



UNIVERSITÉ D'ADRAR AHMED DRAÏA
FACULTÉ DES SCIENCES ET DES TECHNOLOGIE
DÉPARTMENT DES SCIENCES DE LA MATIÈRE

Domaine : LMD Sciences de la Matière
Spécialité : Master Académique
Parcours : Physique énergétique et énergie renouvelable

MÉMOIRE DE MASTER

INTÉGRATION DES STATIONS PHOTOVOLTAÏQUES DANS LES SYSTÈMES ELECTRIQUES

Par

M^{elle} NARDJES YASMINE EL HAMZAOUÏ

Mémoire soutenue le 26 Mai 2017 devant le jury composé de :

Pr.	ALI BENTIALLAH	Univeristé d'Adrar	(Président)
Dr.	MOHAMED GUENFOUD	Univeristé d'Adrar	(Examineur)
Dr.	SAID BENTOUBA	Univeristé d'Adrar	(Encadreur)
Mr.	MOHAMED MEHDI AOUI	Cadre à SONELGAZ	(Encadreur externe)

Année Universitaire : 2016 - 2017

Remerciements

TOUT d'abord je remercie ALLAH le tout puissant de m'avoir permis de faire ce trajet et qui m'a guidé pour arriver la Je tiens à remercier **Mr AOUI** qui m'a fait l'honneur de m'encadrer et qui m'a orienté et guidé

Je remercie également **Mr BENTOUBA** pour m'avoir donné de son précieux temps et pour ses suggestions et ses remarques pertinentes

J'adresse également mes sincères remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'examiner ce modeste travail.

Je tiens à remercier aussi **Mr BOUAZIZ** qui a été disponible quand il le fallait et à tout instant

Je suis très reconnaissante aussi à **Mr GHITAOU** pour sa disponibilité, son aide et ses conseils.

Un dernier mot et non le moindre : je tiens à remercier **Mr Nasreddine KAROUR** mon ami en Or, qui m'a soutenu et beaucoup beaucoup aidé

Dédicaces

JE dédie ce travail aux êtres les plus chers dans ma vie,

« A toi maman sans toi je ne serai jamais arrivé là et pour toi et avec tes prières je sais que je peux aller très loin ; A toi papa, tes prières et ton soutien a fait de moi ce que je suis ; A toi mon petit frère chéri, A vous mes sœurs, mes meilleures, A mon beau-frère, mon grand frère »

Sans vous le chemin aurait été trop long, sombre et difficile, je vous aime très fort <3

Résumé

Les sources d'énergie renouvelable peuvent jouer un rôle principal pour satisfaire une grande partie des besoins énergétiques de l'humanité. L'énergie solaire ne souffre pas de problème de gisement, elle est disponible partout sur notre planète pour cela la production de l'électricité en base des centrales PV à grande échelle est prometteuse. Mais malgré tous les avantages économiques et environnementaux que possède la production photovoltaïque, cette génération pourrait conduire à un impact potentiellement négatif sur le bon fonctionnement d'un système électrique dû, d'un côté, à son inertie nulle ce qui lui rend facilement affectés par les changements climatiques et l'intermittence de la source primaire.

Dans ce travail nous avons fait l'étude de l'impact de l'injection de la production de la centrale solaire d'Adrar SKTM sur le système électrique de deux journées typiques 12 et 13/02/2017. L'injection de la puissance PV au réseau commence dès l'aube et prend une valeur maximale environ 13h qui correspond au pic de la courbe de l'éclairement, après cette heure on remarque une déclinaison jusqu'à atteindre le seuil de déclenchement vers le coucher du soleil. Et cela est le cas pour les deux journées typiques.

Puisque La puissance active augmente proportionnellement avec l'éclairement et décroît aussi avec ce dernier pour s'annuler au coucher du soleil et vu l'intermittence de la source primaire des sources renouvelables, il est toujours nécessaire d'harmoniser la production PV (source renouvelable) avec les sources classiques. C'est la production des turbogénérateurs qui assure la demande. Les turbogénérateurs compensent les perturbations de la production durant la journée. Et prennent en charge la demande dès le seuil de déclenchement de la production PV jusqu'au seuil d'harmonisation (l'aube). Les systèmes de compensation sont utilisés aussi bien pour éviter l'injection des perturbations au réseau que pour protéger les sources sensibles face aux perturbations présentes sur le réseau.

Abstract

Renewable energy resources can have a major role in satisfying a large part of the energy needs of mankind. Solar energy does not suffer from a problem of deposit and is available everywhere on our planet for that the production of the electricity base of large-scale PV power plants is promising. But despite all the economic and environmental benefits of photovoltaic production, this generation can lead to a potentially negative impact on the functioning of an electrical system, on the one hand, due to its zero inertia, which makes it easily affected by Climate changes and the intermittency of the primary source.

In this work we studied the impact of the injection of the production of the solar power plant of Adrar SKTM on the electrical system of two typical days 12 and 02/13/2017. The injection of the PV power to the grid starts at dawn and takes a maximum value of about 13 hours which corresponds to the peak of the illumination curve. After this time, a declination is observed until the trigger threshold is reached at sunset. And this is the case for the two typical days.

Since the active power increases proportionally with the illumination and also decreases with the latter to cancel out at sunset and due to the intermittence of the primary source of renewable sources, it is always necessary to synchronize PV production (renewable source) With conventional sources. It is the production of turbogenerators that ensures demand. Turbogenerators compensate the production disruptions during the day. And take charge of the demand from the triggering threshold of PV production to the synchronization threshold (the dawn). Compensating systems are used both to avoid injecting disturbances into the electrical system and to protect sensitive sources from disturbances on the electrical system.

Table des matières

Remerciements	ii
Dédicaces	iii
Résumé	iv
Abstract	v
Table des matières	vi
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	xi
Notations	xii
Introduction générale	1
I Partie théorique	3
1 Production Photovoltaïque	4
1.1 Introduction	4
1.2 Le soleil	4
1.2.1 Calcul de l'énergie solaire	4
1.3 Notions de base du rayonnement solaire	6
1.3.1 Définition et types	6
1.3.2 Rayonnement solaire quotidien / mensuel / annuel	7
1.4 Gisement solaire	7
1.4.1 Gisement solaire en Algérie	8
1.5 Production de l'énergie électrique	9
1.6 Le photovoltaïque	9
1.6.1 Terminologie et historique	9
1.6.2 L'effet photovoltaïque	10
1.7 Cellule solaire photovoltaïque	11
1.7.1 Principe de fonctionnement	11
1.7.2 Types des cellules PV	12
1.8 Module photovoltaïque	13
1.9 Panneau photovoltaïque	13
1.9.1 Association en série	14

1.9.2	Association en parallèle	14
1.9.3	Association mixte (série parallèle)	14
1.10	Conception d'une installation	15
1.10.1	Types d'installation	15
1.10.2	Les domaines d'application des systèmes PV raccordés au réseau et des systèmes autonomes	16
1.10.3	Taille et emplacement de l'installation	16
1.10.4	Ombrage	17
1.10.4.1	Types d'ombrages	18
1.10.5	Potentiels et production envisageable	18
1.10.5.1	Orientation et inclinaison	18
1.10.5.2	Systèmes de câblage	19
1.10.5.3	Nombres de panneaux	19
1.10.6	Système de conversion	19
1.10.6.1	Le convertisseur	19
1.10.6.2	L'onduleur	19
1.11	Influence de l'éclairement et de la température	20
1.11.1	Influence de l'irradiation	20
1.11.2	Influence de la température	21
1.12	Avantages et inconvénients d'une installation PV	21
1.12.1	Avantages	21
1.12.2	Inconvénients	22
1.13	Conclusion	22
2	Interactions Entre Le Réseau De Distribution Et Les Systèmes PV	23
2.1	Introduction	23
2.2	Réseau électrique	23
2.2.1	Réseau électrique national	24
2.3	Supervision des réseaux	25
2.4	Perturbations des réseaux électriques	26
2.5	Caractéristiques dynamiques des installations PV	26
2.6	Raccordement au réseau	27
2.7	Exigences vis-à-vis des producteurs d'énergie PV	27
2.8	Les études de raccordement menées par les gestionnaires de réseau	28
2.8.1	But des études de raccordement	28
2.8.2	La vérification des seuils électriques	28
2.8.2.1	Contraintes d'intensité	28
2.8.2.2	Contraintes de tension	29
2.8.3	L'importance des hypothèses utilisées dans les études	29
2.8.4	Impacts potentiels des installations PV sur le RPD	29
2.8.4.1	Elévation locale du niveau de tension	29
2.8.4.2	Bosses de tension	30
2.8.4.3	Variations rapides de puissance	30
2.8.4.4	Harmoniques de courant	30
2.8.4.5	Autres impacts possibles	31
2.9	Notion de smart grid	31
2.10	Rendement énergétique	32
2.11	Calcul des puissances et énergies des charges	34

2.12 Conclusion	34
II Partie technique	36
3 Spécificités techniques des installations photovoltaïques. Application SKTM Unité d'Adrar	37
3.1 Introduction	37
3.2 SONELGAZ	37
3.3 SKTM	38
3.4 SKTM unité d'Adrar	39
3.4.1 Composition et raccordement	40
3.4.2 Disposition et Caractéristiques des composants de la centrale	42
3.4.2.1 Structure porteuse / de fixation	42
3.4.2.2 Panneaux solaires photovoltaïques	42
3.4.2.3 Boîte de raccordement	43
3.4.2.4 Poste de conversion (Onduleur + Transformateur)	44
3.4.2.4.1 Onduleur	45
3.4.2.4.2 Transformateur (élévateur)	46
3.4.2.5 Poste d'évacuation MT	47
3.4.2.6 Système de surveillance et de commande	48
3.4.2.7 Stockage	49
3.4.2.8 Maintenance et équipements de nettoyage	50
3.5 Conclusion	51
4 Spécificités techniques des installations photovoltaïques. Application SKTM Unité d'Adrar	52
4.1 Introduction	52
4.2 Etude de l'impact de la production de la centrale solaire d'Adrar sur le système électrique	52
4.2.1 Journée typique (12 Février 2017)	52
4.2.2 Journée perturbée (13 Février 2017)	55
4.3 Conclusion	57
Conclusion générale	58
Bibliographie	59
Annexes	63
Annexe A. Sociétés du Groupe SONELGAZ	63
Annexe B. Méthodes de détection d'ilotage	65
Annexe C. Fiche technique de la centrale solaire d'Adrar (SKTM)	67
Annexe D. Dimensionnement du générateur photovoltaïque	68

Liste des figures

1.1	Variation annuelle de la déclinaison solaire	5
1.2	Angle horaire du soleil	6
1.3	Répartition du rayonnement solaire	6
1.4	Composantes de l'éclairement global d'une surface horizontale	7
1.5	Définition du nombre d'air masse (AM)	8
1.6	Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel	8
1.7	Développement de la filaire PV	10
1.8	Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque	10
1.9	Représentation simplifiée d'une cellule photovoltaïque standard	11
1.10	Cellule solaire typique en silicium	12
1.11	Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque	12
1.12	Câblage des cellules dans un module	13
1.13	Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ photovoltaïque	14
1.14	Association des modules en série	15
1.15	Association des modules en parallèle	16
1.16	Cellule à l'ombre et exemple d'une cellule qui a surchauffé suite au problème de Hot Spot	17
1.17	Installation d'une diode by passe sur le module	17
1.18	Séparation entre les lignes de modules permettant d'éviter l'ombrage mutuel	18
1.19	Différentes configurations d'onduleurs : onduleurs centralisés, de chaîne et de modules	20
1.20	Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V et P-V	21
1.21	Influence simultanée de l'éclairement et de la température sur I-V et P-V	21
2.1	Architecture traditionnelle du système électrique	24
2.2	Exemple de courbes de charge prévue et réalisée, source RTE	25
2.3	Détermination de la chute de tension dans une ligne en présence de PV	30
2.4	Structure traditionnelle du système électrique	31
2.5	Structure traditionnelle du système électrique	32
2.6	Evolution du rendement d'une cellule en fonction de l'éclairement	33
2.7	Evolution du rendement d'une cellule en fonction de de la T° cellule (pour $E = 1000 W/m^2$)	33
2.8	Caractéristique Courant/Tension/Puissance d'un panneau PV	34
3.1	SKTM vue par Google Map	40
3.2	Système électrique, schéma unifilaire général, site d'Adrar (20 MWc)	41
3.3	Schéma de la centrale de production d'électricité PV	41
3.4	Montage des supports	42
3.5	Module photovoltaïque	42

3.6	Boite de jonction	43
3.7	Boite parallèle	44
3.8	Disposition de l'onduleur dans le shelter	45
3.9	Local de l'onduleur (Shelter)	45
3.10	Local du transformateur	46
3.11	Schéma de cellule de la centrale d'Adrar	48
3.12	Interface principale de contrôle	49
3.13	Groupe diesel et batteries utilisés	49
3.14	Equipements de nettoyage	50
3.15	Station de traitement d'eau	50
4.1	Variation de la Production PV en fonction de l'éclairement du 12 février 2017	52
4.2	Variation du Besoin de puissance en fonction du temps du 12 février 2017 .	53
4.3	Production des Turbo Générateurs du 12 février 2017	53
4.4	Puissances du Réseau électrique du 12 février 2017	54
4.5	Variation de la Production PV en fonction de l'éclairement du 13 février 2017	55
4.6	Variation du Besoin de puissance en fonction du temps du 13 février 2017 .	55
4.7	Production des Turbo Générateurs du 13 février 2017	56
4.8	Puissances du Réseau électrique du 13 février 2017	56

Liste des tableaux

1.1	Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques	9
1.2	Moyennes mensuelles de la durée d'insolation et des irradiances globales, tous types de ciel	9
2.1	Domaines de tension	25
2.2	Caractéristiques des différents types de production d'électricité	26
3.1	Chiffres clés 2015	38
3.2	Chiffres clés de la SKTM (31 Décembre 2016)	39
3.3	Caractéristiques électriques des panneaux en silicium poly-cristallin	43
3.4	Caractéristiques électriques de la boîte parallèle	44
3.5	Caractéristiques électriques de la boîte générale	44
3.6	Caractéristiques électriques de l'onduleur	46
3.7	Caractéristiques électriques du transformateur principal	47
3.8	Caractéristiques électriques du groupe de l'alternateur de diesel	50
A.1	Sociétés du Groupe SONELGAZ	63
B.1	Méthodes de détection d'ilotage	65

Notations

AC =	Courant alternatif (Alternating current)
BT =	Basse tension
DC =	Courant continu (Direct current)
GRD =	Gestionnaire du réseau de distribution
RPD =	Réseau Publique de Distribution
RTE =	Réseau de Transport d'Electricité
HTA =	Haute tension A
MPPT =	Maximum power point tracking (recherche du point de puissance maximale)
PCC =	Puissance de court-circuit
PV =	Photovoltaïque
ZND =	Zone de non détection
R, X =	Sont la résistance et la réactance totale de la ligne
PG, QG =	Sont les puissances, active et réactive fournies par PV
PL, QL =	Sont les puissances active et réactive de consommation
QC =	Est la puissance réactive du dispositif de compensation
SS =	Durée d'insolation mesurée
SSo =	Durée d'insolation calculée
Gh =	Irradiation globale reçue sur une surface horizontale
G lat =	Irradiation globale inclinée à la latitude du lieu
G90 S =	Irradiation globale inclinée verticale Sud
G90 E & O =	Irradiation globale inclinée verticale Est et Ouest
G90 S-E & S-O =	Irradiation globale inclinée verticale Sud-Est et Sud-Ouest
Creux de tension =	Diminution brusque de la tension de fourniture U_f à une valeur située entre 90% et 1% de la tension contractuelle U_c , suivie du rétablissement de la tension après un court laps de temps. Un creux de tension peut durer de dix millisecondes à trois minutes. La valeur de la tension de référence est U_c . La mesure de la tension efficace est effectuée indépendamment sur chacune des trois tensions composées. Pour que la détection des creux de tension soit la plus rapide possible, la valeur efficace est, pour ces seules perturbations, mesurée sur $\frac{1}{2}$ période du 50 Hz (10 ms). Il y a creux de tension dès que la valeur efficace d'une tension est inférieure à une valeur appelée « seuil ». Le creux de tension débute dès qu'une tension est inférieure au seuil ; il se termine dès que les trois tensions sont supérieures au seuil. On considère qu'il s'est produit deux creux de tension différents si les deux phénomènes sont séparés par un retour dans la zone de variations contractuelles durant plus de 100 ms (source ERDF).
Ilotage =	On dit qu'il y a ilotage quand une partie de réseau électrique

comprenant des moyens de production et des charges est déconnecté du réseau principal et que les charges de cet îlot sont entièrement alimentées par les générateurs du même îlot et où la tension et la fréquence sont maintenues à des valeurs autour de leurs valeurs nominales. On note que la notion de marche en réseau séparé ou îlotage est associée à une durée. Les règles qui définissent le fonctionnement d'une installation PV considèrent qu'une situation d'îlotage est définie comme telle dès lors que l'onduleur PV détecte un fonctionnement en réseau séparé pendant au moins 5 secondes. Au-delà de cette durée, l'onduleur devra se découpler du réseau principal.

Introduction générale

Les réseaux électriques sont de plus en plus sollicités, sous l'effet conjugué de l'ouverture à la concurrence, de la part de plus en plus importante des énergies renouvelables et de notamment l'augmentation de la consommation totale d'énergie. Ces sources renouvelables dont ses technologies sont appelées « production décentralisée » Elles peuvent avoir les impacts suivants :

- réduction des émissions des gaz à effet de serre,
- augmentation de l'efficacité énergétique globale,
- augmentation de la qualité et de la fiabilité de l'électricité livrée aux consommateurs

Cependant, l'augmentation de la production décentralisée crée de nouveaux défis face à l'exploitation et au contrôle des réseaux basse tension d'aujourd'hui. Jusqu'à maintenant, les problèmes provenant de l'intégration d'installations domestiques, basées sur des énergies renouvelables (car il s'agit de sources d'énergie intermittentes et imprévisibles, puisque dépendantes de contraintes météorologiques qui sont par nature variables), étaient surmontés en renforçant les réseaux de distribution. Cela implique des surdimensionnements et donc des investissements; ce qui n'est pas la manière optimale d'intégrer la production décentralisée à grande échelle.

L'utilisation du photovoltaïque au début était pour alimenter en électricité des zones rurales et isolées, cependant, dans ces dernières années, l'électricité photovoltaïque a pris sérieusement sa place à travers des stations de production géantes et actuellement, la course mondiale vise les systèmes connectés au réseau.

Raccordé le photovoltaïque au réseau, cette solution est aujourd'hui plus rentable qu'une utilisation directe de l'électricité. Ceci est valable dans la mesure où le prix de vente du kWh est supérieur au prix d'achat.

Pour effectuer un raccordement au réseau de distribution d'électricité, il est nécessaire d'adapter la tension continue à la sortie des panneaux photovoltaïques à la tension alternative du réseau de distribution. Il faut donc utiliser un onduleur.

Les systèmes PV, connectés au réseau sont utilisés le plus souvent pour vendre la totalité de l'énergie produite. Dans le cas d'une installation PV domestique, l'électricité, issue du générateur PV peut être autoconsommée et le surplus est vendu à l'opérateur du réseau. Dans ce cas, le réseau est utilisé pour l'alimentation en manque d'énergie PV.

Pour assurer un meilleur ajustement de la production et de la consommation d'électricité, des capteurs et systèmes de collecte des données (sur la production et la consommation) sont mis en œuvre à tous les niveaux du réseau, un réseau de communication

et des systèmes locaux d'analyse capables de s'appuyer sur des données prospectées à court, moyen et long terme, et cela avec les avantages suivants :

- Optimiser le rendement et les taux d'utilisation de l'ensemble des générateurs,
- Réduire les pertes dans les lignes,
- Favoriser l'insertion de la production décentralisée, en particulier d'origine renouvelable,
- Distribuer l'électricité au meilleurs prix par le moyen d'une meilleure interaction entre les producteurs et consommateurs ;

Notre travail se scinde en deux parties :

1. Une première partie théorique qui comporte deux chapitres

Le premier chapitre intitulé production photovoltaïque, nous permettra de se familiariser avec les notions de base sur l'énergie solaire photovoltaïque, Cette technologie, qui a fait l'objet d'un immense développement ces dernières années, représentera une part importante de notre future énergie mixte. Ce chapitre présente les notions de base de l'énergie, rayonnement et du gisement solaires. La partie suivante expose brièvement l'effet photovoltaïque et les différentes technologies photovoltaïques disponibles sur le marché. Et se conclura enfin avec les principaux paramètres nécessaires à la conception d'une installation photovoltaïque.

Le deuxième chapitre intitulé Interactions Entre Le Réseau De Distribution Et Les Systèmes PV qui traite les types de réseaux électriques existants et les Perturbations, Supervision des réseaux, Les études et le but de raccordement, les contraintes existantes (d'intensité, de tension), les Impacts potentiels des installations PV sur le RPD (Réseau Public De Distribution) et enfin leur Rendement énergétique.

2. Une deuxième partie technique qui se divise en deux chapitres aussi

Un chapitre portant le N° 03 intitulé Spécificités techniques des installations photovoltaïques Application SKTM Unité d'Adrar. Il commence par une introduction de la SONELGAZ qui représente le gérant du réseau électrique, puis la SKTM (Unité d'Adrar) qui représente la centrale PV (installation décentralisée), sa composition et raccordement, Disposition et Caractéristiques de ses composants.

Et un dernier chapitre nommé Etude de l'impact de la centrale PV d'Adrar 20 MW sur le système électrique local ou nous allons étudier la production photovoltaïque de la centrale SKTM (2 jours types) et analyser le rapport Production/Consommation en se basant sur les données de la centrale étudiée en ces 2 jours (données SONELGAZ) puis évaluer et discuter les résultats de notre étude.

Première partie
Partie théorique

Production Photovoltaïque

1

1.1 Introduction

La demande mondiale en énergie ne cesse de s'accroître ce qui a conduit à l'épuisement des sources d'énergies existantes, par conséquent, les regards sont dirigés vers une nouvelle destination qui est l'exploitation des énergies renouvelables (développement des alternatives renouvelables).

La révolution industrielle, apparue en Angleterre, est qui s'est propagée très vite en Europe puis au reste du monde, a été le point de départ d'une course acharnée vers les sources naturelles d'énergie. On distingue principalement trois types de sources d'énergies qui sont :

- l'énergie fossile se trouvant en dessous de la surface terrestre, c'est une énergie polluante et en voie de disparition qui est principalement le pétrole et le gaz naturel;
- l'énergie fissile, c'est une énergie très dangereuse, d'origine nucléaire qui recommande un contrôle délicat;
- les énergies renouvelables, ce sont les énergies de sources permanentes et inépuisables, parmi ces énergies on trouve : le solaire, l'éolien et l'hydraulique...

