



République Algérienne Démocratique Et Populaire
Ministre De L'enseignement Supérieur Et De La
Recherche Scientifique

Université Saâd Dahlab, Blida-1

Faculté de Technologie

Département des Énergies Renouvelables

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme :

MASTER en Énergies Renouvelables

Option : Conversion Photovoltaïque

Thème :

Etude de l'impact de l'injection de 20 MW d'énergie solaire photovoltaïque dans un réseau électrique conventionnel du sud.

Présenté par :

LOUNICI Nadia

HAMOUR Tiziri

Soutenu le 28/10/2020 devant le jury :

Mr DOUMAZ Toufik	MAA	U.S.D.B1	Président
Dr BOUKENOUI Rachid	MCB	U.S.D.B1	Examineur
Dr GUENOUNOU Abderrezak	MCB	U.S.D.B1	Promoteur

2019/2020

ملخص

الهدف من هذا العمل هو إجراء دراسة كاملة حول تأثير دمج الطاقة الشمسية الكهروضوئية في الشبكة الوطنية لشركة Sonelgaz من خلال معالجة مثال محطة الطاقة الكهروضوئية بقدرة 20 ميغاوات في أدرار. بعد عرض تقديمي لمعدات المحطة، تمت محاكاة تشغيلها في بيئة Matlab / Simulink / Sim-power من أجل مراقبة سلوكها من خلال تصور إشارات الإخراج المختلفة. ثم تم إجراء دراسة تقنية اقتصادية مفصلة باستخدام برنامج RETScreen Expert من أجل تحليل تأثير هذا النوع من المشاريع من حيث الجدوى المالية ولكن أيضًا فيما يتعلق بمساهمته في الحد من انبعاثات الغاز. تأثير الاحتباس الحراري (GHG) والحد من استخدام مصادر الطاقة الأحفورية مثل البترول.

الكلمات المفتاحية: إنتاج الكهرباء ، مصنع الكهروضوئية، غازات الاحتباس الحراري، Matlab ، RETScreen Expert , ...

Résumé

L'objectif de ce travail est de faire une étude complète sur l'impact de l'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque dans le réseau national de Sonelgaz en traitant l'exemple de la centrale PV de 20 MW d'Adrar. Après une présentation des équipements de la centrale, son fonctionnement a été simulé dans l'environnement Matlab/Simulink/Sim-power afin d'observer son comportement en visualisant les différents signaux de sortie. Une étude technico-économique détaillée a été ensuite réalisée à l'aide du logiciel RETScreen Expert afin d'analyser l'impact de ce type de projet en termes de viabilité financière mais aussi en ce qui concerne sa contribution à la réduction des émissions de gaz à effet serre (GES) et la limitation de l'utilisation des sources d'énergie fossiles telle que le pétrole.

Mots clés : Production d'électricité, Centrale PV, faisabilité, GES, Matlab, RETScreen Expert, ...

Abstract

The objective of this work is to make a complete study on the impact of the integration of photovoltaic solar energy in the national power grid of Sonelgaz by treating the example of the 20 MW PV plant in Adrar. After presenting the plant's equipment, its operation was simulated in the Matlab / Simulink / Sim-power environment in purpose of observing its behavior by visualizing the different output signals. A detailed techno-economic study was then carried out using the RETScreen Expert software in order to analyze the impact of this type of project in terms of financial viability but also with regard to its contribution to the reduction of gas emissions. Greenhouse effect (GHE) and limiting the use of fossil energy sources such as petroleum.

Keywords: Electricity production, PV plant, GHE, feasibility, Matlab, RETScreen Expert,

REMERCEMENT

Pour son amour et sa protection, pour la chance et le bonheur qu'il nous offre, pour le bien vers lequel il nous guide, pour sa présence lors que tout le monde est absent, pour le courage, la patience et la foi qu'il nous donne pour mener à bien ce modeste projet malgré les obstacles.

