA-3 ¹⁾	FRONIUS SMART METER 63A-1
Tension nominale	400 - 415 V	400 - 415 V	230 - 240 V
Courant maximal	3 x 63 A	3 x 50.000 A	1 x 63 A
Capacité du bornier d'entrée	1 - 16 mm ²	0,05 - 4 mm ²	1 - 16 mm ²
Capacités borniers communication et ligne de neutre		0,05 - 4 mm ²	
Consommation d'énergie	1,5 W	2,5 W	1,5 W
Courant de démarrage		40 mA	
Classe de précision		1	
Précision énergie active		Classe B (EN50470)	
Précision énergie réactive		Classe 2 (EN/IEC 62053-23)	
Surintensité de courte durée		30 x I _{max} / 0,5 s	
Montage		Intérieur (rail DIN)	
Boîtier	4 Module DIN 43880	4 Module DIN 43880	2 Module DIN 43880
Indice de protection		IP 51 (cadre de protection), IP 20 (borniers)	
Plage de température ambiante		-25 / +55°C	
Dimensions (hauteur x largeur x profondeur)	89,0 x 71,2 x 65,6 mm	89,0 x 71,2 x 65,6 mm	89,0 x 35,0 x 65,6 mm
Interface onduleur		Modbus RTU (RS485)	
Affichage	8-digit LCD	8-digit LCD	6-digit LCD

Figure 34: la fiche technique de smart meter

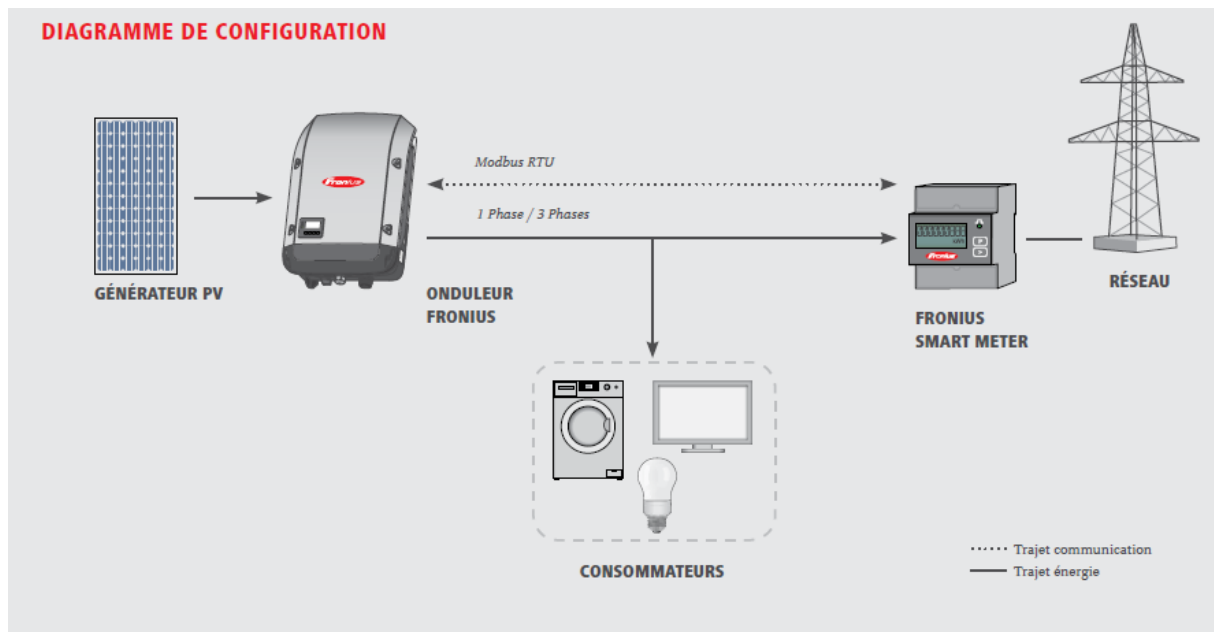


Figure 35: diagramme de configuration

- Les avantages de smart meter FRONIUS :
 - Contrôle dynamique de l'injection efficace et précis
 - Parfaite visibilité des consommations d'énergie sur Fronius Solar.web
 - Management de l'énergie optimisé avec la solution de stockage Fronius
 - Energy Package

V. Simulation PVsyst :

PVsyst est un logiciel conçu pour être utilisé par les architectes, les ingénieurs et les chercheurs, mais aussi un outil pédagogique très utile. Il inclut une aide contextuelle approfondie, qui explique en détail la procédure et les modèles utilisés et offre une approche économique avec guide dans le développement d'un projet. PVSYST permet d'importer des données météo d'une dizaine de sources différentes ainsi que des données personnelles.