Dans ce travail on s'intéresse à l'énergie solaire, plus précisément le photovoltaïque et cela comme préambule à notre étude qui est sur l'injection de cette énergie dans le réseau.

1.2 Le soleil

Le soleil est une étoile composée essentiellement de 80% d'hydrogène, 19% d'hélium et une minorité de 1% de carbone, d'azote et d'autres éléments [4]. Le soleil est une source naturelle, gratuite, non polluante et quasiment inépuisable d'énergie. L'énergie solaire pour son utilisation exige un système de captation solaire de deux types :

- Capteur solaire photothermique
- Capteur solaire photovoltaïque

1.2.1 Calcul de l'énergie solaire

a) L'altitude

L'altitude est l'élévation d'un lieu par rapport au niveau de la mer, mesurée en mètre (*m*).

b) **La latitude (ψ)**

C'est l'angle formé par le plan équatorial et la direction reliant le lieu considéré, au centre de la terre. Les latitudes de l'hémisphère Nord sont affectées d'un signe positif et celles de l'hémisphère Sud d'un signe négatif [8].

c) **La longitude (l)**

Représente l'angle formé par le plan méridien de lieu considéré et le plan méridien origine nommé la ligne de Greenwich. Les longitudes situées à l'est du Greenwich sont positives et celles situées à l'Ouest négatives [8].

d) **La déclinaison (δ)**

C'est l'angle entre la direction du soleil et le plan équatorial. La déclinaison varie entre $-23,45^\circ$ (le 21 décembre) et $+23,45^\circ$ (le 21 juin) [29].

$$\delta = 23,45 \cdot \left(\sin\left(2\pi \frac{284 + n}{365}\right) \right) \quad (1.1)$$

Où : n est le numéro de jour dans l'année.

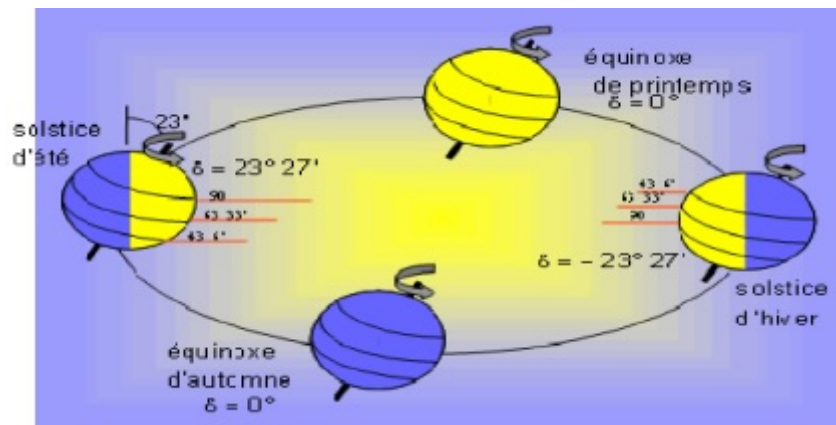


FIGURE 1.1 – Variation annuelle de la déclinaison solaire

e) **La durée d'insolation**

La durée d'insolation (durée d'ensoleillement) pendant la journée S_0 commence avec le lever du soleil jusqu'au coucher, mais la durée effective d'insolation d'une journée ordinaire est inférieure à cette durée maximale [21]. Le taux d'insolation est donné par l'expression :

$$\delta = \frac{S}{S_0} \quad (1.2)$$

La durée maximale S_0 est calculée par l'expression suivante :

$$S_0 = \left(\frac{2}{15}\right) \cos^{(-1)}(-\tan\psi \cdot \tan\delta) \quad (1.3)$$

f) **Le temps solaire vrai (TSV)**

L'angle horaire ρ entre le plan méridien passant par le centre du Soleil et le méridien du lieu considéré. Il est compté de 0 à 24h à partir du midi vrai lorsque le Soleil culmine en un lieu donné [11].

$$TSV = 12 + \frac{\rho}{15} s \quad (1.4)$$

g) **L'angle horaire (ω)**

C'est l'arc de la trajectoire solaire compris entre le soleil et le plan méridien locale, elle fait 15° chaque heure ce qui donne 360° pendant 24h. On écrit :

$$\omega = \frac{360}{24}(TSV - 12) \quad (1.5)$$

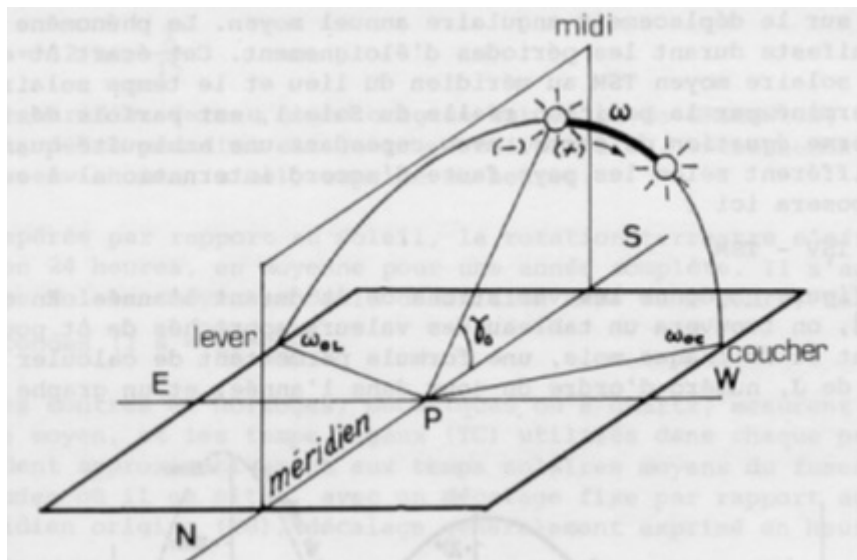


FIGURE 1.2 – Angle horaire du soleil [35]

1.3 Notions de base du rayonnement solaire

1.3.1 Définition et types

Le rayonnement solaire est un rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet ($0,2\mu m$) à l'infrarouge lointain ($2,5\mu m$) [21].

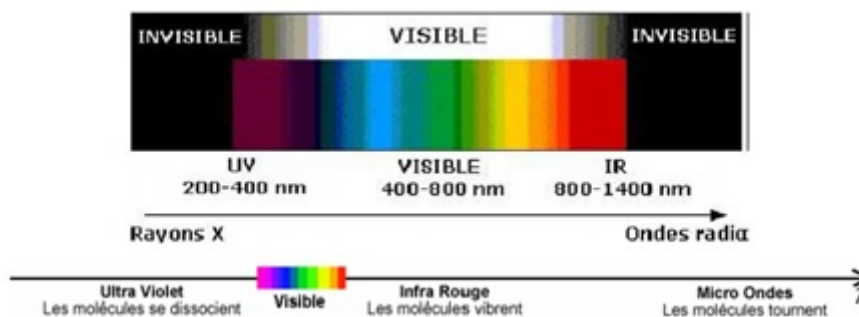


FIGURE 1.3 – Répartition du rayonnement solaire

Après atmosphère, il se caractérise par 3 types :

- Rayonnement direct : est un rayonnement reçu directement du soleil, ses rayons sont parallèles entre eux.

- Rayonnement diffusés : est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère, ou certains obstacles comme l'air, les nuages minimisant son intensité.
- Rayonnement albédo (réfléchi) : c'est la partie du rayonnement solaire réfléchi par le sol, il dépend de l'environnement de l'installation. Et d'où le rayonnement global est la somme des 3 types.

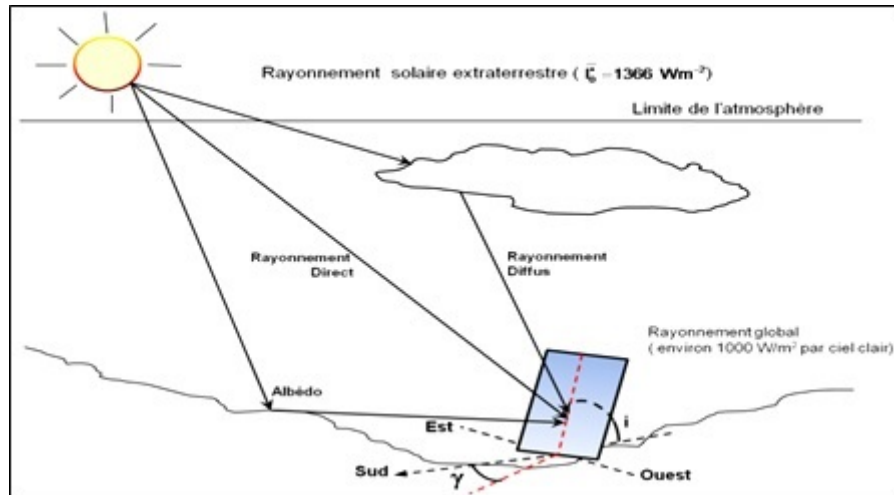


FIGURE 1.4 – Composantes de l'éclairement global d'une surface horizontale[27]

1.3.2 Rayonnement solaire quotidien / mensuel / annuel

La position du soleil par rapport à une position est donnée par l'angle zénith (γ_s) qui est l'angle entre la verticale locale et la ligne qui relie l'observateur au soleil et l'azimut (α_s) du soleil qui est la déviation de la position du soleil par rapport au sud. L'azimut du module PV par rapport au Sud est noté (α), et l'inclinaison est notée (β) [Chapitre].

1.4 Gisement solaire

Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible au cours d'une période donnée. Il est utilisé pour simuler le fonctionnement d'un système énergétique solaire et faire un dimensionnement le plus exact possible compte tenu de la demande à satisfaire [7]. Contrairement aux autres énergies renouvelables, l'énergie solaire ne souffre pas de problème de gisement et est disponible partout sur notre planète. Sous forme de rayonnement électromagnétique, une partie de cette énergie atteint la surface de la terre. Hors atmosphère, l'énergie moyenne reçue par la Terre est d'environ $5,5 \text{ kWh/m}^2$ par jour. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une atténuation et une modification de son spectre. Ainsi la couche d'ozone absorbe la majeure partie du rayonnement ultra-violet, tandis que la vapeur d'eau absorbe le rayonnement infrarouge. Le rayonnement solaire au sol dépend donc de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons lumineux et n'est donc pas homogène sur toute la surface de la Terre [19]. Pour tenir compte de ces différences, on introduit un coefficient x appelé masse atmosphérique ou nombre d'air masse (AMx) dont l'expression est :

$$\frac{1}{\sin\theta} \quad (1.6)$$

θ : représente l'élévation du soleil sur l'horizon (90° au zénith)

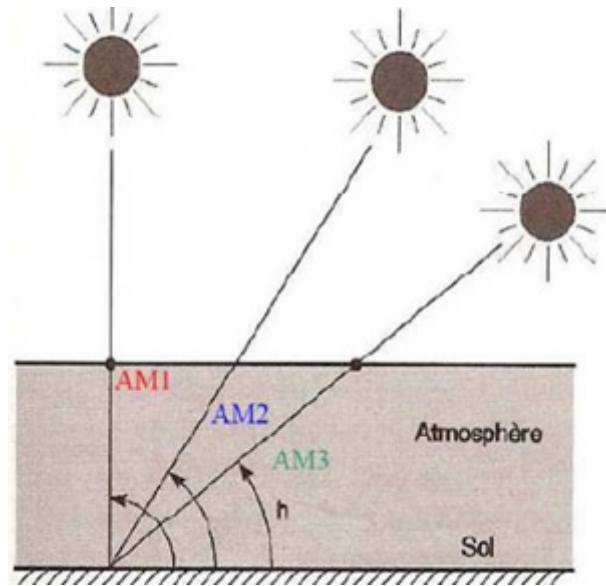


FIGURE 1.5 – Définition du nombre d'air masse (AM)

$$AM_1 = 1$$

$$AM_2 = 1,5$$

$$AM_3 = 2.$$

1.4.1 Gisement solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un gisement solaire énorme comme le montre la figure 1.6 [7] :

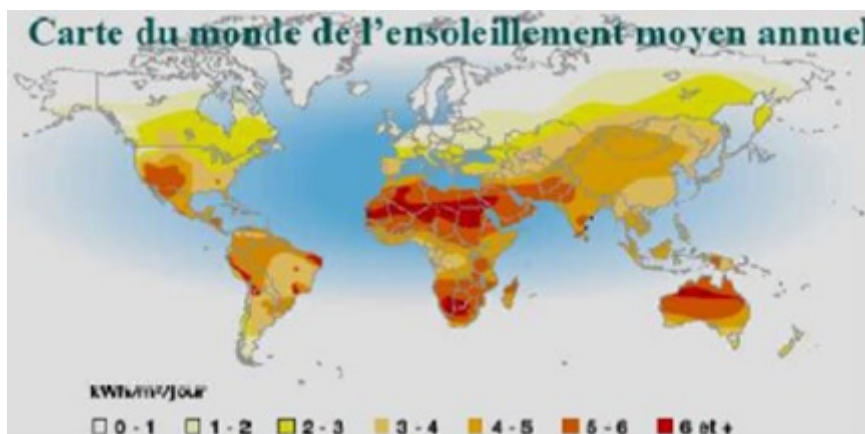


FIGURE 1.6 – Carte du monde de l'ensoleillement moyen annuel [7]

L'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen, soit $169,000 \text{ TWh/an}$ pour le solaire thermique, $13,9 \text{ TWh/an}$ pour le solaire photovoltaïque. Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'Mel. La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est représentée dans le tableau 1.1 selon l'ensoleillement reçu annuellement [7] :

TABLE 1.1 – Ensoleillement reçu en Algérie par régions climatiques

Région	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (h/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue ($kWh/m^2/an$)	1700	1900	2650

La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de toute l'Algérie. Pour le site d'Adrar, les spécifications sont données par les grandeurs météorologiques suivantes [25].

- La latitude ($^{\circ}$) : 27,82 N
- La longitude ($^{\circ}$) : 0,18 O
- L'altitude (m) : 279 m

La durée d'insolation dans le Sahara algérien est toujours supérieure à 8h/j et peut arriver jusqu'à 12h/j pendant l'été à l'exception de l'extrême sud où elle baisse jusqu'à 6h/j en période estivale [7].

TABLE 1.2 – Moyennes mensuelles de la durée d'insolation et des irradiances globales, tous types de ciel [12]

Site	Latitude	Longitude	Altitude	SSo	Gh	G lat	G ₉₀ S	G ₉₀ E&O	G ₉₀ S-E & S-O
Adrar	27,80	-0,18	279	11,83	6774	7862	5203	4267	5096

1.5 Production de l'énergie électrique

La production consiste à utiliser des énergies diverses de manière à entraîner des alternateurs qui souvent, produisent des tensions et des courants électriques triphasés. On distingue ainsi des centrales de production : thermiques, nucléaires, hydrauliques, éoliennes, solaires, géothermiques, etc. Les avantages et inconvénients de chaque type proviennent principalement de la facilité d'exploitation et d'entretien des ressources et surtout du rendement de la transformation d'énergie.

1.6 Le photovoltaïque

1.6.1 Terminologie et historique

Le terme « photovoltaïque » vient du grec « $\phi\omega\zeta$, phos, photo » qui désigne la lumière et de « voltaïque », mot dérivé du nom du physicien italien Alessandro VOLTA, connu pour ses travaux sur l'électricité. C'est en 1839 que le physicien français Edmond Becquerel découvre que certains matériaux délivraient une petite quantité d'électricité

quand ils étaient exposés à la lumière [2], mais ce n'est qu'en 1954 que la première cellule photovoltaïque a été mise au point par des chercheurs du laboratoire Bell aux USA. Cette première cellule photovoltaïque était en silicium [2]. A partir de l'année 2000, suite à l'évolution technologique et les progrès dans le domaine de la recherche sur les semi-conducteur et l'électronique de puissance, l'énergie solaire photovoltaïque est devenue l'une des prometteuses ressources pour la production massive d'électricité ainsi que l'éolien qui était avant considérée comme la seule ressource renouvelable prometteuse pour la production d'électricité en vrac.

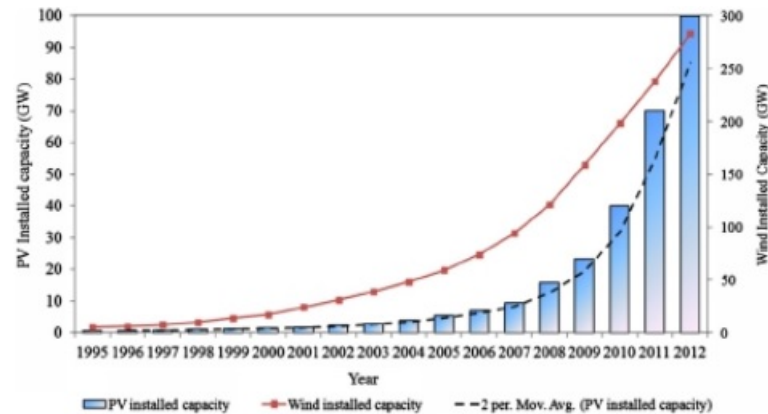


FIGURE 1.7 – Développement de la filaire PV

1.6.2 L'effet photovoltaïque

Les cellules solaires photovoltaïques (pouvant être représentées comme une jonction p-n), sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque. Lors de l'absorption de la lumière, la génération des paires électron-trou ainsi que la séparation de ces porteurs de charges constituent un processus important pour la conversion de la lumière en énergie électrique (cellules solaires) [14].

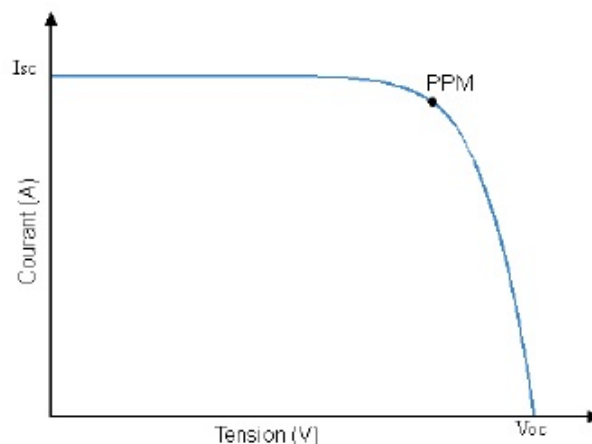


FIGURE 1.8 – Caractéristiques courant-tension de la cellule photovoltaïque [10]

A partir de la caractéristique $I(V)$ sous éclairage de la cellule photovoltaïque, on déduit les paramètres électriques propres à la cellule et notamment :

- I_{sc} : Courant de court-circuit (obtenu pour $V = 0$)
- V_{oc} : Tension en circuit ouvert (obtenu pour $I = 0$)
- Le point de fonctionnement optimal PPM (la puissance maximale de la cellule).

1.7 Cellule solaire photovoltaïque

La composante de base de chaque installation photovoltaïque est la cellule solaire qui est constitué dans la plupart des cas de silicium, un semi-conducteur qui est également utilisé pour les diodes, transistors et puces d'ordinateur. Un S-C suivant son type, peut avoir une très bonne interaction avec un photon de quantité d'énergie $h\nu$, à la seule condition que cette quantité d'énergie soit supérieur ou égale à l'énergie de gap. La cellule photovoltaïque est constituée de plusieurs couches, l'élément de base de ses structures est la jonction p-n qui joue le rôle principal dans le dispositif solaire. Elle est le siège de la génération des porteurs et de leurs séparations.

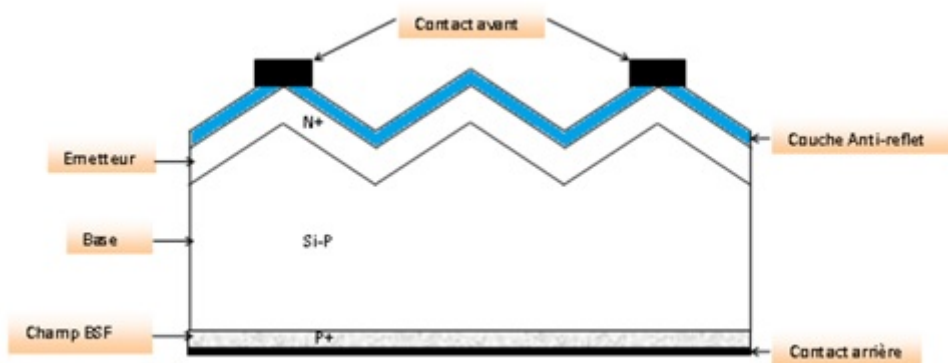


FIGURE 1.9 – Représentation simplifiée d'une cellule photovoltaïque standard [14]

1.7.1 Principe de fonctionnement

Fondamentalement, comme la photodiode, elle se compose d'une jonction p-n. Ceci est asymétriquement dopé, au fond est la base p et en haut l'émetteur n + fortement dopé. Les termes base et émetteur proviennent des temps de départ des transistors bipolaires et ont été repris pour les cellules solaires. Si la lumière pénètre la cellule, alors chaque photon absorbé, dont l'énergie est supérieure ou égale à son énergie de gap, génère une paire électron-trou. Les particules sont séparées du champ de la zone de charge d'espace et déplacées vers les contacts : les trous traversant la base vers le contact arrière inférieur, les électrons traversant l'émetteur vers les contacts avant. Ce sont de petites bandes métalliques qui transportent les électrons générés vers le collecteur de courant Rail (jeu de barres). Si une charge est reliée aux deux pôles de la cellule solaire, cela peut générer une énergie électrique [24]. En résumé, la conversion de l'énergie lumineuse provenant du Soleil en énergie électrique se fait en trois étapes [34] :

- Absorption des photons de la lumière solaire.

- Conversion de l'énergie reçue par les photons en énergie électrique (particules électriques libres).
- Collecte les particules dans un circuit électrique externe.