*Merci au plus puissant **Allah**.*

*Au terme de notre projet, nous tenons à remercier tous ceux qui ont Contribué de près ou de loin à sa réalisation, particulièrement : Dr **GUENOUNOU Abderrezak** : notre promoteur, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, ses orientations et remarques fructueuses, ses efforts déployés, qu'il trouve ici notre profonde gratitude.*

*Nous remerciment vont également à Mr **MAIZ HADJ AHMAD** Bachir, chef de projet à SKTM, ainsi que toute l'équipe de centrale PV d'Adrar, pour avoir accepté d'assurer la collaboration de ce PFE en fournissant les informations nécessaires pour son aboutissement.*

*Au président Mr **DOUMAZ Toufik** et aux membres du jury : pour avoir accepté de juger ce Modeste travail, merci à vous également.*

Nous tenons également à remercier, l'ensemble des enseignants et les administrateurs du Département des énergies renouvelable.

DEDICACE

Je dédie ce travail à :

A Mes très chers Parents, leur amour, leur sacrifice, leur compréhension et leur patience envers moi. Je ne saurais jamais comment exprimer mes sentiments pour avoir veillé sur mon éducation, pour leur soutien moral et matériel, jamais

A mon binôme : LOUNICI NADIA et sa famille

A Mes chers sœur : SOUAD, LAMIA, SARAH A Mes très chères oncles et tantes

A toute la grande famille,

A tous mes chers amis : SOULEF, HANANE, DHIKRA A ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

H.TIZIRI

DEDICACE

A mes chers parents

A toute ma famille

A tous ceux que j'aime et qui m'aiment

Je dédie ce modeste travail

L.NADIA

Chapitre 1

Figure 1.1. Variation de la production d'électricité mondiale entre 1990 et 2017.....	4
Figure 1.2. Production d'électricité projetée dans le monde de 2018 à 2050, par source d'énergie (en billions de kilowattheures).....	4
Figure 1.3. Production mondiale en électricité d'origine renouvelable par Giga watts.....	5
Figure 1.4. Parts des différents producteurs d'électricité en Algérie.....	7
Figure 1.5. Etapes du programme national des énergies renouvelables 2015/2030.....	11

Chapitre 2

Figure 2.1. Spectre du rayonnement solaire.....	15
Figure 2.3. Principe de fonctionnement d'une cellule PV (effet Photovoltaïque).....	16
Figure 2.3. Caractéristiques I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque.....	16
Figure 2.4. Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire.....	17
Figure 2.2.5. Effet de la température sur la caractéristique I(V).....	20
Figure 2.6. Effet de la température sur la caractéristique P(V).....	20
Figure 2.7. Courbes I(V) pour divers ensoleillements à T=25°C.....	21
Figure 2.8. Courbe P(V) pour divers ensoleillements à T=25°C.....	21
Figure 2.9. Structure d'une maison alimentée par le PV (site isolé).....	22
Figure 2.10. Schémas de base des deux types raccordements d'un système PV totalement raccordé au réseau.....	24
Figure 2.11. Configuration d'un système PV connecté au réseau avec injection du surplus.....	24
Figure 2.12. Carte du gisement solaire en Algérie.....	25

chapitre3

Figure 3.1. Creux et coupure de tension.....	31
Figure 3.2. Exemple d'une fluctuation de tension.....	32
Figure 3.3. Exemple d'une fluctuation de la fréquence.....	32
Figure 3.4. Exemple de déséquilibre du système triphasé.....	33
Figure 3.5. Harmonique et inter-harmonique.....	33