1. Conception et dimensionnement de l'installation :

➤ 1^{ère} étape :

On donne d'abord un nom au projet, puis on choisit le pays et la ville. On peut aussi créer sa propre ville

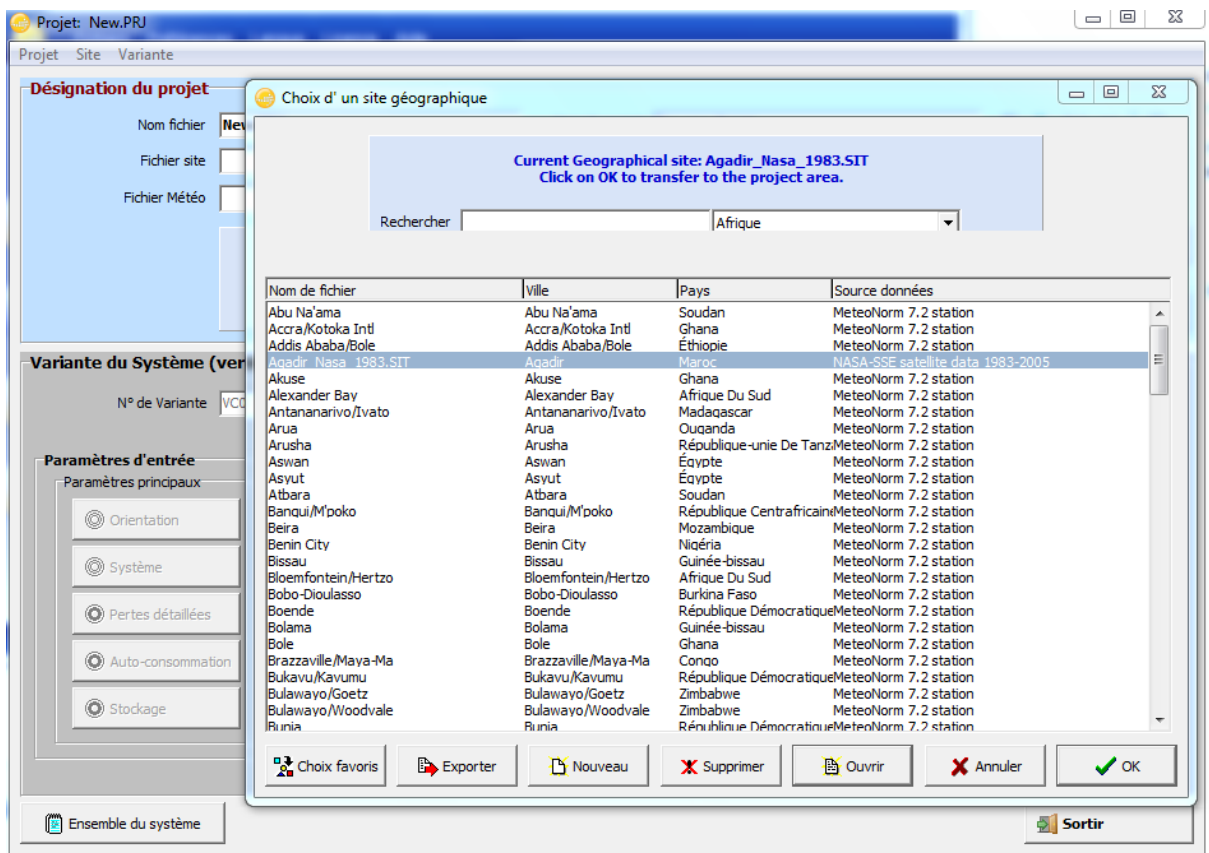


Figure 36: Situation et météo, PVsyst

➤ 2^{ème} étape :

On choisit ensuite dans le cadre "collector plane orientation" la disposition du panneau à savoir son angle et sont azimuth. Dans ce mode le panneau sera forcément fixe. "Show optimisation" permet de trouver la position optimale. On peut choisir l'optimisation en fonction de l'année entière, de l'hiver ou de l'été seul.