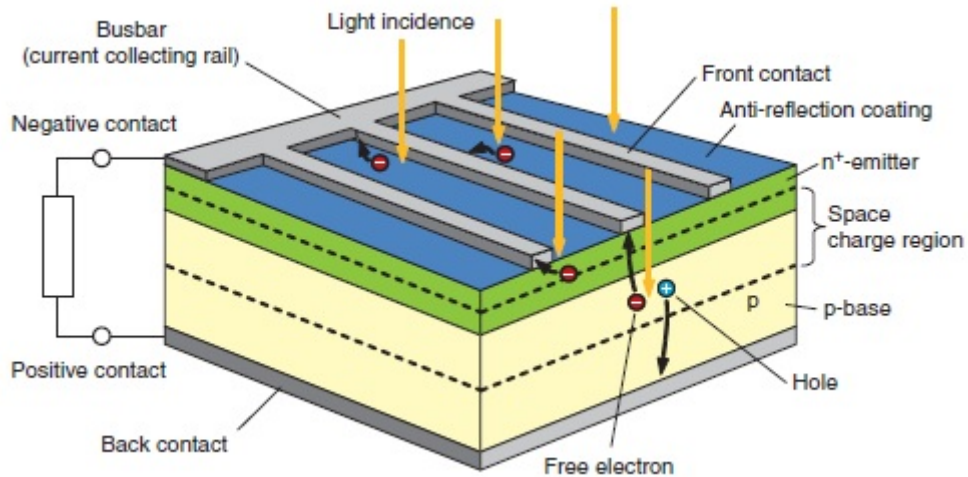


FIGURE 1.10 – Cellule solaire typique en silicium

1.7.2 Types des cellules PV

Il existe plusieurs types de cellules qui se différencient par les matériaux utilisés pour les construire.

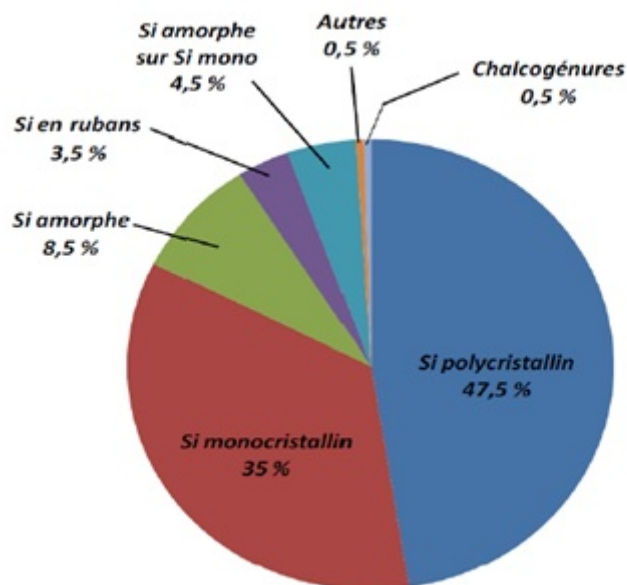


FIGURE 1.11 – Répartition des matériaux sur le marché mondial du photovoltaïque [30]

La filière de silicium représente actuellement plus de 95% du marché des modules PV. Comme le silicium est l'un des éléments les plus abondants sur terre et possède plusieurs avantages comme la stabilité et le non toxicité, il existe plusieurs technologies pour cette filière dont la première génération regroupe

- le monocristallin (rendement de 13 à 15%) [40],
- le polycristallin (rendement de 12 à 14%), le silicium en rubans (rendement de 15%) [42]
- Le silicium amorphe (rendement de 5 à 7%) qui se différencie par leur rendements, fabrication et coût.

Les cellules en couches minces sont considérées comme la deuxième génération appelée aussi les chalcogénures parmi ces cellules il y a

- les matériaux à base de tellure de cadmium (rendement de 11%)
- et les matériaux à base de sélénure de cuivre indium (rendement de 12,8%) ce sont des matériaux caractérisés par un grand coefficient d'absorption (100 à 1000 fois plus fort que celui du silicium cristallin).

Les cellules III-V multi-jonctions sont dites la troisième génération. Il s'agit d'un empilement de divers composés III-V afin de capter une grande partie du spectre solaire. Pour les cellules utilisant d'autres matériaux que le silicium on trouve les cellules de Gratzel (10,4% meilleur rendement certifié) qui sont composées d'un électrolyte, d'un colorant et d'un oxyde semiconducteur inorganique [30] et les cellules organiques (rendement de 7,9%) qui sont des cellules photovoltaïques dont au moins la couche active est constituée de molécules organiques [38].

1.8 Module photovoltaïque

L'ensemble des cellules (entre 36 et 72) connectées en séries et en parallèle constitue un module photovoltaïque. La tension produite par une cellule photovoltaïque est d'environ 0,6 V, pour obtenir une tension désirée plus élevée on connecte un certain nombre des cellules en série.

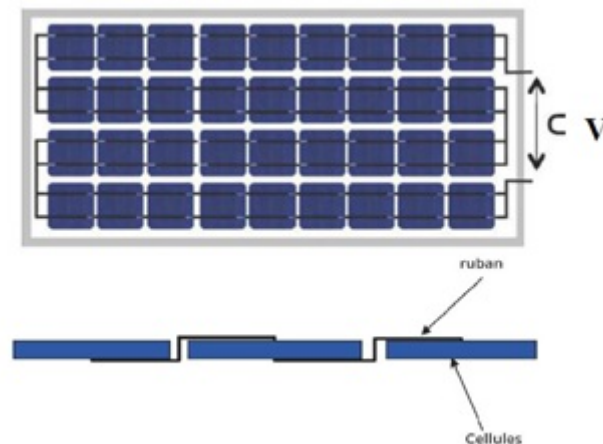


FIGURE 1.12 – Câblage des cellules dans un module

1.9 Panneau photovoltaïque

Pour constituer un panneau photovoltaïque (champ solaire) il faut câbler plusieurs modules photovoltaïques en série et/ou bien en parallèle, montés sur une armature métallique avec un angle d'inclinaison spécifique, afin de produire la puissance requise.

Un module photovoltaïque se caractérise par sa puissance crête qui est la puissance

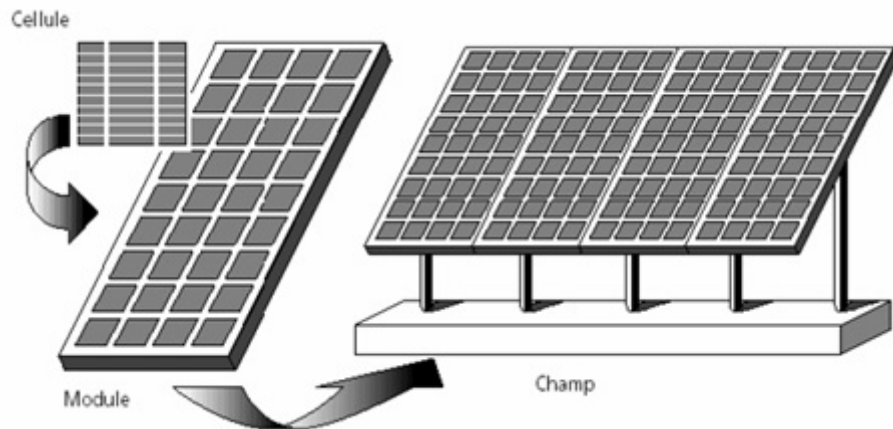


FIGURE 1.13 – Présentation d'une cellule, d'un panneau et d'un champ photovoltaïque [31]

maximale dans les conditions standards (1000 W/m^2 , $T = 25^\circ\text{C}$, avec un spectre solaire AM1.5). Si un module est exposé au soleil dans ces conditions standards, il va donner une puissance maximale dans un instant donné, cela dure N heures.

$$Eh_{\text{électrique}}^{\text{panneau}} = P_c \cdot N \quad (1.7)$$

P_c : Puissance crête.

N : Nombre d'heures équivalent aux conditions standards.

1.9.1 Association en série

L'association en série favorise la tension, la tension globale est la somme des tensions à travers toutes les cellules et l'intensité du courant est la même dans chacun des éléments du circuit. Par conséquent, l'intensité I du courant qui traverse chaque cellule PV est constante.

1.9.2 Association en parallèle

L'association en parallèle favorise le courant. L'intensité du courant débité par le panneau PV est égale à la somme des courants mesurés dans chaque module et la tension est la même dans chacun des éléments du circuit.

1.9.3 Association mixte (série parallèle)

Un montage est dit mixte s'il comporte un ensemble de panneaux montés en série et en parallèle. Afin d'obtenir des puissances de quelques kW , sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle un générateur photovoltaïque.

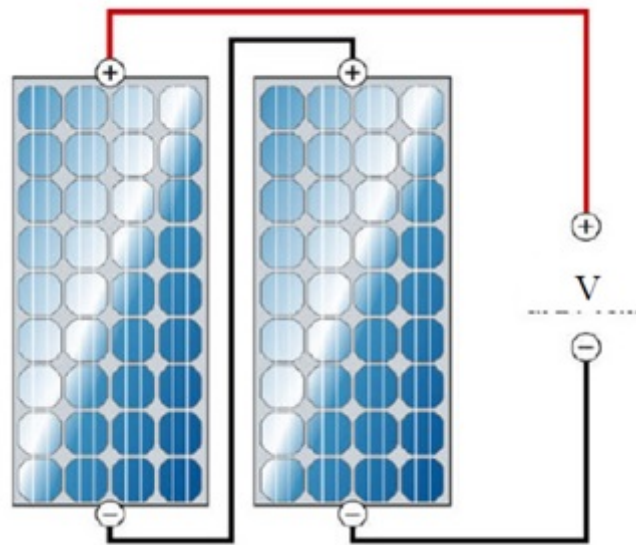


FIGURE 1.14 – Association des modules en série [3]

1.10 Conception d'une installation

La conception d'une installation PV est un processus complexe pour lequel l'optimisation joue un rôle majeur. Pour la réussite du système photovoltaïque il est très important d'évaluer les données géographiques et météorologiques ainsi que le besoin de l'utilisateur et cela doit se faire à pas moins d'une année de préférence. Il est important de déterminer si ce besoin est constant tout au long de l'année ou bien s'il y a des pics saisonniers (comme l'utilisation d'une climatisation en plus en été par exemple). Car la production d'un panneau photovoltaïque en hiver est largement inférieure à sa production en été [26].

1.10.1 Types d'installation

On distingue deux types d'installations :

- 1) Systèmes reliés au réseau : dans ces systèmes, la puissance produite par les générateurs photovoltaïques est convertit en alternative via un onduleur (convertisseur DC/AC). Le surplus d'énergie du générateur photovoltaïque est injecté au réseau public à travers un contrat entre le producteur et la compagnie gérante du réseau électrique.
- 2) Systèmes autonomes : ce sont des installations isolées qui ne sont pas connectées au réseau. L'autonomie du système est assurée par un système de stockage d'énergie. Ces installations comprennent quatre éléments généralement :
 - Un ou plusieurs modules PV.
 - Le système de régulation.
 - Une ou plusieurs batteries
 - L'onduleur.

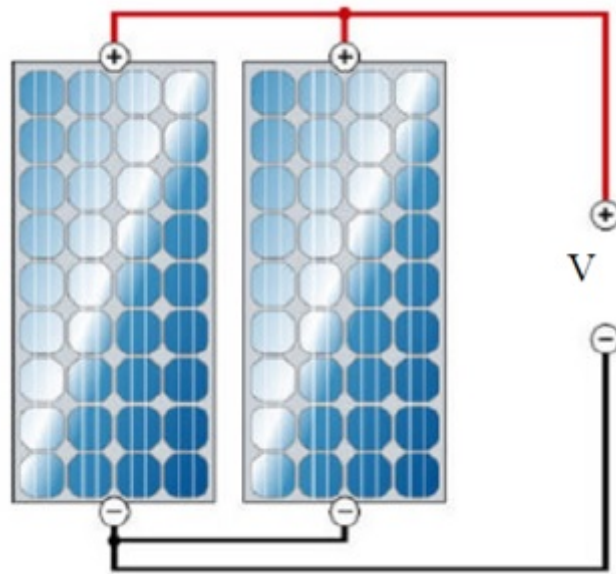


FIGURE 1.15 – Association des modules en parallèle [3]

1.10.2 Les domaines d'application des systèmes PV raccordés au réseau et des systèmes autonomes

Les domaines d'application des systèmes raccordés au réseau sont les suivants :

1. Production énergétique à grande échelle ;
2. Alimentation énergétique industrielle ou domestique.

Les domaines d'application des systèmes PV autonomes sont les suivants :

- a. Pompage de l'eau pour l'irrigation ou la consommation humaine ;
- b. Systèmes solaires domestiques : Foyer en zones rurales ou pays en développement ;
- c. Antennes de communication et stations téléphoniques ;
- d. Cliniques et hôpitaux ;
- e. Commerce rural ;
- f. Tourisme : Petits bateaux et voitures solaires.

L'emplacement du champ et l'ombrage sont déterminants pour la production électrique. Il est donc indispensable de prendre conscience de leur influence, afin de sélectionner les composants appropriés à chaque site.

1.10.3 Taille et emplacement de l'installation

Le type et la taille d'un système PV dépendent de plusieurs facteurs : client, situation économique, viabilité technique et matérielle, emplacement, caractéristiques de rayonnement et de nombreuses autres caractéristiques. En général, ces paramètres sont soigneusement étudiés et plusieurs configurations sont préparées. On sélectionne la meilleure configuration, après simulation et étude de faisabilité commerciale. Lors du dimensionnement d'un système, il est recommandé de tenir compte des différentes technologies.

Certaines technologies sont mieux adaptées selon les conditions météorologiques. L'emplacement d'une installation solaire doit être recherché avec soin pendant le dimensionnement et avant l'installation. Un emplacement mal choisi peut avoir un fort impact sur la production et les performances du système.

1.10.4 Ombrage

Si les cellules PV sont légèrement différentes les unes des autres ou si elles ne sont pas uniformément éclairées, la courbe I -V résultante n'est pas facilement calculable et dépend alors d'une combinaison complexe du comportement individuel de chaque cellule. Ombrager une partie d'un module PV a de dramatiques conséquences sur sa courbe puissance-tension (P -V) et ce, même si une très faible partie du module ou de la cellule est à l'ombre [32]. Si la cellule solaire d'un module est à l'ombre, elle génèrera moins de courant que les cellules voisines. La cellule solaire inverse sa polarisation, reçoit du courant des autres cellules et dissipe l'électricité sous forme de chaleur. Dissipation d'une puissance sous forme de chaleur pouvant dépasser les 100°C, ce qui pourrait la faire griller. Il s'agit du phénomène de « hot spot ».

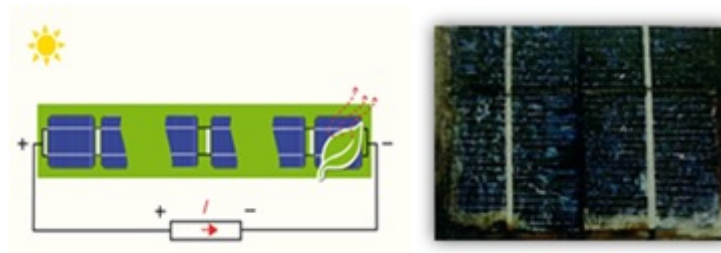


FIGURE 1.16 – Cellule à l'ombre et exemple d'une cellule qui a surchauffé suite au problème de Hot Spot

Les diodes de by passe permettent de limiter la tension aux bornes de la série de cellules ombragées. En devenant passante, c'est-à-dire que la diode « bloque » l'utilisation de la série de cellules et transfère le passage du courant sur la série suivante, la diode impose sa tension et limite la perte de puissance.

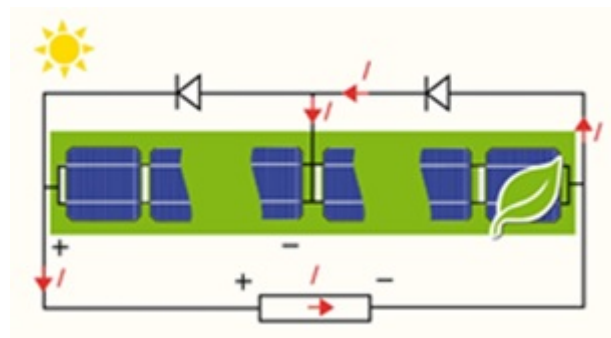


FIGURE 1.17 – Installation d'une diode by passe sur le module

Si aucune diode by-pass n'est installée sur le module, cet effet peut provoquer des dommages irréversibles sur la cellule et le module. à l'ombre, une diminution importante de la puissance produite en est alors la conséquence. Cet ombrage partiel peut être dû à des cheminées, à des arbres ou à d'autres parties de construction.

1.10.4.1 Types d'ombrages

Il existe trois types d'ombrage [5] :

- 1) **Ombre direct** : Ce cas d'ombrage est fait par un objet se trouvant près des modules et fait de l'ombre en permanence au champ PV empêchant la lumière d'atteindre la surface du module et cela provoque de fortes pertes de production du système PV.
- 2) **Ombre temporaire** : Ce dernier est causé par les conditions naturelles, telles que la neige, les feuilles, l'encrassement, etc. L'angle d'inclinaison du champ doit être supérieur à 10° , afin de lui permettre de s'auto-nettoyer et d'évacuer l'eau après la pluie.
- 3) **Auto-ombrage** : En règle générale, les modules d'une ligne doivent être séparés des autres d'environ 4 à 6 fois la hauteur du module incliné. Cela permet d'éviter l'ombrage mutuel.

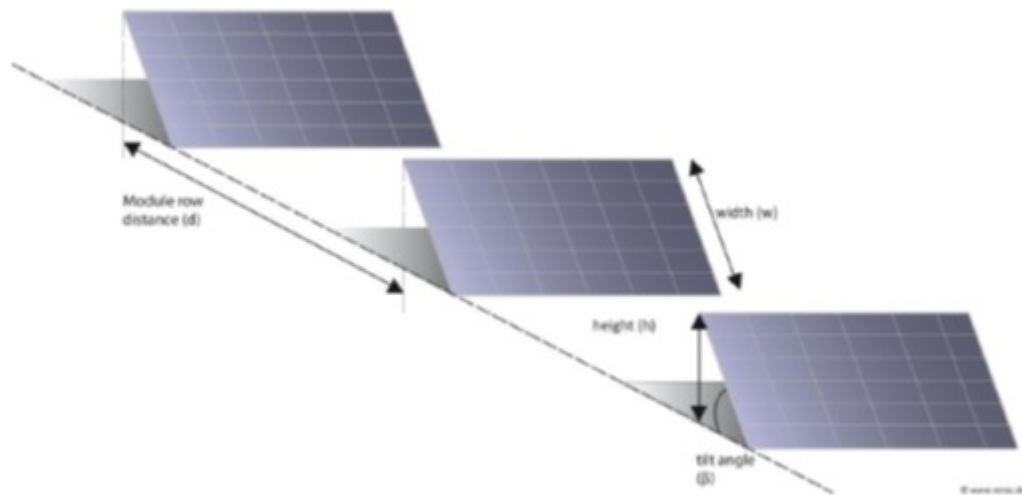


FIGURE 1.18 – Séparation entre les lignes de modules permettant d'éviter l'ombrage mutuel

1.10.5 Potentiels et production envisageable

L'unité kilowatt-crête (kWc) est la quantité d'électricité produite par un module photovoltaïque en conditions de test standard. Selon la technologie choisie, un kWc représente une zone recouverte par des modules PV sur 6 à 20 m^2 . Cette valeur dépend fortement du mode d'installation du système et du niveau de rayonnement. Les installations PV situées dans des pays plus ensoleillés (sahel) produisent plus que celle des pays du nord (moins ensoleillés) entre 1400 et 1800 $kWh/kWc * an$ [5].

Leur position géographique par rapport au soleil influence directement sur la production électrique.

1.10.5.1 Orientation et inclinaison

On appelle orientation, le point cardinal vers lequel est tourné la face active du module photovoltaïque, quant à l'inclinaison, elle indique l'angle qui fait le module avec le plan horizontal (en degré). On place les modules photovoltaïques habituellement avec

la pente vers l'équateur (vers le sud dans l'hémisphère nord et vers le nord dans l'hémisphère sud). L'inclinaison des modules est prise en général égale à la latitude, avec une tolérance de 15° [20]. Toutefois, l'inclinaison des modules devrait rester supérieure à 10° pour assurer un auto-nettoyage lors des pluies. L'orientation et l'inclinaison des modules PV déterminent en grande partie la quantité de rayonnement reçue par la surface. Elles influent sur la quantité d'énergie produite au final et il est très important de les prendre en compte.

1.10.5.2 Systèmes de câblage

Il faut proposer un schéma global du système de câblage de l'installation avant le montage de l'installation afin d'assurer la cohérence et la sécurité de l'ensemble d'une manière durable. On choisit la section de câble selon la puissance des panneaux, la tension, le courant et la distance panneaux-onduleur [26].

1.10.5.3 Nombres de panneaux

Une fois la puissance du champ de panneaux déterminée, on peut trouver, en première approximation, le nombre de panneaux nécessaires, on n'a qu'à diviser la puissance crête par la puissance du modèle de panneaux utilisés. Le nombre de panneaux nécessaires est intéressant à connaître pour évaluer la surface qui serait utilisée par les panneaux. Ceci peut être un indice de la viabilité du projet [27].

$$N_{PV} = \frac{P_{c_{finale}}}{P_{c_{module}}} \quad (1.8)$$

1.10.6 Système de conversion

L'équipement électrique alimenté par le système photovoltaïque peut être de type continu comme des équipements de télécommunications, le pompage d'eau, ou de type alternatif dans les cas d'usage domestique.

1.10.6.1 Le convertisseur

C'est un composant électronique qui sert à transformer la tension fournie par le panneau ou la tension de batterie en tension continue.

1.10.6.2 L'onduleur

C'est un équipement électronique conçu pour transformer le courant du continu à l'alternatif. Il existe deux principaux types d'onduleurs :

- les onduleurs monophasés
- et les onduleurs triphasés.

Les plus grands systèmes utilisent généralement des onduleurs triphasés (l'électricité fournie par le système PV est alors partagée en trois parties, chacune alimentant l'une des trois phases), laissant plus de liberté en termes de dimensionnement du système. Les onduleurs ont besoin d'appareils électroniques capables de suivre les variations de courant et de tension. Les onduleurs intègrent donc généralement des MPPT (MPPT - Maximum Power Point Trackers) leur permettant de suivre le MPP puisque il varie en

permanence en fonction du rayonnement. Certains onduleurs modernes utilisent des techniques à microprocesseurs pour générer une tension sinusoïdale. L'intégration d'appareils électroniques permet d'améliorer la qualité de ce signal [8]. en fonction de leur raccordement aux modules, les onduleurs sont classés en trois principaux types de configurations :

- les onduleurs de modules
- les onduleurs de chaînes
- les onduleurs centralisés.

Chaque concept de raccordement présente des avantages et des inconvénients.