Figure 3.6. Plan masse de la centrale.....	34
Figure 3.7. Schéma de la centrale de production.....	35
Figure 3.8. Châssis au sol.....	36
Figure 3.9. Disposition de l'onduleur dans le shelter.....	37
Figure 3.10. Shelter des onduleurs.....	38
Figure 3.11. Local du transformateur.....	39
Figure 3.12. Boite de jonction.....	40
Figure 3.13. Boite parallèle.....	40
Figure 3.14. Schéma de la cellule MT de la centrale d'Adrar.....	42
Figure 3.16. Equipement de nettoyage.....	43
Figure 3.17. Simulation des caractéristiques IV et PV d'un champ PV sous Simulink.....	45
Figure 3.18. Schéma du système complet sous Simulink.....	45
Figure 3.19. Caractéristiques I(v) du champ PV pour une variation de l'éclairement.....	46
Figure 3.20. Caractéristiques P(v) du champ PV pour une variation de l'éclairement.....	46
Figure 3. 21. Caractéristiques statiques I(v) lors d'une variation de la température ambiante.....	47
Figure 3.22 Caractéristiques statiques P(v) lors d'une variation de la température ambiante.....	47
Figure 3.21. La puissance moyenne à 25°C et irradiation de 1000W/m2.....	48
Figure 3.21. La puissance moyenne à 25°C et irradiation variable.....	48
Figure 3.22.les tension à la sortie de l'onduleur.....	49
Figure 3.23 les courants à la sortie de l'onduleur.....	49
Figure 3.24. La puissance réactive à injecté au réseau.....	49

Chapitre 4

Figure 4.1. Les axes d'analyse d'énergie renouvelable par RETScreen.....	54
Figure 4.2. Les données climatiques du site.....	54

Figure 4.3. L'équivalent de la réduction annuelle nette d'émissions de GES de cas proposé en barils brut de pétrole.....	55
Figure 4.4. Comparaison des émissions de GES entre le cas de référence et le cas proposé.....	56
Figure 4.5. L'impact des paramètres clés de la centrale sur le retour d'investissement...	59
Figure 4.6. Flux monétaire annuel.....	61
Figure 4.7. Flux monétaire cumulatif.....	62

Chapitre 1

Tableau 1.1. La génération de l'énergie électrique par type d'équipement entre 1980/2017.....	6
Tableau 1.2. Les Ventes des clients et leurs nombre en 2017.....	9
Tableau 1.3. Les différentes centrales installées par SKTM.....	12

Chapitre 3

Tableau 3.1. Domaine des tensions du réseau national.....	30
Tableau 3.2. Caractéristique des modules PV de la centrale.....	36
Tableau 3.3. Caractéristiques de l'onduleur	37
Tableau 3.4. Caractéristique de transformateur de puissance principale.....	39
Tableau 3.5. Caractéristique de la boite parallèle et la boite de jonction.....	41

Chapitre 4

Le tableau 4.1. Données météorologiques calculées par le logiciel Retscreen du site d'étude.....	54
Tableau 4.2. Données générales des équipements de l'installation.	54
Tableau 4.3. Données du cas de référence et résultats du cas proposé.....	56
Tableau 4.4. Cout, économie, revenue.....	57
Tableau 4.5. L'impact des paramètres techniques et financiers sur une plage de 25 %.....	59

Résumé	
Remerciement	
Dédicace	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 Généralités sur la production d'électricité.....	3
1.1. Introduction.....	3
1.2. Production d'électricité dans le monde.....	3
1.2.1. Production d'électricité dans le monde pour l'année 2017.....	3
1.2.2. Perspectives 2018/2050.....	4
1.2.3. Les dominants de production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde.....	5
1.3. L'électricité en Algérie.....	5
1.3.1. Production d'électricité.....	6
1.3.2. Evolution de la puissance maximale appelée (PMA).....	7
a. Le réseau interconnecté du nord « R.I.N ».....	7
b. Pôle In Salah-Adrar- Timimoune « PIAT ».....	7
c. Les Réseaux Isolés du Sud « RIS ».....	8
1.3.3. Transport de l'électricité.....	8
1.3.4. Distribution d'électricité.....	8
1.3.5. Consommation.....	9
1.4. Intégration des énergies Renouvelables en Algérie.....	9
1.4.1. Le programme national des énergies renouvelables.....	10
1.4.2. Le plan de développement des investissements dans les énergies renouvelables	12
1.5. Conclusion.....	12
Chapitre 2 : Le photovoltaïque.....	14