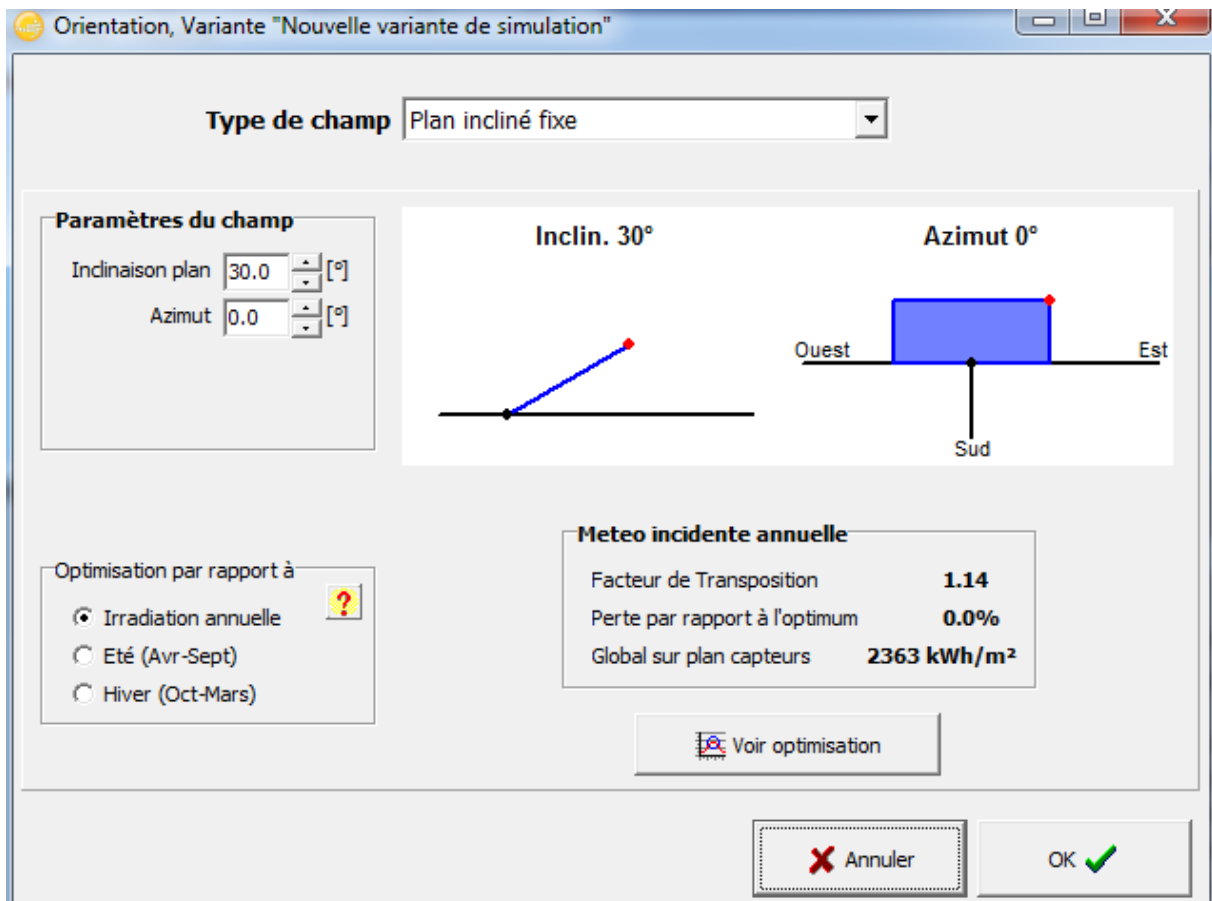


Figure 37: Orientation, PVsyst

➤ 3^{ème} étape :

La troisième partie consiste à choisir les éléments centraux et essentiels de l'installation :

- L'onduleur
- Les modules PV

Pour avoir les nombres des panneaux en séries et en parallèle.

Figure 38 shows the 'Définition d'un système réseau' (Network System Definition) window in a software interface. The window is titled 'Nouvelle variante de simulation' and contains several sections for configuring a solar system.

Configuration globale du système: The 'Nombre de types de sous-champs' (Number of sub-field types) is set to 4. A 'Schéma simplifié' (Simplified scheme) button is available.