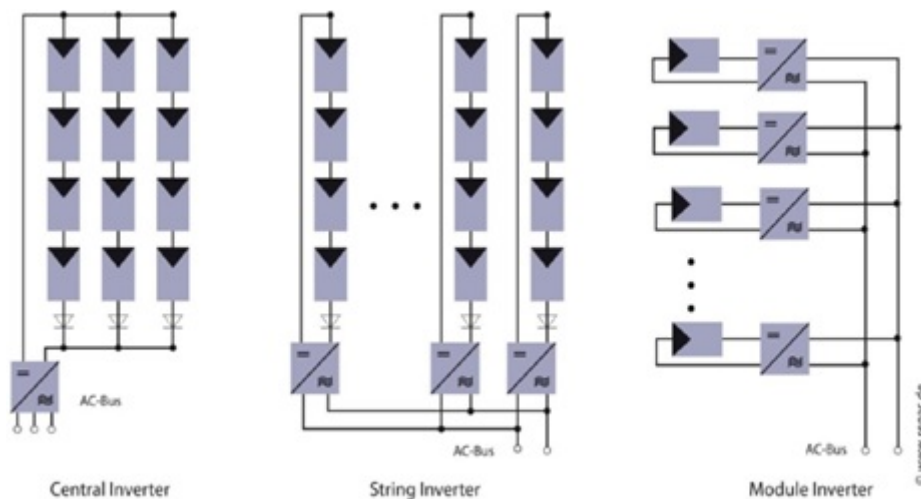


FIGURE 1.19 – Différentes configurations d'onduleurs : onduleurs centralisés, de chaîne et de modules

1.11 Influence de l'éclairement et de la température

La production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température et aussi du vieillissement global du système.

1.11.1 Influence de l'irradiation

La puissance délivrée par un générateur PV dépend de l'irradiation qu'il reçoit.

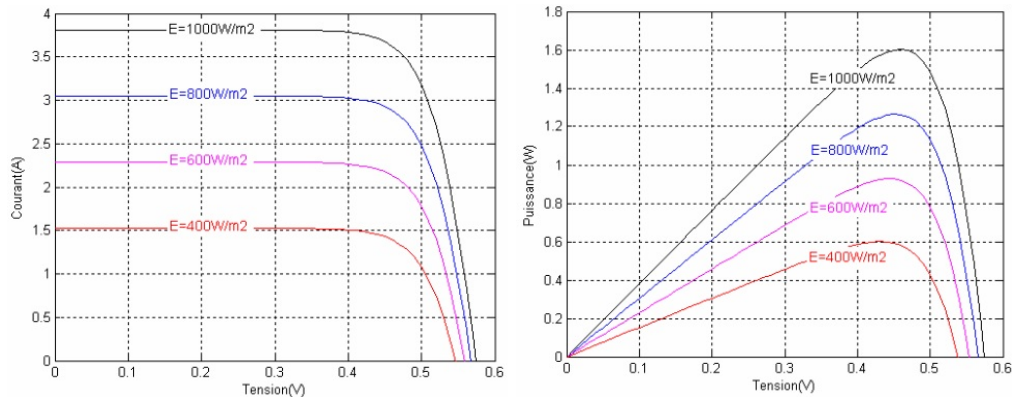


FIGURE 1.20 – Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V et P-V [6]

1.11.2 Influence de la température

L'augmentation du rayonnement et de la température entraîne une diminution de la tension et une augmentation du courant.

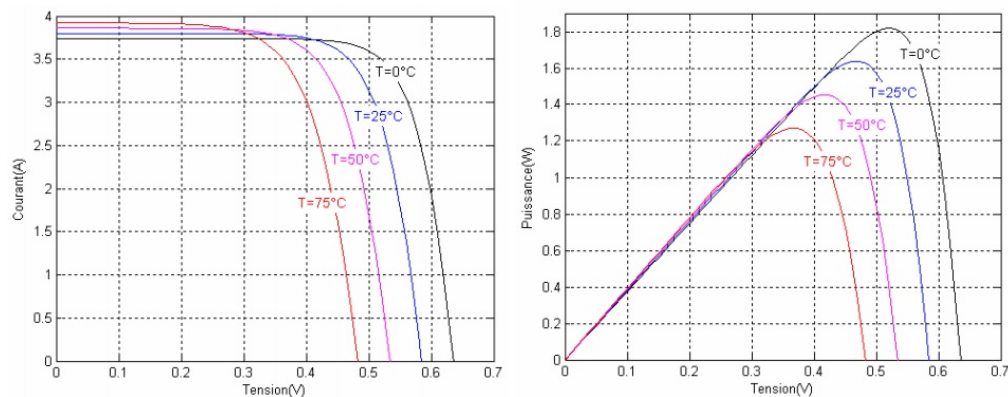


FIGURE 1.21 – Influence simultanée de l'éclairement et de la température sur I-V et P-V [6]

1.12 Avantages et inconvénients d'une installation PV

Parmi les avantages et les inconvénients des installations photovoltaïques, voici les plus importants [41] :

1.12.1 Avantages

- Haute fiabilité.
- Produit utilisé est non polluant.
- Technologie silencieuse et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Longue durée de vie.
- Coût de fonctionnement très faible. Les frais et les risques de transport associés des énergies fossiles sont éliminés.

1.12.2 Inconvénients

- Rendement réel faible, de l'ordre de 10-15 %.
- Nécessité de l'utilisation de l'onduleur comme l'énergie issue du générateur PV est continue.
- Cette technologie est dépendante des conditions météorologiques.
- Nécessité d'un système de stockage lors de l'absence du soleil (la nuit), qui pose encore de nombreux problèmes et exige des dépenses de plus.

1.13 Conclusion

La production de l'électricité en base des centrales PV à grande échelle est prometteuse en raison de sa propreté et sa caractéristique respectueuse de l'environnement, à noter un certain nombre d'effets indésirables sur les systèmes électriques, en particulier la stabilité du système.

Dans ce chapitre on a présenté les principaux paramètres à prendre en compte lors de la conception d'une installation PV et a montré comment les gérer. Pour réussir une application photovoltaïque d'une manière durable il faut prendre en considération toutes les contraintes internes et externes liées à cette application et pour cela il faut faire un dimensionnement précis du système photovoltaïque.

Interactions Entre Le Réseau De Distribution Et Les Systèmes PV

2

2.1 Introduction

99% des réseaux électriques sont de plus en plus sollicités, sous l'effet conjugué de l'ouverture à la concurrence, de la part de plus en plus importante des énergies renouvelables et de notamment l'augmentation de la consommation totale d'énergie. Toutefois, ces sources renouvelables ont des caractéristiques qui posent un problème majeur pour l'équilibre du réseau : il s'agit de sources d'énergie intermittentes et imprévisibles, puisque dépendantes de contraintes météorologiques qui sont par nature variables. Ce chapitre présente le contexte de notre étude sur l'injection d'énergie produite d'une centrale PV au réseau de distribution. Pour cela, nous présentons tout d'abord les réseaux de distribution. Ce chapitre aborde ensuite les interactions entre le réseau de distribution et les systèmes PV.

2.2 Réseau électrique

Le système électrique est structuré en plusieurs niveaux, assurant des fonctions spécifiques propres, et caractérisés par des tensions adaptées à ces fonctions. Il est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution.

- Les réseaux de transport : Leur fonction est principalement le transport de l'énergie électrique sur grandes distances. Pour réduire les pertes, ces réseaux sont à haute et très haute tension (THT, de 63 kV à 450 kV). C'est à ce niveau de tension que sont assurées les interconnexions entre régions au niveau national et les échanges (importation/exportation) d'énergie électrique au niveau international.
- Les réseaux de répartition à haute tension (HT, de 60 kV à 220 kV) assurent, à l'échelle régionale, assurant le transport de l'électricité vers les zones de consommations et à quelques gros clients industriels directement connectés à celui-ci.
- Les réseaux de distribution sont les réseaux d'alimentation de l'ensemble de la clientèle. La fonction des réseaux de distribution est l'approvisionnement de l'énergie électrique aux consommateurs et sous-stations locales. On distingue deux sous niveaux : les réseaux à moyenne tension (MT, de 5,5 kV à 30 kV) qui transportent l'énergie vers les réseaux à basse et les réseaux à basse tension (BT, de 110 V à 220 V) qui sont destinés à alimenter des clients à faible demande d'énergie.

Actuellement les réseaux électriques sont organisés en deux niveaux différents : les réseaux de transport (transmission grid), auxquels sont connectés les grandes centrales électriques, et les réseaux de distribution alimentant la plupart des consommateurs.

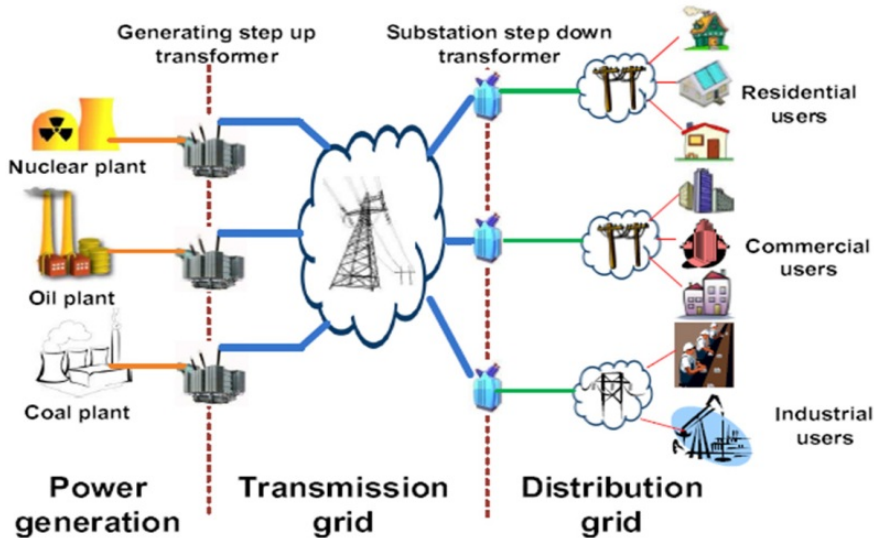


FIGURE 2.1 – Architecture traditionnelle du système électrique [17]

2.2.1 Réseau électrique national

En Algérie, le réseau électrique est organisé en différents niveaux de tension. En sortie des centrales de production (Centrales thermiques classiques et hydrauliques) on trouve généralement une tension qui se situe autour de 11 kV . Dès la sortie ce niveau est augmenté à 220 kV à l'aide d'un transformateur élévateur. La raison de cette amplification réside dans le fait que pour transiter une puissance donnée, si l'on élève le niveau de tension, le courant en ligne est diminué. Ensuite lorsque l'on se rapproche des lieux de consommation, la tension est abaissée à l'aide des transformateurs à des niveaux de 225 kV puis 63 ou 90 kV . Cette partie du réseau électrique constitue le réseau de transport dont les tensions font partie du domaine HTB ($U_n > 50\text{ kV}$), quelque clients y sont raccordés ($P > 10\text{ MW}$). Les réseaux de transport de chaque région sont interconnectés formant ainsi le réseau d'interconnexion nationale géré par le GRTE : Gestionnaire de Réseau de Transport de l'Electricité, filiale du Groupe Sonelgaz qui est le Gestionnaire du Réseau de Transport en Algérie. Ensuite, au stade suivant de l'acheminement de l'électricité, on trouve le réseau de distribution publique, géré par Sonelgaz Distribution, qui est composé du réseau électrique HTA ($1000\text{ V} < U_n \leq 50\text{ kV}$) et du réseau électrique BTA ($50\text{ V} < U \leq 500\text{ V}$). Le réseau HTA, qui est à un niveau de tension de 30 kV , alimente des postes privés dans une gamme de puissance de 250 kW à 10 MW et des postes de distribution publique dans une gamme de puissance de 160 kVA à 1 MVA . Le réseau BTA, qui est à niveau de tension de 400 V , est l'étape finale de l'acheminement de l'électricité. Il alimente les consommateurs de faibles puissances ($< 250\text{ kW}$) [36].

TABLE 2.1 – Domaines de tension

Domaines de tension		Valeur de la tension nominale (U_n en Volts)	
		Courant Alternatif	Courant Continu
Très basse tension (TBT)		$U_n \leq 50$	$U_n \leq 120$
Basse tension (BT)	BTA	$50 < U_n \leq 500$	$120 < U_n \leq 750$
	BTB	$500 < U_n \leq 1000$	$750 < U_n \leq 1500$
Haute tension (HT)	HTA	$1000 < U_n \leq 50000$	$1500 < U_n \leq 7500$
	HTB	$U_n > 50000$	$U_n > 75000$

2.3 Supervision des réseaux

Le système électrique est supervisé et piloté d'une manière hiérarchique : un centre du dispatching national et des centres régionaux, gérant le réseau de transport et des centres locaux gérant les réseaux de distribution. Une responsabilité du dispatching national est d'assurer l'équilibre entre la demande et l'offre au moindre coût économique. Sa principale problématique est due en grande partie à la difficulté de prévoir la consommation avec une grande précision.

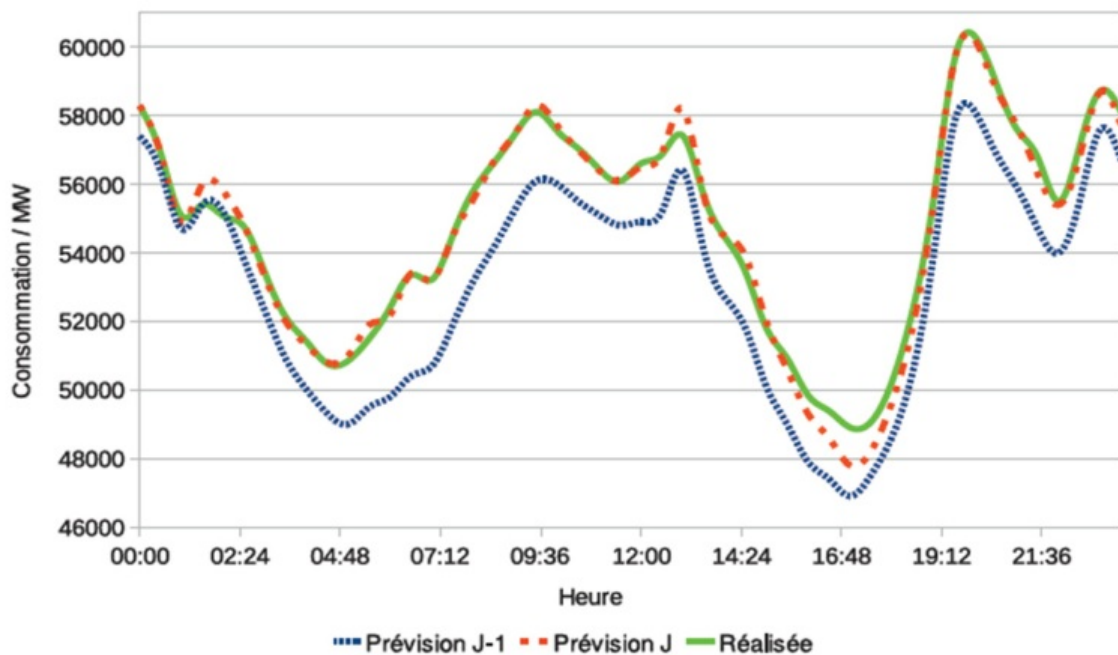


FIGURE 2.2 – Exemple de courbes de charge prévue et réalisée, source RTE [22]

Les centres de dispatching régionaux collectent les informations mesurées sur les nœuds du réseau de transport et les postes de transformation. Ces données sont traitées par des systèmes de collecte, traitement des informations et supervision - SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Ensuite, les données sont visualisées et finalement interprétées par des opérateurs responsables de la supervision des réseaux. Les opérateurs utilisent aussi des logiciels, appelés EMS (Energy Management System) qui facilitent les études de sécurité et de stabilité prévisionnelles ou en temps réel et aident à la prise des décisions pour la conduite des réseaux. Une autre fonction importante réalisée par les centres de dispatching est le réglage de la tension. La tension est

réglée localement par transformateurs réglables et la puissance réactive est générée ou absorbée par des équipements tels que les compensateurs synchrones ou statiques [9].

2.4 Perturbations des réseaux électriques

L'énergie électrique est fournie sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé dont les paramètres caractéristiques sont les suivants [1] :

- 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).

Afin de décrire certaines perturbations et de donner le niveau de conformité de l'énergie fournie. Les perturbations électriques affectant l'un des quatre paramètres cités précédemment peuvent se manifester par [21] :

- Un creux ou une coupure de tension,
- Une fluctuation de la tension,
- Un déséquilibre du système triphasé de tension,
- Une fluctuation de la fréquence,
- La présence d'harmoniques et/ou d'inter-harmoniques.

2.5 Caractéristiques dynamiques des installations PV

Pour des grandes unités de production PV (de dix à plusieurs centaines de MWc) raccordées au réseau de transport et /ou réseau de distribution, les services publics sont censés à faire face à des nouvelles contraintes opérationnelles non traditionnelles liées à l'exploitation, en raison de la différence qui existe entre les caractéristiques dynamiques des installations PV à grande puissance par rapport aux générateurs conventionnels.

TABLE 2.2 – Caractéristiques des différents types de production d'électricité

	PV	Wind	Conventionnel
Intermittence	Elevé	Faible	Inexistante
Coût maintenance	Minimal	Elevé	Moyen
Inertie	Inexistante	Faible	Grande

A partir de tableau, il est évident que la variabilité, souvent appelée intermittence, de la puissance de sortie de l'installation PV représente l'une des importantes préoccupations des gestionnaires du système électrique. Ils doivent faire face, dans le proche futur, non seulement à la demande incontrôlable, mais aussi la génération incontrôlable. L'indisponibilité d'une inertie au niveau des installations PV engendre d'autre problème d'exploitation du système électrique. La forte intégration en masse des sources d'énergie PV dans un système électrique réduit l'inertie effective de ce dernier. Dans un système à inertie réduite, après une perturbation, l'amortissement sera plus long ce qui nécessite une force de rappel plus grande pour amener les machines à l'équilibre. L'affaiblissement de l'inertie du système mettrait l'accent sur les générateurs synchrones qui coexistent avec la génération renouvelable capable de conduire à des phénomènes d'instabilité [5].

L'intégration massive des sources PV dans un système électrique pour un point de fonctionnement donné entraîne la mise hors service des générateurs synchrones, ce qui induit à la réduction de nombre de régulateurs automatiques de la tension (AVR), par lesquels sont dotés les générateurs synchrones. La perte de ces diapositives auxiliaires de réglage de la tension signifie un impact direct sur la stabilité en tension du système électrique.

2.6 Raccordement au réseau

Le raccordement des installations de production aux réseaux publics de distribution est encadré par plusieurs textes règlementaires, et la documentation technique de référence des gestionnaires de réseaux précise les études électriques qui sont menées lors d'une demande de raccordement. Pour effectuer un raccordement au réseau de distribution d'électricité, il est nécessaire d'adapter la tension continue à la sortie des panneaux photovoltaïques à la tension alternative du réseau de distribution. Il faut donc utiliser un onduleur. Des éléments de protection électriques doivent être mis en place du côté du courant alternatif comme du côté du courant continu, afin de protéger l'installation des courts-circuits [13].

- Du côté continu, il faut protéger l'installation contre les courts-circuits et les surtensions atmosphériques. Il faut également prévoir la mise en place d'un interrupteur général permettant la coupure de l'ensemble des panneaux solaires en cas d'urgence.
- Du côté alternatif de l'installation, il faut protéger l'installation contre les surintensités, les surtensions atmosphériques. Il faut prévoir la mise en place d'un interrupteur sectionneur afin de déconnecter l'installation ainsi que la mise en place de la protection des personnes.

Les contraintes liées à l'intégration des installations PV diffèrent selon le point de raccordement, celles raccordées au côté primaire ou secondaire de la distribution et celles raccordées au réseau de transport ont un impact différent sur le système électrique. Une variation de la sortie d'une installation PV raccordée au réseau moyenne ou basse tension peut affecter la stabilité de point de raccordement, par contre pour une installation à grande puissance raccordée au réseau de transport ou bien au réseau de répartition une telle variation dans la source primaire (éclairage) est fortement minimisée par l'effet de la vaste zone occupée par l'installation.

2.7 Exigences vis-à-vis des producteurs d'énergie PV

Le producteur communique au gestionnaire du réseau public de distribution d'électricité les caractéristiques techniques de son installation de production qui sont nécessaires à la définition du raccordement ainsi que, à la demande du gestionnaire, les éléments justificatifs attestant :

- L'aptitude de l'installation de production à fonctionner dans les conditions normales de tension (c'est-à-dire pour une tension au point de livraison ne s'écartant pas de la tension contractuelle de plus ou de moins de 5 %) et de fréquence (c'est-à-dire pour une fréquence comprise entre 49,5 Hz et 50,5 Hz) rencontrées sur le réseau public de distribution d'électricité et sans limitation de durée,

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

2.8 Les études de raccordement menées par les gestionnaires de réseau

Les études de raccordement menées par les gestionnaires de réseau ont pour objectif de déterminer les ouvrages à établir ou modifier pour assurer une desserte dans des conditions techniques et économiques optimales. En effet, le dimensionnement du raccordement projeté doit permettre d'assurer le maintien du réseau existant et futur dans un domaine de fonctionnement acceptable.

2.8.1 But des études de raccordement

Le gestionnaire du réseau public de distribution d'électricité identifie l'éventuel impact que le raccordement de l'installation de production pourrait avoir sur [28] :

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

2.8.2 La vérification des seuils électriques

La vérification des seuils de contraintes électriques (intensité et tension) est systématique lors du raccordement d'un utilisateur, producteur ou consommateur, calculé par le gestionnaire de réseau [18].

2.8.2.1 Contraintes d'intensité

Chaque ouvrage électrique possède des limitations en termes d'intensité pouvant y transiter (une charge maximale). Cette charge est la somme algébrique de la consommation (+) et de la production injectée sur le réseau (-). En l'absence de contrainte sur

le réseau, l'ajout d'une production sur le réseau BT a pour effet initial de diminuer les transits et donc de limiter le risque d'atteinte d'une contrainte d'intensité.

2.8.2.2 Contraintes de tension

Il y a une contrainte de tension lorsque la tension franchit le niveau autorisé. Ce seuil est compris entre 12,5 % et 10 % du niveau de tension nominal défini dans les textes réglementaires, en fonction de la chute de tension HTA entre le poste source et le transformateur HTA/BT [18].

2.8.3 L'importance des hypothèses utilisées dans les études

Les études de seuil électrique reposent d'une part sur la topologie du réseau, c'est à dire la description du réseau existant et d'autre part sur la description des charges qui transitent à l'instant t sur le réseau, via le comptage. Cette description des charges est essentielle pour la qualité du résultat. Dans le cadre de l'étude d'un raccordement, le risque d'écart par rapport au profil moyen est fonction de la dispersion du comportement de chaque utilisateur par rapport à la moyenne. On comprend bien que plus le nombre d'utilisateurs sur un départ basse tension est faible, plus le risque d'un écart par rapport aux profils utilisés est important. Les hypothèses adaptées par le gestionnaire de réseau sont retenues dans le cadre des études de raccordement. Celles-ci ne sont pas publiées, ni communiquées au producteur lors de la remise de proposition de raccordement lorsque celles-ci incluent des modifications du réseau à la tension supérieure.