Résumé système global: A summary table shows:

- Nombre de modules: 272
- Surface modules: 611 m²
- Nbre d'onduleurs: 4
- Puissance PV nominale: 126 kWp
- Puissance PV maximale: 121 kWdc
- Puissance AC nominale: 108 kWac

Sous-champ #1: The 'Nom et orientation du sous-champ' (Sub-field name and orientation) section shows 'Sous-champ #1' with 'Ordre 1'. The orientation is 'Plan incliné fixe' (Fixed inclined plane) with an 'Inclinaison' (Tilt) of 30° and 'Azimut' of 0°.

Aide au dimensionnement: The 'Entrez Pnom désirée' (Enter desired Pnom) field is set to 31.6 kWc. The 'Redimens.' (Redimension) button is highlighted.

Sélection du module PV: The 'Disponibles' (Available) list shows 'Jinkosolar' modules with '465 Wp 36V Si-mono JKM 465PP-48' since 2016. The 'Modules nécessaires approx.' (Approx. modules needed) is 68. The 'Use Optimizer' checkbox is unchecked.

Sélection de l'onduleur: The 'Disponibles' list shows 'Fronius International' inverters with '27 kW 580 - 850 V TL 50/60 Hz ECO 27.0-3-S' since 2015. The 'Nbre d'onduleurs' (Number of inverters) is set to 1. The 'Output voltage' is 400 V Tri 50Hz. The 'Puissance globale ond.' (Global inverter power) is 27.0 kWac. The 'Onduleur "string" avec 6 entrées' (String inverter with 6 inputs) is selected.

Dimensionnement du champ: The 'Nombre de modules et chaînes' (Number of modules and strings) section shows 'Mod. en série' (Modules in series) set to 17 and 'Nb. chaînes' (Number of strings) set to 4. The 'Perte sur-puissance' (Power loss) is 0.1% and the 'Rapport Pnom' (Pnom ratio) is 1.17. The 'Conditions de fonctionnement' (Operating conditions) table shows:

- Vmpp (60°C): 633 V
- Vmpp (20°C): 751 V
- Voc (-10°C): 981 V
- Irradiance plan: 1000 W/m²
- Imp (STC): 43.0 A
- Isc (STC): 46.4 A
- Isc (aux STC): 46.4 A

 The 'Puiss. max. en fonctionnement à 1000 W/m² et 50°C' (Max. power in operation at 1000 W/m² and 50°C) is 28.5 kW. The 'Puiss. nom. champ (STC)' (Nominal field power (STC)) is 31.6 kWp.

The bottom of the window includes an 'Ensemble du système' (Assemble system) button, an 'Annuler' (Cancel) button, and an 'OK' button.

Figure 38: définition du système réseau

1. Résultats de la simulation :

Après la simulation le logiciel nous donne un rapport qui on peut le résumé dans les tableaux suivants :

Nombre de chaines	16 chaines
Modules par chaine	17 modules
Nombre de modules	272 modules
Nombre de champs	4 champs
Nombre de chaines par champ	4 chaines

Tableau 5: Dimensionnement de panneaux pour les 4 champs.

V _{oc} (champ)	882.6V
V _{mpp} (champ)	735.76V
I _{sc} (champ)	46.4A
I _{mp} (champ)	43.08A
Puissance de générateurs	126 KWC

Rendement annuel spécifique	1970 KWh/KWC
Coefficient de performance	82.56%
Energie du générateur propre	238.6 MWh/an

Tableau 6: paramètres de l'installation PV

Et pour compléter la simulation d'une manière générale, et pour avoir est ce que le terrain de l'installation sera suffisant pour le nombre de panneaux calculés manuelle et par le PVsyst on utilise le logicielle hélioscope pour avoir une simulation et une design 3D pour voir une vision générale sur installation.et aussi pour confirmer les résultats de PVsyt.

Les résultats de design 3D de ce logiciel nous donnent :



Figure 39: design de l'installation

VI. Analyse financière du projet :

L'analyse financière du projet sert à déterminer le temps de retour sur investissement, c'est-à-dire le nombre des années nécessaires pour récupérer le montant d'investissement initial.

1. Temps de retour sur investissement de l'installation photovoltaïque :

Pour déterminer le coût total de l'installation il est nécessaire de connaître le prix des modules PV, d'onduleur ainsi de câbles et de la main d'œuvre. Ou bien connaître le prix total de l'installation.