2.8.4 Impacts potentiels des installations PV sur le RPD

2.8.4.1 Elévation locale du niveau de tension

Le premier impact du développement d'une production décentralisée, répartie sur le réseau basse tension comme les installations photovoltaïques, est de limiter les transits. Les variations de tension d'un réseau électrique dépendent des caractéristiques de ce réseau ainsi que du nombre et de la nature des installations électriques raccordés à ce réseau. Le phénomène de hausse localisée de la tension est le principal impact des installations photovoltaïques sur les réseaux de distribution BT. Les installations consommatrices d'énergie auront tendance à provoquer des baisses de tension alors que les installations de production auront tendance à générer des hausses de tension.

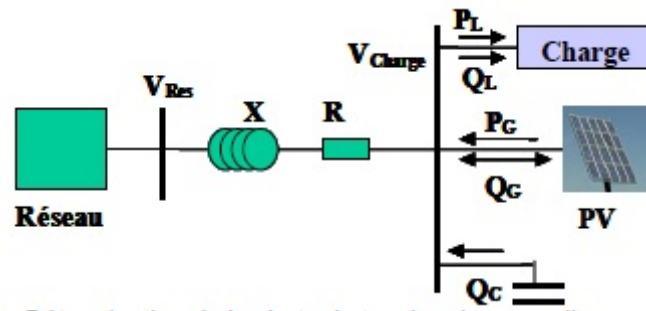


FIGURE 2.3 – Détermination de la chute de tension dans une ligne en présence de PV

Sur un réseau de distribution en présence d'installations PV, la chute de tension ΔV entre le réseau amont et le point de raccordement d'une installation PV via une ligne est déterminée par la formule [28] :

$$\Delta V = \frac{R \cdot (P_G - P_L) + (X \cdot (\pm Q_G - Q_L + Q_C))}{V} \quad (2.1)$$

Où :

R , X sont la résistance et la réactance totale de la ligne

P_G , Q_G sont les puissances, active et réactive fournies par PV

P_L , Q_L sont les puissances active et réactive de consommation

Q_C est la puissance réactive du dispositif de compensation

2.8.4.2 Bosses de tension

Lorsque la production (photovoltaïque), au moment de la perte de réseau amont, est nettement supérieure à la consommation (charges) ; des surtensions d'autant plus fortes que le déséquilibre est élevé peuvent survenir. Inversement, des sous tensions apparaissent lorsque la production est très inférieure à la consommation. Ces bosses de tension impliquent des dommages à des équipements électroniques, tels que des compteurs électriques.

2.8.4.3 Variations rapides de puissance

Les variations rapides de l'éclairement sont en général limitées. Une étude sur le site de tests Rokko au Japon [23] a montré que plus l'installation est de taille importante, moins les variations de puissance sont rapides. Des variations maximales de puissance de près de 30 %/s sur une installation de 2 kW (2,4 m de large), et de 10 %/s sur la puissance totale de l'ensemble des 100 installations de 2 kW (réparties sur une largeur de 85 m) ont été constatées.

2.8.4.4 Harmoniques de courant

D'une manière générale, tout appareil électrique comportant de l'électronique est source d'harmoniques. Les conséquences de ces harmoniques peuvent être instantanées sur certains appareils électroniques. Les onduleurs contribuent tout de même à l'augmentation des harmoniques de courant.

2.8.4.5 Autres impacts possibles

Il existe d'autres impacts pour le réseau de distribution des installations photovoltaïques sur le réseau basse tension qui sont de deuxième ordre et se rencontrent lorsque la densité d'installations photovoltaïques est forte.

2.9 Notion de smart grid

Le terme « réseau intelligent » (une autre appellation populaire est le terme anglais « Smart Grid ») est un réseau de distribution d'électricité qui utilise des technologies informatiques de manière à optimiser et coordonner la production, la distribution et la consommation d'électricité afin d'améliorer l'efficacité énergétique et la fiabilité de ce système. Dans un système électrique, la génération est à chaque instant liée à la demande des utilisateurs. Sachant que la demande est variable et ne peut pas être maîtrisée, sauf dans les cas particuliers, la production doit s'adapter instantanément à la demande pour préserver la stabilité du système.

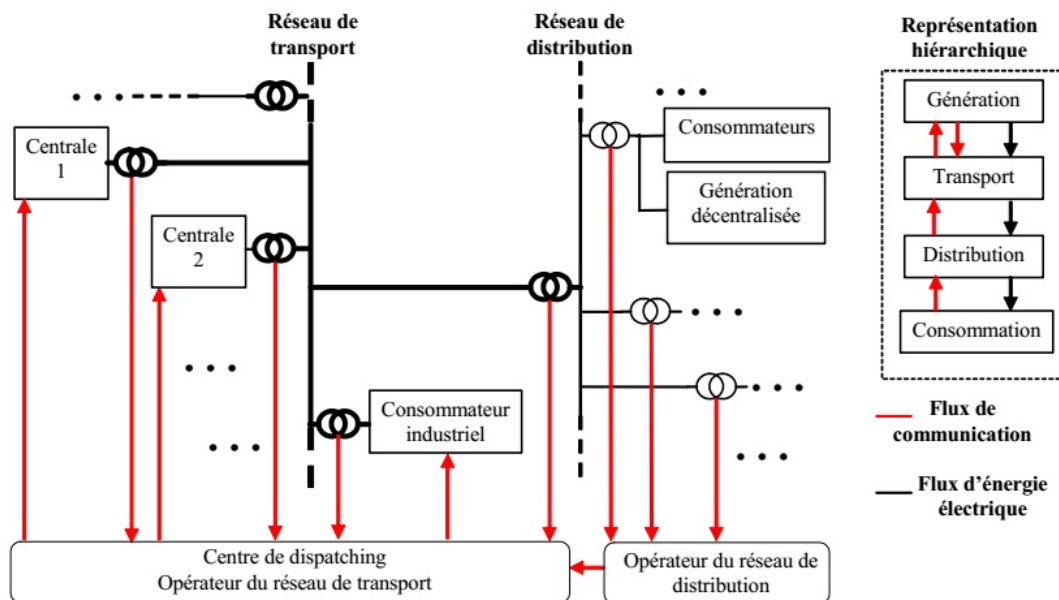


FIGURE 2.4 – Structure traditionnelle du système électrique

Les réseaux intelligents permettront d'agir sur la demande à travers des compteurs intelligents, capables de déplacer certaines charges dans le temps à l'arrivée d'un signal tarifaire. Cette interaction entre producteurs, distributeurs et consommateurs, par l'intermédiaire d'un réseau informatique et des agrégateurs locaux, permettra d'atteindre une meilleure adaptation de la consommation aux capacités instantanées de production que l'utilisation du stockage décentralisé. Contrairement à la génération décentralisée qui est perçue par les opérateurs des réseaux comme une charge passive (non contrôlable) de puissance négative, qui n'est pas pilotée et la puissance générée est estimée uniquement sur la base des prévisions. Dans le concept du « smart grid », la production décentralisée et la consommation sont pilotées localement d'une manière optimale, par des contrôleurs centraux et de cette manière, chaque ensemble local de générateurs décentralisés, charges et dispositifs de stockage paraît pour l'opérateur du réseau de dis-

tribution comme une seule entité qui peut se comporter soit comme un consommateur, soit comme un producteur d'énergie électrique [37].

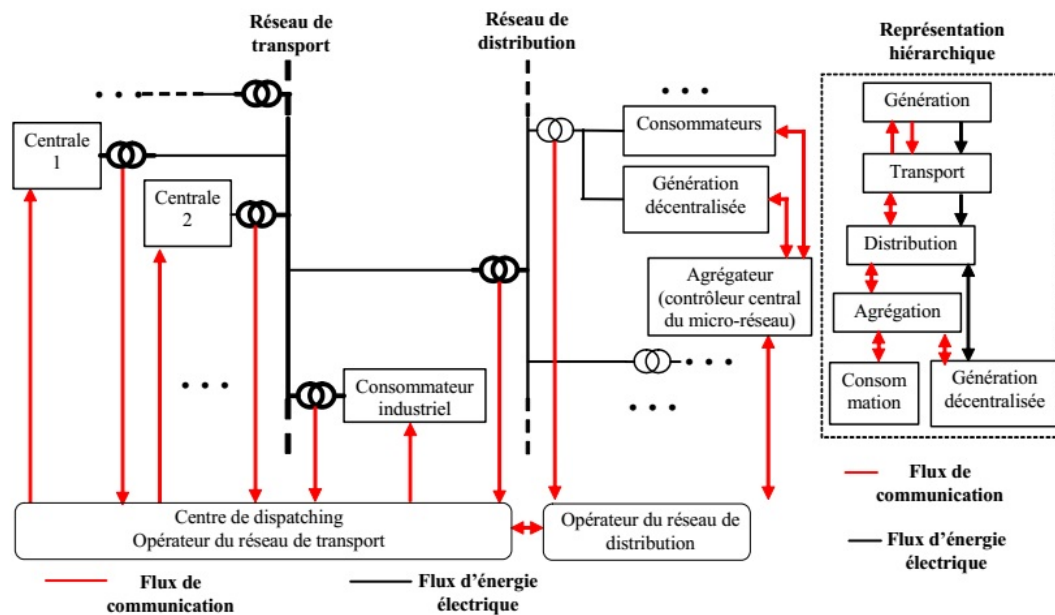


FIGURE 2.5 – Structure traditionnelle du système électrique

2.10 Rendement énergétique

La puissance délivrée par les panneaux pv dépend de l'éclairement, de la température et de la tension aux bornes [43]. Ainsi, dans un système à couplage direct, en général le point de fonctionnement n'est pas le point de puissance maximale (MPP maximum power point), le système pv doit être surdimensionné pour assurer la puissance demandée par la charge. Il est d'une importance capitale d'avoir tout d'abord une profonde connaissance des conditions climatiques du site concerné. Ensuite, c'est la qualité des composants utilisés dans l'installation, la disposition de l'installation elle-même et le niveau de professionnalisme de l'ingénierie qui affecteront les performances de l'installation et donc son rendement énergétique [5].

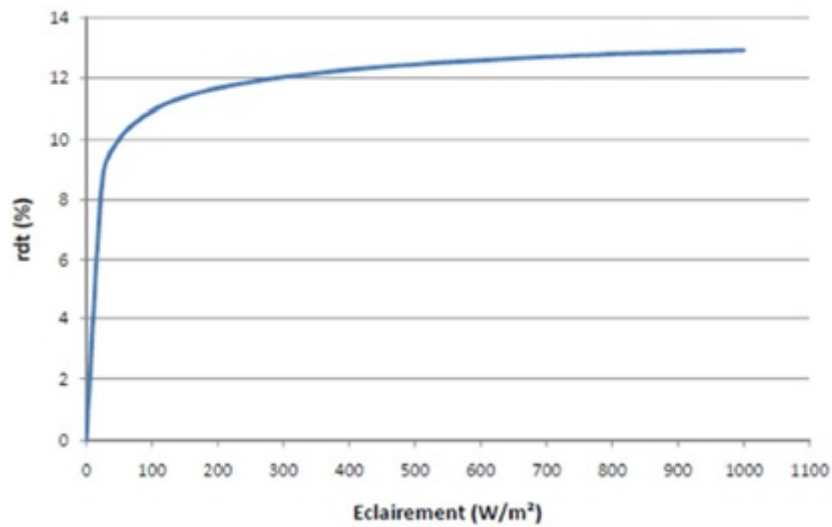


FIGURE 2.6 – Evolution du rendement d'une cellule en fonction de l'éclairement

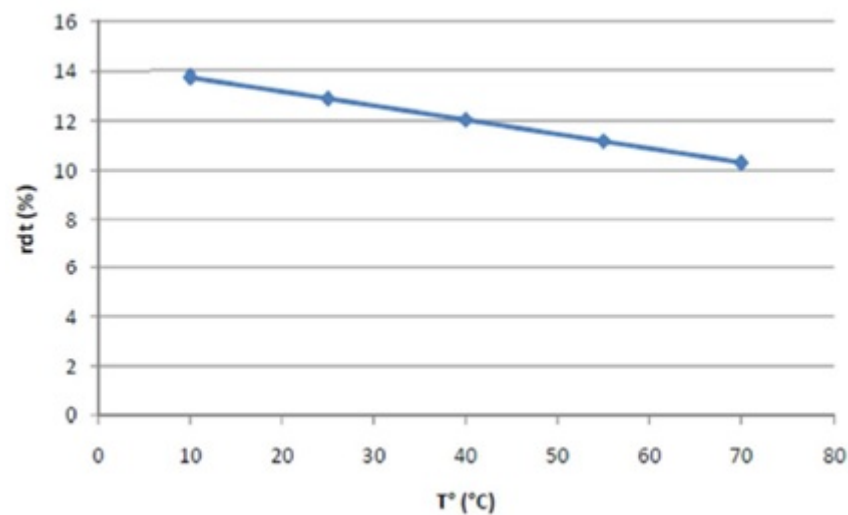


FIGURE 2.7 – Evolution du rendement d'une cellule en fonction de de la T°cellule (pour $E = 1000 \text{ W/m}^2$)

L'utilisation d'un MPPT (Maximum Power Point Tracker) est une solution pour optimiser le rendement énergétique. Celui-ci permet de suivre le point de puissance maximale en controlant la tension ou le courant PV indépendemment de la charge.

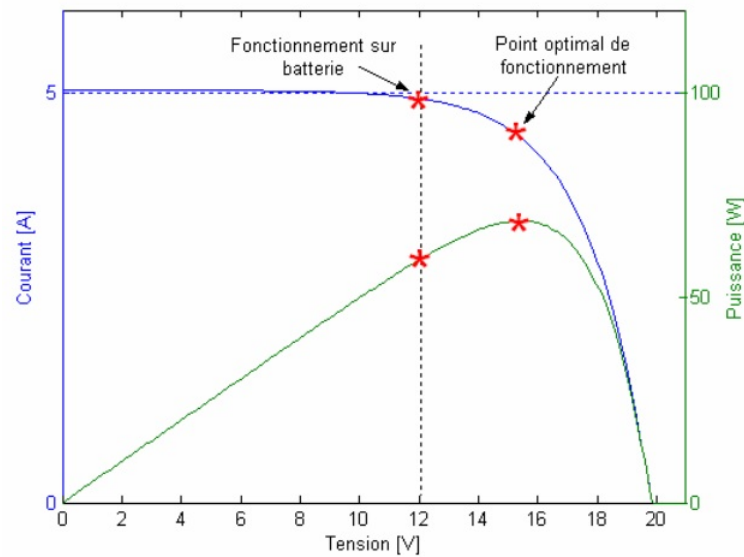


FIGURE 2.8 – Caractéristique Courant/Tension/Puissance d'un panneau PV [43]

2.11 Calcul des puissances et énergies des charges

La charge électrique en Algérie en général et le sud en particulier a reconnu un taux de croissance très élevé pendant les dix dernières années et cela est dû à plusieurs facteurs :

- Fixation du prix du kilowattheure depuis 2005.
- Augmentation revenue individuel.
- Aide de l'état sur la consommation des wilayas du sud algérien de 50%.

Pour modeler la charge des sites isolés, il existe plusieurs approches, il est recommandé d'utiliser les pointes maximums pour déterminer la puissance à installer [27].

$$P_c = P_M(1 + k_g)(1 + k_c) \quad (2.2)$$

P_c : Puissance de la conception prévue ;

P_M : Puissance pointe max atteinte ;

k_g : Coefficient d'évolution de charge (5-20%) ;

k_c : Marge de conception (5-10%).

La modélisation de l'énergie consommée se fait de la même méthode que la puissance

$$E_c = E_M(1 + k_g)(1 + k_c) \quad (2.3)$$

Avec E_c est l'énergie de la conception prévue et E_M est l'énergie totale produite.

2.12 Conclusion

Malgré tous les avantages économiques et environnementaux que possède la production photovoltaïque, cette génération pourrait conduire à un impact potentiellement négatif sur le bon fonctionnement d'un système électrique.

Les systèmes à base d'EnR ne possèdent pas le caractère gérable puisque leur puissance de sortie dépend de la disponibilité de la source primaire (soleil) ce qui rend problématique leur participation à la gestion du réseau. Ces systèmes sont conçus et gérés de manière à injecter au réseau toute l'énergie disponible et extractible (photovoltaïques). Une installation massive de production de cette nature intermittente et aléatoire ne peut perdurer du fait de l'impact négatif voire inacceptable sur l'opération du système.

Pour soulever le défi de l'intégration des grandes quantités de la production photovoltaïque dans notre système électrique, il sera impératif et nécessaire de développer les normes et les règles régissant le raccordement des opérateurs PV et augmenter la sévérité d'accès au réseau électrique.

Deuxième partie

Partie technique

Spécificités techniques des installations photovoltaïques. Application SKTM

Unité d'Adrar

3

3.1 Introduction

Les spécificités techniques des installations photovoltaïques sont à l'origine de nombreux phénomènes d'interaction, impacts et effets sur le réseau public de distribution qui font l'objet de nombreuses publications au niveau international. Ce chapitre est consacré à l'étude et la description de la centrale solaire d'Adrar SKTM.

3.2 SONEGGAZ

Le groupe SONEGGAZ est un groupe industriel leader dans le domaine de fourniture des énergies électriques et gazières en Algérie. Grace à sa ressource humaine formée et qualifiée, le Groupe occupe une position privilégiée dans l'économie du pays en tant que responsable de l'approvisionnement de plus de 8 millions de ménages en électricité et de 4 millions et demi en gaz naturel, soit une couverture géographique de plus de 99% en taux d'électrification et 55% pour la pénétration gaz. Aujourd'hui, outre la société Holding, le Groupe SONEGGAZ compte 40 sociétés et 7 sociétés en participation [39].

SONEGGAZ vit, depuis quelques années, une phase particulièrement importante de son histoire. Désormais la restructuration de SONEGGAZ, suite à l'avènement de la loi N° 01.02 du 05 février 2002 s'est achevée avec la création de l'ensemble des filiales.

On compte :

1. La société de production de l'Electricité (SPE)
2. Sharikat kahraba oua takat moutadjadida (SKTM)
3. Compagnie d'engineeing de l'électricité et du gaz (CEEG)
4. Société algérienne de gestion du réseau de transport de l'électricité (GRTE)
5. Société algérienne de gestion du réseau de transport du gaz (GRTG)
6. Opérateur système électrique (OS), chargé de la conduite de système Production/Transport de l'électricité
7. Société de distribution de l'électricité et du gaz d'Alger (SDA)
8. Société de distribution de l'électricité et du gaz du Centre (SDC)

9. Société de distribution de l'électricité et du gaz de l'Est (SDE)
10. Société de distribution de l'électricité et du gaz de l'Ouest (SDO)

TABLE 3.1 – Chiffres clés 2015 [15]

Investissements	530 000 MDA
Puissance Installée	17 088 MW
Production d'électricité	
SPE	31,359 GWh
SKTM	780,3 GWh
Tiers	32,569 GWh
Total	64,7 TWh
Longueur Réseau	
Electricité	330 462 kms
Gaz	100 349 kms
Nombre de clients	
Electricité	8 452 653
Gaz	4 584 168
Ressource Humaine	
Permanents	8 452 653
Temporaires	4 584 168

3.3 SKTM

Sharikat Kahraba wa Taket Moutadjadida (SKTM), est une société de production d'électricité, dont le capital est souscrit entièrement par le holding Sonelgaz. Créée le 07 avril 2013, par scission de la société SPE, son siège social est basé à Ghardaia. SKTM a été créée pour répondre à des enjeux stratégiques de l'heure. Il s'agit :

- Des spécificités qui caractérisent la gestion du parc de production diesel des RIS (Réseaux Isolés du Sud).
- De satisfaire aux meilleures conditions de continuité et de qualité de service fournis aux populations des régions du sud du pays.
- De la volonté de concrétiser l'ambitieux programme national de développement des énergies renouvelables, en mettant en valeur les potentialités énormes dont dispose notre pays, notamment l'étendue de son territoire et la durée d'ensoleillement.

TABLE 3.2 – Chiffres clés de la SKTM (31 Décembre 2016) [16]

Nombre de centrales classiques	26
Nombre de centrales photovoltaïques	18
Nombre de centrales éoliennes	01
Nombre de groupes	
Groupe Diesel	320
Turbines à gaz	21
Total	341
Puissance installée	
En Diesel	366,63 MW
En turbine à gaz	328 MW
En photovoltaïque	219,10 MWc
En éolien	10,2 MW
Total	923,93 MW
Energie produite	
Par les groupes Diesel	281,11 GWh
Par les turbines à gaz	544,01 GWh
Par les centrales PV	204,70 GWh
Par les centrales éoliennes	19,35 GWh
Total	1 049,13 GWh
Consommation de combustible	
Groupe Diesel	790,61 Mth
Turbine à gaz	1869,48 Mth
Total	2 660,09 Mth
Energie non distribuée	
Diesel	273,1 MWh
Turbine à gaz	476,2 MWh
Total	749,3 MWh
Indisponibilité Hors Entretien Programmé (HEP)	10,19%
Indisponibilité pour Entretien Programmé (EP)	1,64%
Chiffre d'Affaire	14 512 635 KDA
Effectif	1 374 agents

3.4 SKTM unité d'Adrar

La centrale photovoltaïque d'Adrar s'inscrit dans le cadre du programme nationale de développement des énergies renouvelables mis en place par le ministère de tutelle. C'est une centrale relevant de l'unité de production sud, entité de la filiale de SKTM la mise en service le 12/10/2015. La centrale photovoltaïque SKTM est de superficie de 40 hectares. Elle est située à 10 km du centre-ville de la wilaya d'Adrar, 4 km de la route nationale n° 06, entourée de terrains vagues et d'un terrain agricole à l'ouest. Les attentes de la réalisation de cette centrale sont :

- Diversification des sources de production de l'électricité et développement de moyens de production à base d'énergie solaire,

- énergie annuelle produite par la centrale Photovoltaïque est de : 36414 *MWh*.
- Préservation des ressources primaires : économie des combustibles fossiles ; (environ de 10080 m^3 /an de gaz)
- Protection de l'environnement par la réduction des émissions des gaz à effet de serre (28800 *Tonne/an* de réduction d'émissions de CO_2).