- Prix des panneaux : 456960 DH HT
- Prix des matériaux : 273290 DH HT

Le cout d'investissement total est 730250 DH

$$TRI = \frac{It}{Gain}$$

Gain=Energie annuel*prix d'un kWh

$$Gain=238.6*10^3*1.0732=256065 \text{ DH/an}$$

Donc le temps de retour sur investissement est :

$$tr = \frac{730250 \text{ DH}}{256065 \frac{\text{DH}}{\text{an}}} = 2 \text{ années et 8 mois}$$

VII. Etude écologique du projet :

La réduction des émissions de CO2 est une mesure de lutte contre le changement climatique qui contribue à limiter l'effet de serre. Lors de la production d'électricité à partir de combustibles fossiles (par exemple du charbon), du CO2 est rejeté. En revanche, les énergies renouvelables (soleil, vent, eau, biomasse, géothermie) ne génèrent aucun CO2.

L'injection du courant dans le réseau public à partir d'une installation photovoltaïque, contribue à la limitation des émissions de CO2. Le facteur CO2 (exprimé en kg/kWh) indique la quantité de CO2 produite par kilowattheure d'électricité. Le facteur CO2 varie selon la technologie utilisée et le rendement des installations.

Au Maroc, le facteur des émissions des Gaz à effet de serre est de 0.72 Kg/KWh.

➤ Calcul de réduction des émissions de CO2.

Quantité de CO2 évitée en kg = Électricité produite en kWh × facteur CO2 en kg/kWh

L'énergie électrique produite par notre projet est presque KWh/an. Donc la quantité des émissions des GES évitée dans le cas notre étude est égale à :

$$238.6 \times 10^3 \text{ KWh/an} \times 0.72 \text{ Kg/KWh} = \mathbf{171792 \text{ Kg/an}}$$

Sachant que la durée de vie d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau est plus de 25 ans. Donc la masse de CO2 évitée sera : **4294800Kg/25ans.**

Conclusion :

Comme déjà annoncé lors de son introduction, cette partie du mémoire touchait la partie technico-économique et écologique de ce projet de fin d'étude. Dans un premier lieu nous avons dimensionné notre installation, puis nous avons évalué sa production annuelle. Ainsi vérifiant ses résultats par le logiciel PVsyst et hélioscope.

Conclusion :

Ce projet de fin d'études ma permet d'améliorer mes connaissances au niveau théorique et d'acquérir une très bonne expérience au niveau de la réalisation pratique.il ma permet aussi de connaitre les problèmes et les difficultés des systèmes photovoltaïques raccordés au réseau de basse tension lors l'étude et la dimensionnent.

Je ne pouvais pas achever mon travail sans intégrer les techniques et les notions que j'ai appris durant ma formation en licence de l'énergie renouvelable et efficacité énergétique, à savoir le management du projet et l'analyse économique et écologique.

Certes plusieurs difficultés se sont présentées surtout au niveau de la compréhension des raisons de la conception des modules de l'installation (l'orientation, l'angle d'inclinaison) et du principe de fonctionnement des MPPT. Mais grâce à dieu et aux conseils et encouragements de mon encadrante, j'ai réussi à gagner ce défi.

Ce stage a été une introduction concrète et formatrice dans le domaine des installations photovoltaïque raccordées au réseau. Cette expérience très complète autour de l'énergie photovoltaïque serait-je l'espère- l'occasion de m'engager plus loin dans cette voie.

Bibliographie :

- Brahim Oumounah. Intégration des énergies renouvelables dans les systèmes électriques nationaux, ONEE COP22. [1]
- Dorothée MICHEAU. Conception et dimensionnement de chantiers photovoltaïques, Rapport de stage de Master 1 Gestion et Transformation de l'Energie Electrique. 2010. [2].
- Mustapha Ayaita. Formation complémentaire sur les systèmes Photovoltaïques raccordés au réseau électrique. 2015. [3]
- Boukhelifa Hamza. Dimensionnement technique d'une installation photovoltaïque De 300kw, Mémoire de Master. 2017. [4]
- Mouhssine rami. Etude et dimensionnent d'une installation photovoltaïque raccordé au réseau, Mémoire licence 2020. [5]
- Naima hanaoui. Conception, Dimensionnement et Mise en marche d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau de basse tension, Mémoire de Master 2019. [6]