FIGURE 3.1 – SKTM vue par Google Map

3.4.1 Composition et raccordement

La centrale photovoltaïque d'Adrar (SKTM) contient 20 Sous-champs, chaque sous-champs produit 1 *MWc*. 93 Matrices, chaque matrice constituée de 44 panneaux devisée en 2 string, chaque string est constitué de 22 panneaux raccordés en série. Le nombre total des panneaux est 81840. Chaque 8 string (4 matrices) sont raccordés à une boîte de jonction, chaque 3 boîtes de jonction sont raccordées à une boîte parallèle et chaque 4 boîtes parallèles sont raccordées à une boîte générale se trouvant dans un shelter. Un shelter contient 2 boîtes générales et 2 onduleurs. La boîte générale est reliée à l'onduleur (CC/AC) qui est relié au transformateur (élévateur 315 V/30 KV) et puis aux arrivées qui injectent au jeu de barres d'où on injecte au réseau électrique.

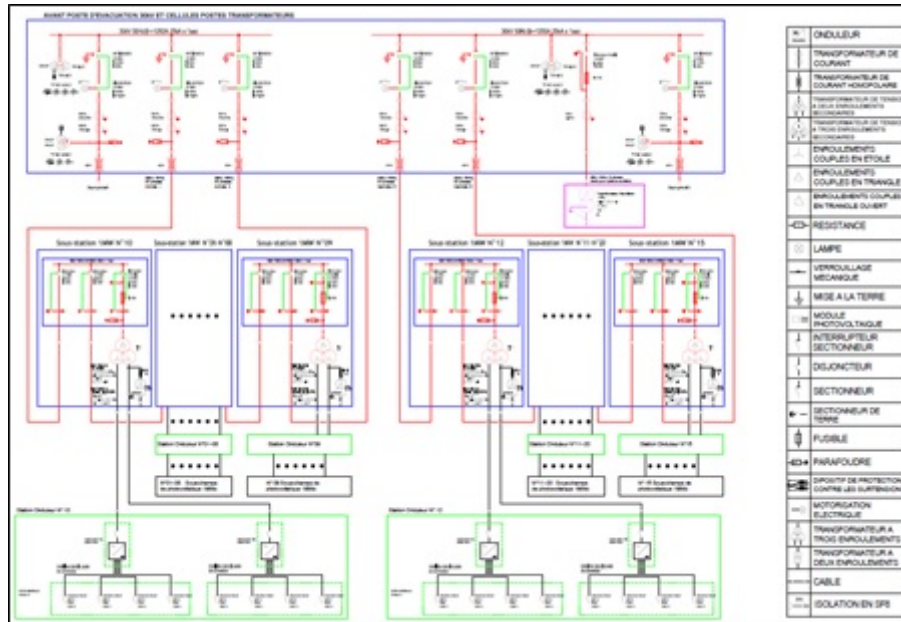


FIGURE 3.2 – Système électrique, schéma unifilaire général, site d'Adrar (20 MWc)

Elle produit un courant continu à partir du rayonnement solaire à travers une certaine quantité de panneaux en silicium raccordés en série, et la mise en place des boîtes de raccordement en parallèle pour atteindre le niveau de courant nominal au niveau de l'onduleur, relié avec le transformateur d'élévation de tension, par lequel le courant continu est transformé en courant alternatif qui sera raccordé au réseau publique.

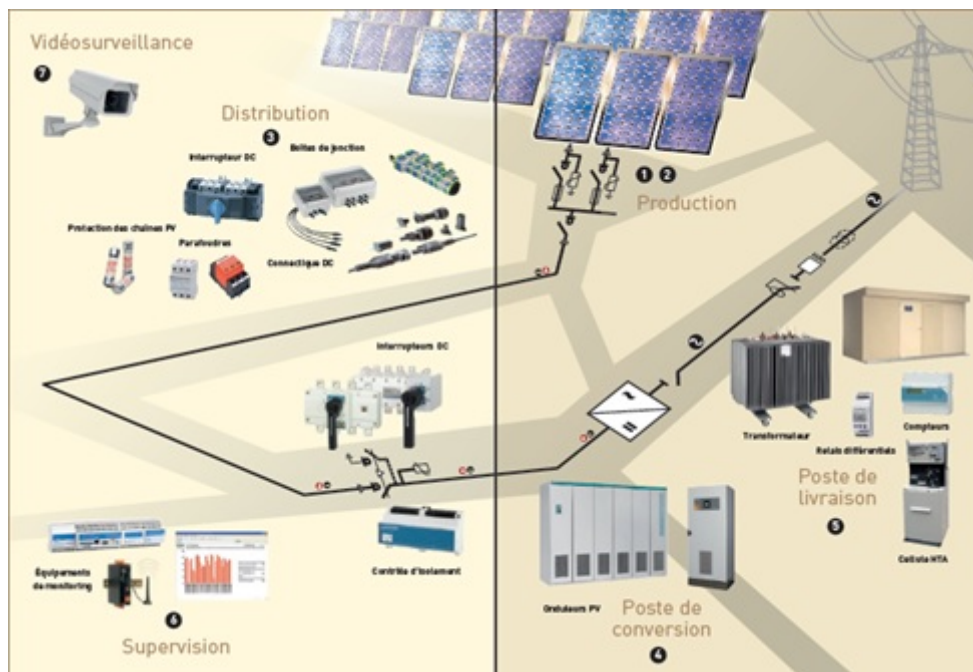


FIGURE 3.3 – Schéma de la centrale de production d'électricité PV

L'injection au réseau électrique est faite sous trois conditions de synchronisation qui sont :

- Même fréquence,

- Même tension ;
- Même champ tournant (pas de déphasage).

3.4.2 Disposition et Caractéristiques des composants de la centrale

3.4.2.1 Structure porteuse / de fixation

Les structures porteuses sont le support sur lequel sont disposés les modules. Le rôle de ces structures :

- Etre stable
- Supporter le poids des panneaux
- Résister aux contraintes environnementales



FIGURE 3.4 – Montage des supports

3.4.2.2 Panneaux solaires photovoltaïques

Le panneau est composé de silicium avec une surface de verre, matériaux d'EVA en dos, cadre en aluminium et boîte de câble etc.

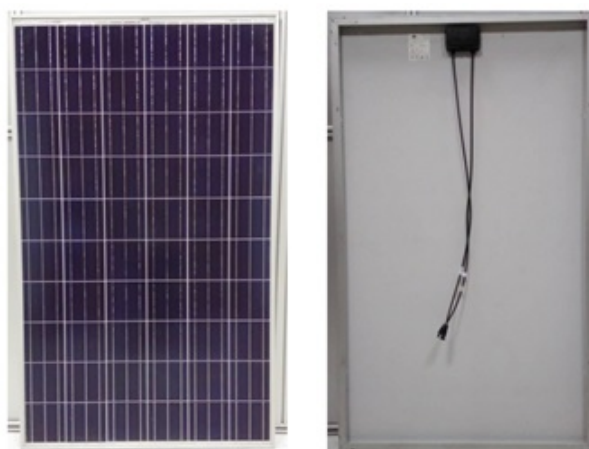


FIGURE 3.5 – Module photovoltaïque

Les panneaux sont en silicium poly cristallin, orientés vers le sud d'une inclinaison de 27° . Il est mesuré à un spectre solaire AM_{1.5G}, une irradiation 1000 W/m^2 et une température cellule de 25°C (conditions standards).

TABLE 3.3 – Caractéristiques électriques des panneaux en silicium poly-cristallin

Marque	YINGLI SOLAR
Type de module	YL245P-29b
Classe d'application	A
Puissance mesurée (W)	245
Tension mesurée (V)	29,6
Courant mesuré (A)	8,28
Fusible série Max (A)	15
Tension à circuit ouvert (V)	37,5
Courant de court-circuit (A)	8,83
Tension système max (V)	1000

3.4.2.3 Boite de raccordement

Les boites jonctions et les boites parallèles sont disposées dans les sous-champs. Leurs fonctions sont :

- Raccorder les chaines de panneaux entre elles
- Protéger les chaines de panneaux et les intervenants des risques électriques et atmosphériques
- Assurer l'acheminement du courant produit vers les postes de conversion.

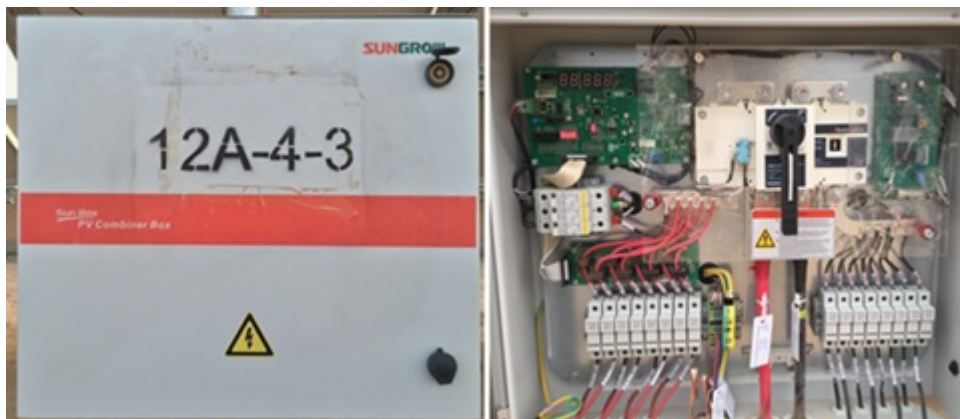


FIGURE 3.6 – Boite de jonction

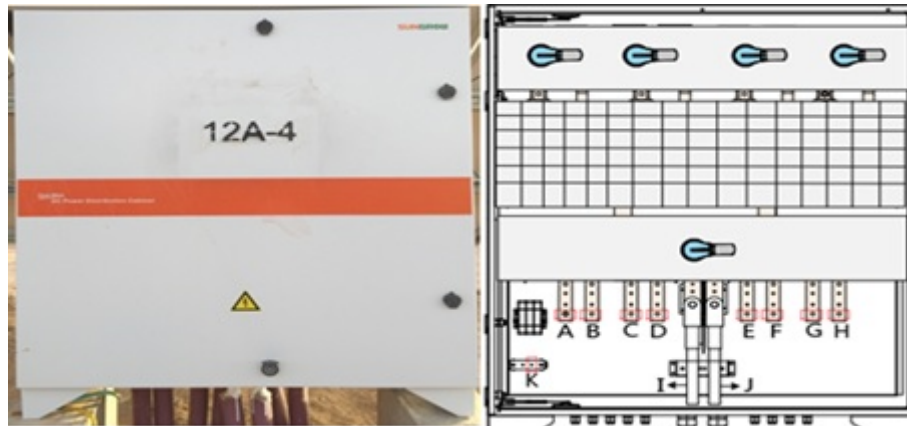


FIGURE 3.7 – Boite parallèle

TABLE 3.4 – Caractéristiques électriques de la boite parallèle

Marque	SUNGROW
Modèle	PMD-D125K
Puissance nominale	125 Kw
Tension maximum DC	1000 V
Max. N° de l'entrée DC	4
Protection IP	IP 65
Température ambiante	-25°C à +60°C

TABLE 3.5 – Caractéristiques électriques de la boite générale

Marque	SUNGROW
Modèle	PMD-D500K
N/S	A1409024534
Date de fabrication	08/09/2014
Puissance nominale	500 kW
Tension maximum DC	1000 V
Max. N° de l'entrée DC	4
Protection IP	IP 20
Température ambiante	-25°C à +60°C
Poids net	230 kg

3.4.2.4 Poste de conversion (Onduleur + Transformateur)

Ce poste a un rôle déterminant pour le fonctionnement de la centrale qui se caractérise en :

- Convertir le courant continu en courant alternatif
- Protéger les circuits de distribution DC et les intervenants des risques électriques et atmosphériques
- Générer un courant alternatif de qualité
- Transformer la basse tension en moyenne tension

3.4.2.4.1 Onduleur

A l'intérieure du shelter plusieurs composants sont disposés, pouvant assurer une interconnexion et un service fiable, sécurisé et durable. Ces composants sont : 2 onduleurs, 2 boîtes générales, unité de contrôle local des sous-champs, cellule de distribution. Les boîtes générales se trouvent en bas, la cellule de distribution est en haut de l'onduleur A, et l'unité de contrôle est en haut d'onduleur B

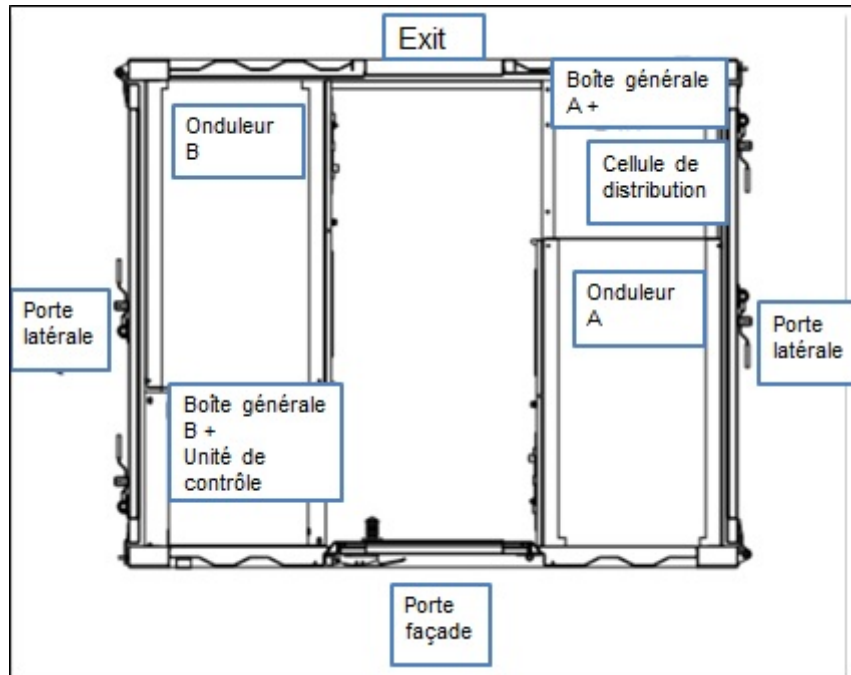


FIGURE 3.8 – Disposition de l'onduleur dans le shelter



FIGURE 3.9 – Local de l'onduleur (Shelter)

TABLE 3.6 – Caractéristiques électriques de l'onduleur

Marque	SUNGROW
Type	SG500MX
Classe de protection	I
Protection IP	IP21
Température de fonctionnement	-30°C à +55°C
Entrée - DC	
Tension max. (V)	1000
ISC (A)	1344
Tension VMPPmin. (V)	500
Tension VMPPmax. (V)	850
Courant d'entrée max. (A)	1120
Catégorie de surtension	II
Sortie - AC	
Puissance de sortie nominale (kW)	500
Tension de sortie nominale (V)	3 315
Fréquence de sortie nominale (Hz)	50
Courant de sortie max. (A)	1008
Facteur de puissance	[-0,9 -1] [0,9 1]
Catégorie de surtension	III

3.4.2.4.2 Transformateur (élévateur)

C'est un équipement électrique très important pour le système de transformation et de transport AC. Il transforme la tension BT en HT. L'équipement est entouré d'une enveloppe en shelter, équipé aux quatre côtés des ventilateurs de radiation de chaleurs, fonctionnent selon la température. Le transformateur est placé en avant, et en arrière se trouve une cellule de boucle et de distribution.

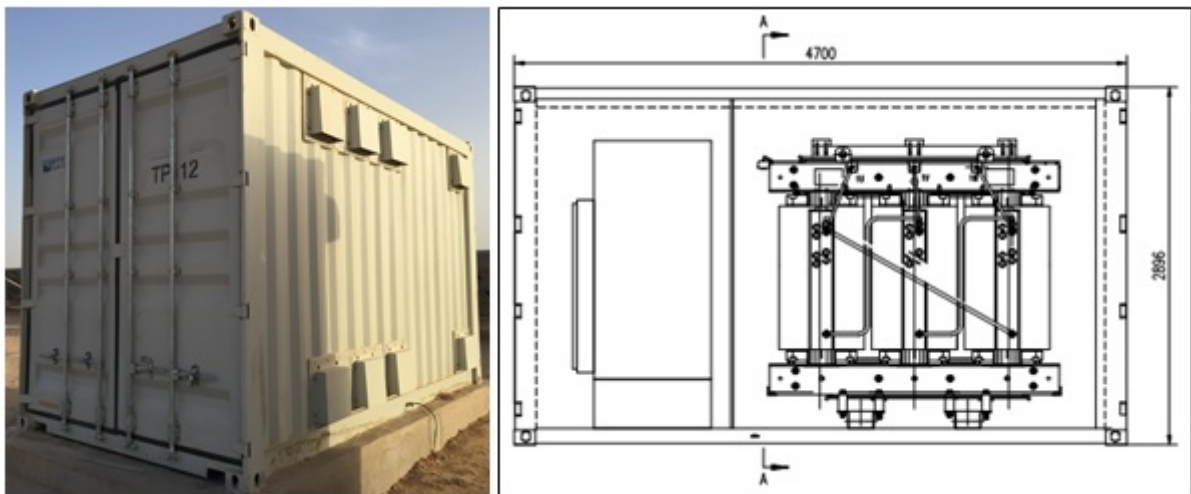


FIGURE 3.10 – Local du transformateur

TABLE 3.7 – Caractéristiques électriques du transformateur principal

Marque	SUNTEN
Type	SCLB10-1250/30/2 × 0,315
N° de série	D173
Code du produit	ASEB2452-6D
Classe thermique	F
Normes	IEC60076-11
Repère du group d'accouplement	Dy11y11
Valeur limité d'augmentation de température	100K
Capacité nominale	1250kVA
Fréquence nominale	50Hz / 3Phare
Indice de protection	IP 00
Mode de refroidissement	AN/AF
Condition d'utilisation	Type intérieur
Proids total	4960kg
Date de fabrication	10/2014
Classe climatique	C2
Niveau environnelental	E2
Classe de performance de combustion	F1
Coté primaire	
Tension nominale (V)	30000
Courant nominale (A)	24,1
Impédance de court-circuit (%)	6,28
Coté secondaire	
Tension nominale (V)	315/315
Courant nominale (A)	1146/1146
Niveau d'isolation	
Borne de ligne HT LI/AC 170/70kV	Borne de ligne BT LI/AC 20/10kV

3.4.2.5 Poste d'évacuation MT

Le dispositif de la mesure et de contrôle assure le comptage de la production d'électricité. Ce sont des cellules métalliques étanches en gaz SF₆ constituées de :

- Isolation en SF₆
- Jeu de barre fermé
- Système de commande BT
- Câblage étanche

Fonction matériel

- Transformer la moyenne tension en haute tension
- Protéger les circuits de distribution AC et les intervenants des risques électriques et atmosphériques
- Raccorder l'installation au réseau de distribution ou de transport (ERDF, RTE)



FIGURE 3.11 – Schéma de cellule de la centrale d'Adrar

3.4.2.6 Système de surveillance et de commande

Au niveau du poste de commande et de contrôle la surveillance de tous les équipements installés dans la centrale (Onduleurs, Transformateurs, Cellules MT, Cellule de disjoncteur, Boite de raccordement, Station météorologique, Transformateurs auxillaires) est assurée. Le système de commande est la partie principale de l'automatisation de la centrale avec la fonction de contrôle et mesure, communication à distance et protection. Le système fonctionne avec le logiciel SCADA NC2000 fournis par la société chinoise NARI.

Fonction matériel

- Suivre le fonctionnement et la performance de l'installation
- Permettre d'optimiser la production (détection d'anomalie)

Schéma de système de surveillance	Météorologique	Surveillance d'onduleur	système intégré DC-AC	
SCHEMA UNIFILAIRE	Centrale électrique	Puissance qualité	commun 1#	
générateur diesel	30kV	watt-heuremètre	commun 2#	
Adr-champ 01	Adr-champ 02	Adr-champ 03	Adr-champ 04	Adr-champ 05
Surveillance d'unité	Surveillance d'unité	Surveillance d'unité	Surveillance d'unité	Surveillance d'unité
Survei param. analog. boîtes jonction	Survei param. analog. boîtes jonction	Survei param. analog. boîtes jonction	Survei param. analog. boîtes jonction	Survei param. analog. boîtes jonction
Survei param. numé. boîtes jonction	Survei param. numé. boîtes jonction	Survei param. numé. boîtes jonction	Survei param. numé. boîtes jonction	Survei param. numé. boîtes jonction
Adr-champ 06	Adr-champ 07	Adr-champ 08	Adr-champ 09	Adr-champ 10
Surveillance d'unité	Surveillance d'unité	Surveillance d'unité	Surveillance d'unité	Surveillance d'unité
Survei param. analog. boîtes jonction	Survei param. analog. boîtes jonction	Survei param. analog. boîtes jonction	Survei param. analog. boîtes jonction	Survei param. analog. boîtes jonction
Survei param. numé. boîtes jonction	Survei param. numé. boîtes jonction	Survei param. numé. boîtes jonction	Survei param. numé. boîtes jonction	Survei param. numé. boîtes jonction
Adr-champ 11	Adr-champ 12	Adr-champ 13	Adr-champ 14	Adr-champ 15
Surveillance d'unité	Surveillance d'unité	Surveillance d'unité	Surveillance d'unité	Surveillance d'unité
Survei param. analog. boîtes jonction	Survei param. analog. boîtes jonction	Survei param. analog. boîtes jonction	Survei param. analog. boîtes jonction	Survei param. analog. boîtes jonction
Survei param. numé. boîtes jonction	Survei param. numé. boîtes jonction	Survei param. numé. boîtes jonction	Survei param. numé. boîtes jonction	Survei param. numé. boîtes jonction
Adr-champ 16	Adr-champ 17	Adr-champ 18	Adr-champ 19	Adr-champ 20
Surveillance d'unité	Surveillance d'unité	Surveillance d'unité	Surveillance d'unité	Surveillance d'unité
Survei param. analog. boîtes jonction	Survei param. analog. boîtes jonction	Survei param. analog. boîtes jonction	Survei param. analog. boîtes jonction	Survei param. analog. boîtes jonction
Survei param. numé. boîtes jonction	Survei param. numé. boîtes jonction	Survei param. numé. boîtes jonction	Survei param. numé. boîtes jonction	Survei param. numé. boîtes jonction

FIGURE 3.12 – Interface principale de contrôle

3.4.2.7 Stockage

En cas de panne du réseau électrique, pour juguler le problème pour qu'il n'y est pas de coupure de courant, la centrale a mis en disposition un groupe diesel pour l'éclairage du poste de garde et l'alimentation de la salle de commande (Serveurs) et des batteries en cas ou y aurait un problème dans le groupe diesel.



FIGURE 3.13 – Groupe diesel et batteries utilisés

TABLE 3.8 – Caractéristiques électriques du groupe de l'alternateur de diesel

Marque	Xingguang Jiangsu
Type de groupe	XG-50GF
Code de fabrication	SKTM-15F0
Date de fabrication	07/2014
Phase	3
Poids de groupe	200 kg
Facteur de puissance	0,8 hystérèse
Puissance nominale	50 kW
Tension nominale	400 V
Courant nominal	90 A
Fréquence nominale	50 Hz
Vitesse nominale de rotation	1500 in

3.4.2.8 Maintenance et équipements de nettoyage

Un programme détaillé de maintenance est fournis par le constructeur YSH (Yingly Solar/Sinohydro/Hydro China), contenant les horaires de la vérification préventive des équipements. Le constructeur YSH a fournis pour le nettoyage, un camion avec des kit-cher manuels et une station de traitement d'eau composée d'un système d'eau adoucie, d'un système d'alimentation d'eau et d'un système de contrôle.



FIGURE 3.14 – Equipements de nettoyage



FIGURE 3.15 – Station de traitement d'eau

3.5 Conclusion

Ce chapitre est basé sur des données réelles acquises lors d'un stage pratique au sein de la centrale solaire d'Adrar (SKTM). Le site de la centrale était choisi pour son assiette foncière, sa disponibilité, et son accessibilité au point de raccordement. Après l'étude, la capacité choisie de la centrale était 20MW en raison de la proximité d'une poche importante de consommation.

Spécificités techniques des installations photovoltaïques. Application SKTM

Unité d'Adrar

4.1 Introduction

Des données de temps réel de la production PV (puissance max) de deux journées 12 et 13/02/2017 sont prises de la centrale SKTM. Ces deux journées représentent deux journées typiques, journée claire et journée perturbée (avec et sans fluctuations). Les données de la demande (besoin en électricité) et des données de la production des turbogénérateurs sont prises de la SONELGAZ et cela pour faire le rapport production/consommation et voir l'effet réel de l'injection du photovoltaïque au réseau électrique de la région.

4.2 Etude de l'impact de la production de la centrale solaire d'Adrar sur le système électrique

4.2.1 Journée typique (12 Février 2017)

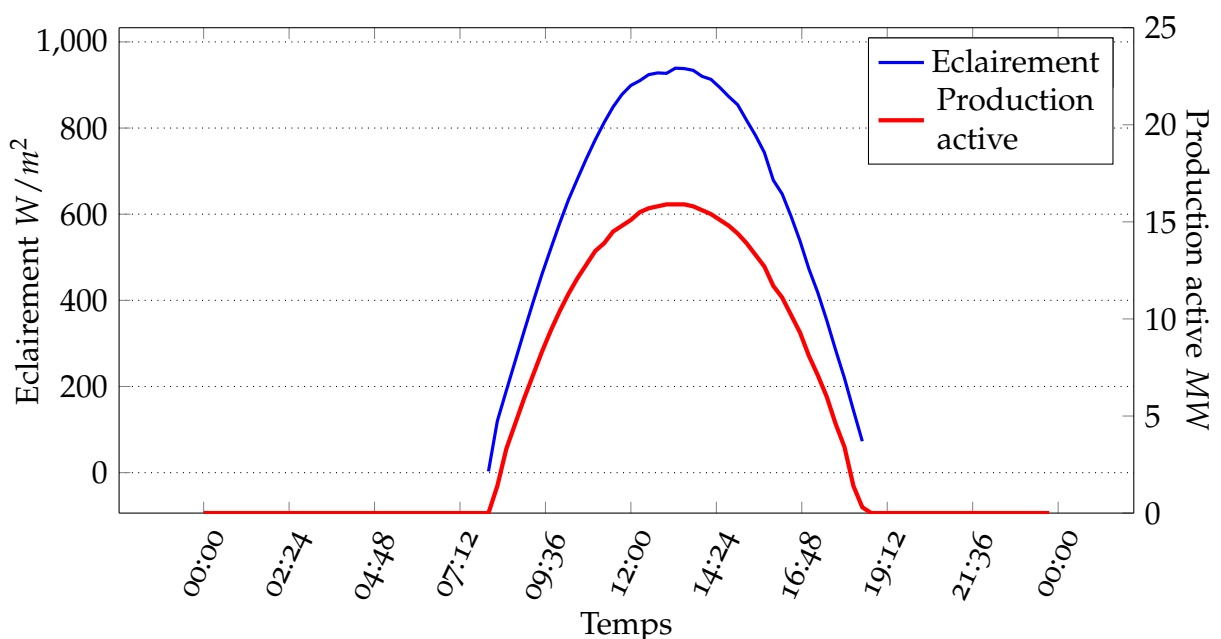


FIGURE 4.1 – Variation de la Production PV en fonction de l'éclairement du 12 février 2017

Ce graphe représente l'éclairement et la puissance active de la journée 12/02/2017 produite par la centrale SKTM d'Adrar. La production est nulle durant les premières heures (la nuit) jusqu'à l'aube ou l'éclairement commence. à partir d'une certaine valeur de l'éclairement (Seuil de Synchronisation), la production PV commence et la puissance active augmente avec une correspondance en forme avec l'éclairement. La puissance active augmente proportionnellement avec l'éclairement et atteint un pic correspondant au pic de l'éclairement vers 13h et décroît aussi avec ce dernier pour s'annuler à l'arrivée au seuil de déclenchement avec le coucher du soleil.

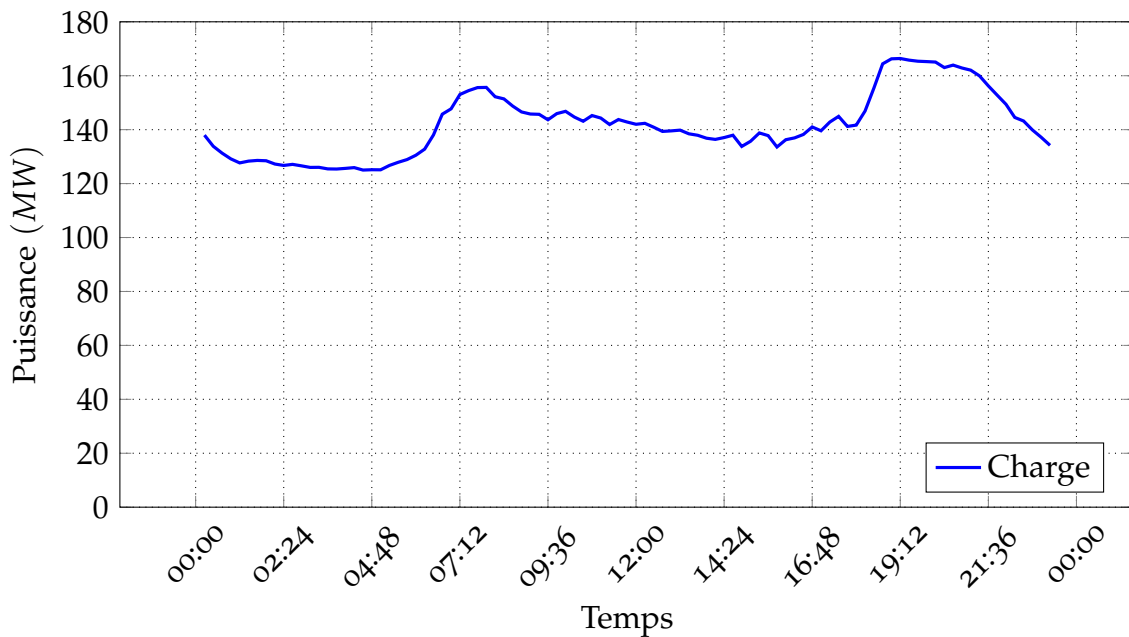


FIGURE 4.2 – Variation du Besoin de puissance en fonction du temps du 12 février 2017

Ce graphe représente la variation de la demande en énergie (Consommation) de la journée de 12/02/2017 en fonction de temps. Cette variation dépend de plusieurs facteurs

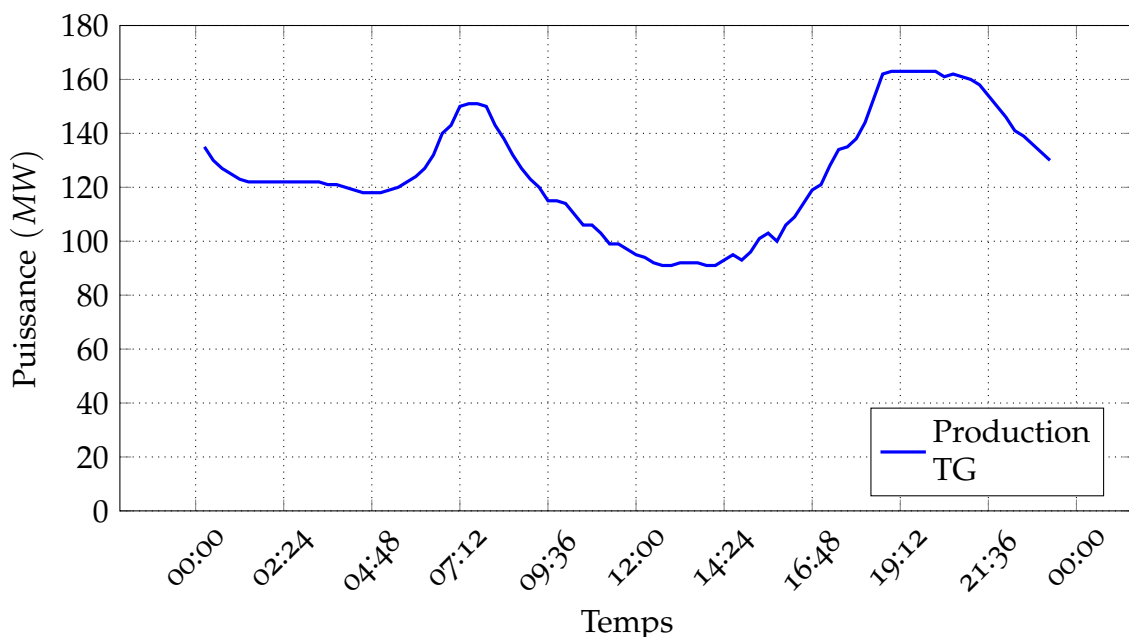


FIGURE 4.3 – Production des Turbo Générateurs du 12 février 2017

Ce graphe représente la production des Turbo générateurs durant la journée du 12/02/2017.

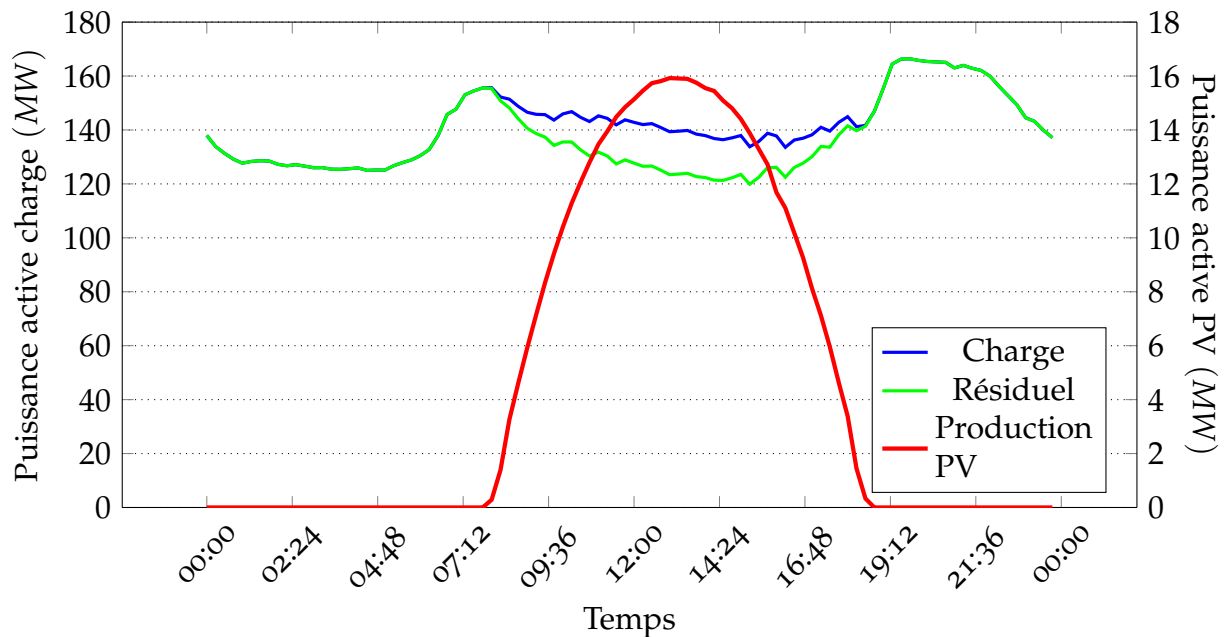


FIGURE 4.4 – Puissances du Réseau électrique du 12 février 2017

On observe une superposition entre la demande et le résiduel avant 8h et cela signifie que c'est la production des turbo générateurs et les éoliennes qui assure la demande. A partir de 8h, l'écart entre la courbe de la charge et la courbe résiduelle commence à prendre valeur proportionnellement avec la production injectée de la centrale et prend une valeur maximale environ 13h qui correspond au pic de la courbe de production PV (ce qui veut dire réellement que dans cette intervalle de temps c'est la centrale PV qui assure la production et que les des turbo générateurs et les éoliennes compensent les fluctuations de la production). Après 13h, la production PV commence à décroître avec l'éclairement et la production des turbogénérateurs et les éoliennes augmente. Pour que après le coucher du soleil elle prend en charge la demande et c'est pour cela qu'on voit une superposition des courbes à 18 :45h correspondant au seuil de déclenchement de la production PV.

4.2.2 Journée perturbée (13 Février 2017)

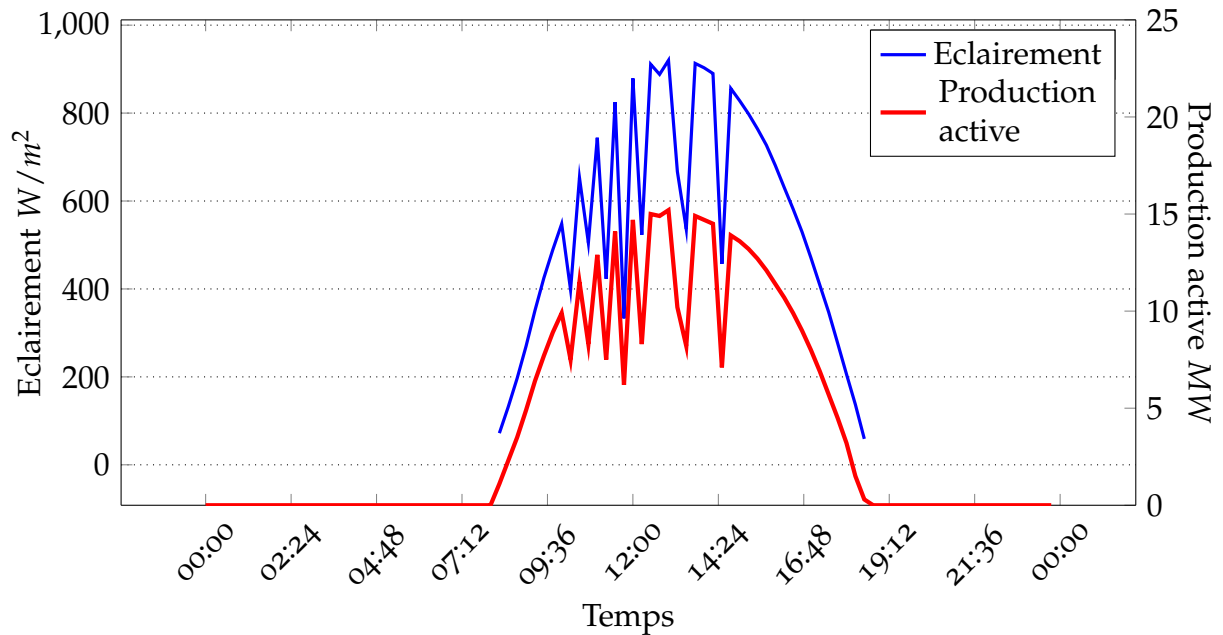


FIGURE 4.5 – Variation de la Production PV en fonction de l'éclairement du 13 février 2017

Ce graphe représente l'éclairement et la puissance active de la journée 13/02/2017 produite par la centrale SKTM d'Adrar. La production commence à partir de 8 :15h et croit jusqu'à atteindre la valeur de puissance maximale produite à 13h et décroît ensuite jusqu'à l'atteinte de la valeur de déclenchement à 18 :30h avec des variations de puissances ΔP variant de 2 à 5 MW le long de l'intervalle 10h à 14 :45h. On observe une correspondance en forme entre la courbe de la puissance active et celle de l'éclairement. Quel que soit la variation de l'éclairement, elle influe directement sur la production injectée de la centrale solaire d'Adrar et on observe une réponse instantanée.

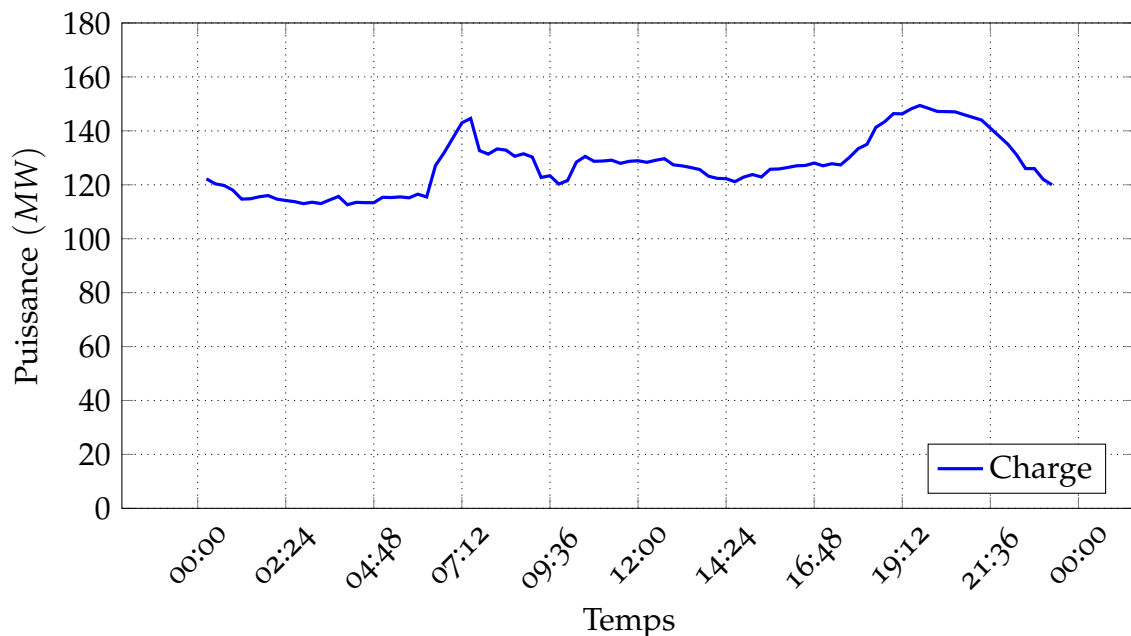


FIGURE 4.6 – Variation du Besoin de puissance en fonction du temps du 13 février 2017

Le graphe ci-dessus représente la variation de la demande en énergie (Consommation) de la journée de 13/02/2017 en fonction de temps.

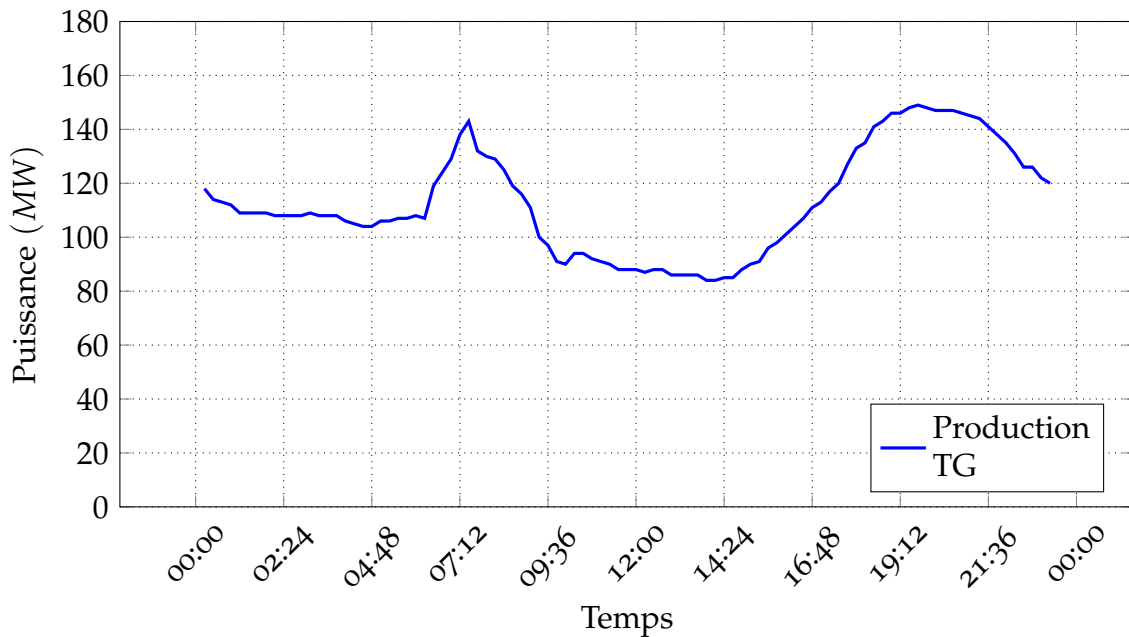


FIGURE 4.7 – Production des Turbo Générateurs du 13 février 2017

Ce graphe représente la production des Turbo générateurs durant la journée du 13/02/2017.

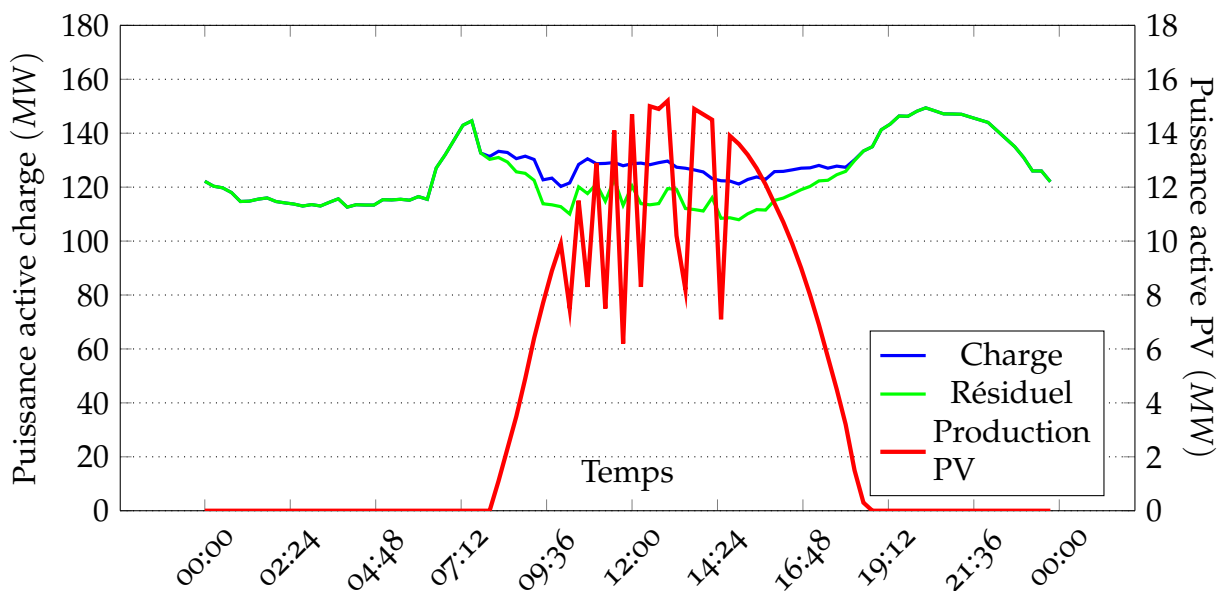


FIGURE 4.8 – Puissances du Réseau électrique du 13 février 2017

Ici comme dans la journée typique, l'écart entre la courbe de la charge et la courbe résiduelle prend une valeur et commence à s'étendre en fonction de la production PV. Sauf que la production des turbogénérateurs assure aussi les moments de la perturbation (fluctuation) ΔP de la production PV. La production des turbogénérateurs augmente lorsque la production PV diminue en raison de l'égalité entre la production et la consommation pour assurer l'équilibre de la fréquence (50 Hz).

4.3 Conclusion

Dans ce chapitre, on a fait l'évaluation et l'analyse des données de temps réel du fonctionnement de la centrale solaire d'Adrar (SKTM). D'après les résultats, la variation de la source primaire (Soleil) influe directement sur la production PV. La réponse instantanée de la puissance de sortie de l'installation PV est due à l'indisponibilité d'une inertie au niveau des installations PV (Machine statique), ce qui entraîne la correspondance en forme des courbes.

Les systèmes de compensation sont utilisés aussi bien pour éviter l'injection des perturbations au réseau que pour protéger les sources sensibles face aux perturbations présentes sur le réseau. Ces perturbations sont dus à l'intermittence de la source primaire et n'en pas à la configuration de la centrale. L'intermittence de la source primaire n'influe pas sur la stabilité de la puissance globale du réseau mais provoque des perturbations de la production PV qui sont compensés par la production des turbogénérateurs (Stabilité de la fréquence 50 Hz).

Conclusion générale

La production de l'électricité en base des centrales PV à grande échelle est prometteuse en raison de sa propreté et sa caractéristique respectueuse de l'environnement, à noter un certain nombre d'effets indésirables sur les systèmes électriques, en particulier la stabilité du système

Pour dépasser ces limitations, il faut faire appel à des solutions à la fois matérielles et algorithmiques. C'est-à-dire qu'il faut concevoir une architecture physique qui puisse absorber autant que ce peut ce caractère intermittent/aléatoire et par ailleurs réfléchir à des lois de contrôles/commande et de supervision (des techniques de prédiction par exemple) à même de faire dialoguer au mieux les éléments de cette architecture. Quelle architecture peut comprendre en sus des générateurs à base d'EnR, des systèmes de soutien et de réglage tels que les systèmes de stockage, de compensation, de réglage de tension, de charges pilotables et enfin, de générateurs classique. C'est ce qui est désigné dans ce mémoire sous le vocable de microréseau.

L'intérêt pour une production d'électricité qui minimise la pollution de l'environnement et qui soit plus économique conduit actuellement à une augmentation de la production décentralisée d'électricité à base de sources d'énergie renouvelables (solaire, éolien etc.). Ce type de production a toujours existé dans les réseaux de distribution, mais sa présence n'a jamais été d'une ampleur significative pour avoir un impact sur le fonctionnement du réseau. L'incertitude des prévisions de la courbe de charge et les fluctuations rapides de la puissance générée par les installations PV sont compensées par le réglage primaire, intégré dans les contrôleurs locaux des onduleurs.

Les systèmes de compensation sont utilisés aussi bien pour éviter l'injection au réseau des perturbations que pour protéger les sources sensibles face aux perturbations présentes sur le réseau.

Quel que soit la variation de la production de la centrale solaire, la continuité de l'alimentation de la demande est assurée par la production des turbogénérateurs. L'intermittence de la source solaire provoque la variation de la puissance de sortie de l'installation PV, ce qui entraîne la variation de la puissance des turbogénérateurs. La production doit être égale à la consommation et la fréquence doit être maintenue à 50 Hz.

On observe un écart entre la courbe de la production PV et la courbe résiduelle signifie que c'est la production PV qui gère la demande. Ce qui représente un gain en gaz (gaz non consommé) et de cela, un avantage environnemental et économique

Bibliographie

- [1] Lyes ABBASSEN Mr. *Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque*. Thèse de doctorat, Université Mouloud Maameri de Tizi Ouzou, 2011.
- [2] Fatima ABDO. Croissance de couches minces de silicium par épitaxie en phase liquide à basse température pour applications photovoltaïques. *Institut National des sciences appliquées de Lyon*, 2007.
- [3] Ibrahim Al-Busaidi. Economics of photovoltaic water pumping system in sultanate of oman. *Bachelor of Engineering option : Instrumentation & Control, University of Southern Queensland*, 2005.
- [4] Néji AMAIMIA and Rachid EL MOKNI. Installation et maintenance des systèmes pv. *Formation sur les systèmes photovoltaïques, Chambre syndicale nationale des énergies renouvelables*, 2011.
- [5] Mohamed Mehdi AOUI. *Etude d'impact d'intégration 2200MW photovoltaïque dans le système électrique national à l'horizon 2020*. Mémoire de magister. Université USTHB, Algérie, 2008.
- [6] Nouar AOOUN. *Etude et modélisation des différents modèles de la cellule photovoltaïque établis sur base de valeurs nominales*. Thèse de doctorat, Université de Constantine. Algérie, 2010.
- [7] Wahiba BELAID. *Analyse des pertes thermiques de l'utilisation des matériaux sélectifs des convertisseurs de l'énergie solaire*. Thèse de doctorat, Université de Tlemcen, 2014.
- [8] Mohammed BELHADJ. *Modélisation d'un Système de captage photovoltaïque Autonome*. Mémoire de magister. Option : Microélectronique-photovoltaïque, Centre Universitaire de Béchar, 2008.
- [9] Boris BERSENEFF. *Réglage de la tension dans les réseaux de distribution du futur*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2010.
- [10] Cedric CABAL. *Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2008.
- [11] Mohamed Ansoumane CAMARA. *Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par supercondensateurs*. Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2011.
- [12] Michel CAPDERDOU. *Atlas solaire de l'Algérie*. Office des publications Universitaires, 1988.

- [13] Abbes DHAKER. Intégration des énergies renouvelables aux réseaux électriques, introduction au smartgrids, mar 2015. Intégration des énergies renouvelables aux réseaux électriques.pdf.
- [14] Wassila DIB. *modélisation des structures photovoltaïques : aspects fondamentaux et appliqués*. Thèse de doctorat, Université Abou bekr Belkaid de tlemcen, 2010.
- [15] Société du groupe Sonelgaz ELIT.Spa. Sonelgaz spa. www.sonelgaz.dz, 2013. En ligne, visité le 16 mai 2017.
- [16] Société du groupe Sonelgaz ELIT.Spa. Shariket kahraba wa taket moutadjadida. www.sktm.dz, 2014. En ligne, visité le 16 mai 2017.
- [17] Xi Fang, Satyajayant Misra, Guoliang Xue, and Dejun Yang. Smart grid-the new and improved power grid : A survey. *IEEE communications surveys & tutorials*, 14(4) :944–980, 2012.
- [18] le cabinet Fractal. *Enjeux relatifs au raccordement des installations photovoltaïques aux réseaux publics de distribution*. Le Syndicat des énergies renouvelables, 2010.
- [19] Touhami GHITAOUI. Etude de caractérisation expérimentale des cellules photovoltaïques organiques à base de polythiophène et de polyaniline dopés p. *Mémoire de Magister option : Composant et système de la microélectronique microélectronique avancée, Universitaire d'Oran Mohamed BOUDIAF*, 2012.
- [20] A Buyer's Guide. *Les systèmes photovoltaïques*. Ressources naturelles Canada, 2003.
- [21] Charaf Eddine HAMADA and Med Nadjib MECHALIKH. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau. *Mémoire de Mastère, Université KASDI Merbah, Ouargla, Algérie*, 2012.
- [22] Hristiyan KANCHEV. *Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable : Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain*. Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2014.
- [23] Akio Kitamura. Demonstration test results for grid interconnected photovoltaic power systems. *Report IEA-PVPS T5-02 : 1999, 1999*.
- [24] Mertens KONRAD. *Photovoltaics : Fundamentals, Technology and Practice*. John Wiley & Sons, 2013.
- [25] M KOUSSA, M HADDADI, and A MALEK. Reconstitution des irradiations globale et diffuse en fonction de quelques paramètres météorologiques pour un ciel quelconque. *Revue des énergies renouvelables*, 10(1) :75–92, 2007.
- [26] Michel LABOURET, Anne & VILLOZ. *Energie solaire photovoltaïque-4ème édition*. Dunod, 2009.
- [27] Rachid LAROUI. *Modélisation Et Simulation D'un Système Multi-Source Photovoltaïque-Eolien-Diesel Dans La Région d'Adrar*. Thèse de doctorat, Université Ahmed Draya Adrar, 2015.

- [28] Etudes Scientifiques Prénormatives Sur Le. Raccordement des installations photovoltaïques au réseau public de distribution électrique à basse tension. 2010.
- [29] Mohamed Lakhdar LOUAZENE. *Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla*. Thèse de doctorat, Université de Batna 2, 2008.
- [30] Abdelhak MAOUCHA. *Etude et Identification paramétrique d'une cellule photovoltaïque organique*. Thèse de doctorat, Université de Batna 2, 2011.
- [31] Rachid MAOUEDJ. Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de tlemcen et de bouzareah. *Mémoire de magistère, Université de Tlemcen, Algérie*, 2005.
- [32] Gilles Notton, Ionut Caluianu, Iolanda Colda, and Sorin Caluianu. Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin. *Revue des Energies Renouvelables*, 13(1) :49–62, 2010.
- [33] Yann PANKOW. Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. application au générateur photovoltaïque. *National School Superior of Art and Trades, Lille*, 2004.
- [34] JJ PIREAUX. Physique et énergie travail sur les panneaux photovoltaïques. *Facultés Universitaires Notre-Dame de la Paix, Namur—Année académique*, 2007, 2006.
- [35] A RICAUD. *Gisement solaire et transferts énergétiques*. Mémoire de master. Option : Energies renouvelables, Université de Cergy-Pontoise, 2011.
- [36] Société de distribution en électricité et du gaz à l'ouest SDO. *Philosophie de réglage des protections à SDO*. Groupe Sonelgaz, 2008.
- [37] W Sinsukthavorn, E Ortjohann, M Lingemann, S Jaloudi, N Hamsic, A Schmelter, and D Morton. Recycling conventional control strategy and hierarchy for future dg control. In *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on*, pages 2266–2271. IEEE, 2010.
- [38] Solar Media Limited SM.Ltd. Pv tech. www.pv-tech.org, 2010. En ligne, visité le 15 mai 2017.
- [39] Assistante du PDG Chargée des Relations avec les Médias Sonlegaz. *Rapport annuel et comptes de gestion consolidés du Groupe Sonelgaz*. Groupe Sonelgaz, 2015.
- [40] Laconde THIBAUT. Energie et développement. energie-developpement.blogspot.com, 2011. En ligne, visité le 10 mai 2017.
- [41] Dave Turcotte, Michael Ross, and Farah Sheriff. Photovoltaic hybrid system sizing and simulation tools : status and needs. In *PV Horizon : Workshop on Photovoltaic hybrid systems*, pages 1–10, 2001.
- [42] Mathieu URIEN. *Cellules photovoltaïques organiques à base copolymères à blocs de type rigide-flexible*. Thèse de doctorat, Université BORDEAUX I, 2008.
- [43] Ionel VECHIU. *Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome*. Thèse de doctorat, Université du Havre, 2005.

Annexes

Annexe A. Sociétés du Groupe SONELGAZ

TABLE A.1 – Sociétés du Groupe SONELGAZ [39]

Société algérienne de l'électricité et du gaz (Sonelgaz)	
Sociétés du Pole des Industries Energétiques	<ul style="list-style-type: none"> — Société algérienne de production de l'électricité (SPE) — Sharikat kahraba oua takat moutadjadida (SKTM) — Société algérienne de gestion du réseau de transport de l'électricité (GRTE) — Société algérienne de gestion du réseau de transport du gaz (GRTG) — Opérateur système électrique (OS) — Compagnie d'engineering de l'électricité et du gaz (CEEG) — Société de distribution de l'électricité et du gaz d'Alger (SDA) — Société de distribution de l'électricité et du gaz du Centre (SDC) — Société de distribution de l'électricité et du gaz de l'Est (SDE) — Société de distribution de l'électricité et du gaz de l'Ouest (SDO) — Sharikat kahraba Skikda (SKS) — Sharikat kahraba Berrouaghia (SKB) — Sharikat kahraba Koudiet eddraouch (SKD) — Sharikat kahraba Terga (SKT)
Sociétés des Activités Industrielles, Travaux et Services	<ul style="list-style-type: none"> — Appareils de mesure et de contrôle (AMC) — Rouiba éclairage (entreprise de fabrication et de commercialisation de matériels d'éclairage publique) — Société de maintenance des équipements industriels (MEI) — Comptoir algérien du matériel électrique et gazier (CAMEG) — Sharikat khadamat mouhaouilet kahrabaia (SKMK) — General electric Algeria turbines (GEAT) — Hyunson engineering and construction (HYENCO) — Société de montage industriel (ETTERKIB) — Société de réalisation d'infrastructures (INERGA) — Société de réalisation de canalisations (LANAGHAZ) — Société de travaux d'électrification (KAHRIF) — Société de travaux et montage électrique (KAHRAKIB) — Société du patrimoine immobilier des industries électriques et gazières (SOPIEG) — Société et transport et de manutention exceptionnels des équipements industriels et électriques (TRANSMEX) — Société algérienne des techniques d'information (SATINFO)

	<ul style="list-style-type: none"> — Société de medecine du travail des industries électriques et gazières (SMT) — Fonds des œuvres sociales et culturelles des travailleurs des industries électriques et gazières (FOSC) — Société de maintenance et prestations véhicules (MPV) — Hotel le mas des planteurs (HMP) — Institut de formation en électricité et gaz (IFEG) — El djazair information technologie (ELIT) — Centre de recherche et de développement de l'électricité et de gaz (CREDEG).
Sociétés du Pole des Activités de Sureté Interne	<ul style="list-style-type: none"> — Sharikat wikaya oua amn mounchaat talouia (SWAT) — Sharikat amn oua riayat el mounchaat takouia (SAR) — Sharikat amn el mounchaate el takouia (SAT) — Sharikat el amne wa el himaya (SAH)
Sociétés en participation	<ul style="list-style-type: none"> — Algerian energy company (AEC) — Tahliyat miyah bahr taref (TMBT) — Algerian operating maintenance company (AOM) — Sharikat kahraba hadjret ennous (SKH) — Algerian engineering service company (ALGESCO) — Bulletin des appels d'offres du secteur de l'énergie et des mines (BAOSEM) — Algerian energy telecom company (Ex AETC)

Annexe B. Méthodes de détection d'ilotage

TABLE B.1 – Méthodes de détection d'ilotage [33]

	Méthodes Internes					
	Méthodes passives			Méthodes actives		
	U/OVP U/OFD	THD	PJD		SMS	SFS
	Protection à seuils de tension et fréquence (Under/Over Voltage Protection and Under/Over Frequency Protection)	Détection harmoniques (Total Harmonic D)	Détection de saut de vecteur (de phase) (Phase Jump Detection)	Mesure d'impédance	Décalage de fréquence en mode glissant (Slide-Mode Frequency Shift)	Méthode « Sandia » de glissement de fréquence (Sandia Frequency Shift)
Avantages	Faible cout, utilisable pour une autre application	Performante en théorie	Implantation facile, aucune dégradation de la puissance	ZND presque nulle	ZND petite	ZND infime
Inconvénients	ZND importante	Seuil difficilement paramétrable	Fiabilité du seuil de détection	Inefficace avec plusieurs onduleurs, Charge locale à impédance fiable	Diminution de la qualité de la puissance, impossibilité de déstabilisation pour certaine charge RLC	Problème lors de haut niveau de pénétration

ZND (Zone de non détection)	P et Q nulle	Faible THD d'onduleur	Phase de charge locale > à la valeur seuil	Presque nulle	Petite	Infime
	Méthodes Externes					
	Méthodes au niveau de réseau					
	Méthode de communication, PLCC			SCADA		
	Envoi de signal de présence du réseau à travers la ligne électrique Envoi de signal de déconnexion (Trip Signal)			Système de télésurveillance et acquisition de données (Supervisory Control And Data Acquisition)		
Avantages	Pas de ZND, pas de dégradation de la puissance, permet un haut niveau de pénétration, utilisation de signaux existants			Contrôle total du générateur		
Inconvénients	Transmetteur capable d'envoyer un signal à tous les onduleurs, le prix			Limité au petit réseau, nécessité de personnel		
ZND	Nulle			Faible		

Annexe C. Fiche technique de la centrale solaire d'Adrar (SKTM)

I. Caractéristiques de l'installation

Emplacement : 10 *km* du centre-ville de la wilaya d'Adrar

X : 763 626 M

Y : 3 088 805 M

Surface de la centrale : 40 hectares

Constructeur : YSH (Yingly Solar/Sinohydro/Hydro China)

Date de mise en service : le 12/10/2015

II. Caractéristiques techniques de la centrale PV

Nombre de panneaux PV : 81840

Marque des panneaux : YINGLI SOLAR

Référence des panneaux : YL245P-29b

Nombre de sous-champs : 20

Nombre de matrices : 93 (44 panneaux pour chaque matrice)

Nombre d'onduleurs : 40

Marque de l'onduleur : SUNGROW

Référence de l'onduleur : SG500MX

Orientation : 0° / Vers le Sud

Inclinaison : 27° / à l'horizontale

Puissance totale installée : 20 000 *Wc*

Energie produite estimée : 120 000 *kWh/jour*

Productivité moyenne annuelle : 43 200 000 000 *Wh*

Coût du kilowattheure : Pas officiel

Coût total de la centrale : 37.534.489,79 USD

Option de vente choisie ou prévue : Vente de la totalité de la production

Annexe D. Dimensionnement du générateur photovoltaïque

Pour le dimensionnement du champ de panneaux, deux équations sont nécessaires :

Equation (1) : Relation entre le gisement solaire et le nombre d'heures équivalent

$$N_e = \frac{E_{sol}}{1000} \quad (D.1)$$

N_e : nombre d'heures équivalent en h/j

E_{sol} : gisement solaire en Wh/(m²j)

1000 : ensoleillement optimum de 1000 W/m²

Equation (2) : Relation entre la demande énergétique et la puissance crête

$$P_c = \frac{E_{elec}}{N_e} \quad (D.2)$$

E_{elec} : demande énergétique journalière en Wh/j

N_e : nombre d'heure en h/j

P_c : puissance crête en Wc Par la combinaison de D.1 et D.2 on obtient la puissance des panneaux (puissance crête)

$$P_c = \frac{E_{elec}}{E_{sol}} \cdot 1000 \quad (D.3)$$

Concernant la demande énergétique on utilise le pire cas c'est-à-dire la demande maximal. Ensuite on peut ajouter les pertes (pertes dans le système photovoltaïque et pertes de l'onduleur si ce n'est pas déjà pris en compte).

Equation (3) : Puissance crête avec pertes

$$P_{c_{finale}} = \frac{P_c}{C_p \cdot C_{cond}} \quad (D.4)$$

$P_{c_{finale}}$: Puissance crête finale en tenant compte des pertes en Wc

P_c : Puissance crête avant pertes en Wc

C_p : Efficacité de l'onduleur en décimale

C_{cond} : Coefficient associé aux pertes de courant de sources variées

Si le système est bien dimensionné en tension (modules avec une tension suffisante pour pallier aux pertes en tension), les pertes se résument aux salissures et à l'efficacité de la batterie. Le C_p varie généralement entre 0,65 et 0,9.

Résumé

Les sources d'énergie renouvelable peuvent jouer un rôle principal pour satisfaire une grande partie des besoins énergétiques de l'humanité. L'énergie solaire ne souffre pas de problème de gisement, elle est disponible partout sur notre planète pour cela la production de l'électricité en base des centrales PV à grande échelle est prometteuse. Mais malgré tous les avantages économiques et environnementaux que possède la production photovoltaïque, cette génération pourrait conduire à un impact potentiellement négatif sur le bon fonctionnement d'un système électrique dû, d'un côté, à son inertie nulle ce qui lui rend facilement affectés par les changements climatiques et l'intermittence de la source primaire.

Dans ce travail nous avons fait l'étude de l'impact de l'injection de la production de la centrale solaire d'Adrar SKTM sur le système électrique de deux journées typiques 12 et 13/02/2017. L'injection de la puissance PV au réseau commence dès l'aube et prend une valeur maximale environ 13h qui correspond au pic de la courbe de l'éclairement, après cette heure on remarque une déclinaison jusqu'à atteindre le seuil de déclenchement vers le coucher du soleil. Et cela est le cas pour les deux journées typiques.

Puisque La puissance active augmente proportionnellement avec l'éclairement et décroît aussi avec ce dernier pour s'annuler au coucher du soleil et vu l'intermittence de la source primaire des sources renouvelables, il est toujours nécessaire d'harmoniser la production PV (source renouvelable) avec les sources classiques. C'est la production des turbogénérateurs qui assure la demande. Les turbogénérateurs compensent les perturbations de la production durant la journée. Et prennent en charge la demande dès le seuil de déclenchement de la production PV jusqu'au seuil d'harmonisation (l'aube). Les systèmes de compensation sont utilisés aussi bien pour éviter l'injection des perturbations au réseau que pour protéger les sources sensibles face aux perturbations présentes sur le réseau