2.1	Introduction.....	14
2.2.	Energies solaires Photovoltaïques.....	14
2.2.1.	L'éclairage solaire.....	14
2.2.2.	Effet et cellule photovoltaïques.....	15
	Les caractéristiques de la cellule PV.....	16
	Modèle mathématique et schéma électrique équivalent.....	16
	Paramètres électriques.....	18
2.2.3.	Générateur photovoltaïque.....	19
2.2.4.	Paramètres externes.....	19
2.3.	Les différents types des systèmes photovoltaïques.....	21
2.3.1.	Système autonome dans un site Isolé.....	22
2.3.2.	Les installations raccordées au réseau de distribution public.....	23
2.4.	Potentiel de l'Algérie.....	25
2.5.	Conclusion.....	26
	Chapitre 3 : La centrale solaire PV d'Adrar Description et simulation.....	29
3.1.	Introduction.....	28
3.2.	Le réseau électrique national algérien (SONELGAZ).....	28
3.2.1.	SONELGAZ.....	28
3.2.2.	SKTM.....	29
3.2.3.	Le réseau électrique national	29
3.2.4.	Perturbations des réseaux électriques.....	30
a.	Creux et coupure de tension.....	31
b.	Variations et fluctuation de tension.....	31
c.	Fluctuation de la fréquence.....	32
d.	Déséquilibre en tension du système triphasé	32
e.	Harmoniques et inter-harmoniques.....	33

3.3. Etude de raccordement de la centrale PV de 20MWc d'Adrar sur le réseau de distribution 30KV.....	34
3.3.1. La centrale photovoltaïque d'Adrar.....	34
3.3.2. Les composants de la centrale.....	35
3.3.3 Raccordement de la centrale au réseau.....	43
3.4. Simulation du fonctionnement de la centrale PV sous Matlab/Simulink.....	44
3.4.1. Modélisation du champ PV.....	44
3.4.2. Simulation.....	45
3.5. Conclusion.....	50
Chapitre 4 Etude technico-économique de la centrale d'Adrar.....	51
4.1. Introduction.....	52
4.2. Présentation du logiciel Retscreen.....	52
4.3. Etude technico-économique.....	54
4.3.1. Analyse technique.....	54
4.3.1.1. Région et ses paramètres.....	54
4.3.1.2. Les paramètres techniques de la centrale électrique.....	54
4.3.2. Analyse environnementale (Emission à effet de serre).....	55
4.3.3. Analyse financière.....	57
4.3.3.1. Paramètres financiers.....	57
4.3.3.2. Cout, économie et revenus.....	57
4.3.3.3. Sensibilité et risque.....	58
4.3.3.4. Flux monétaire.....	60
4.4. Conclusion.....	62
Conclusion générale.....	62
Références.....	6

SYMBOLE ET ABREVIATION

PV :	Photovoltaïque.
GES :	Gaz à effet d serre
MPPT :	Suiveur du Point de fonctionnement optimal.
DC= CC :	Courant Continu.
AC=CA:	Courant alternatif.
SKTM:	Shariket kahrabaa oua takat moutajadida.
RIN :	Réseau interconnecté
RIS :	Réseau isolé du sud
PIAT:	Pole in saleh-adrar-timimoun
PNR :	Projet national de recherche.
HTA/HTB :	Haut tension classe A et classe B.
BTA/BTB :	Basse tension classe A et classe B.
Wc :	Watt crée
(λ) :	Ensoleillement dans le plan des panneaux (W/m ²)
(Tc) :	Température de jonction des cellules (°C)
(I _{pv}):	Courant fourni par le groupe de panneaux (A)
(V _{pv}):	Tension aux bornes du groupe (V)
(IPH) :	Courant photoélectrique (A).
(ISH) :	Courant passant dans la résistance shunt (A).
(ISC) :	Courant de court-circuit à 25°C et 1000 W/m ²
(Tref) :	Température de référence des panneaux(°C)
(IRS) :	Courant de saturation (A)
(A) :	Facteur d'idéalité de la jonction
(EG):	L'énergie de gap
R _p :	La résistance parallèle.
R _s :	La résistance série.

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie est l'un des moteurs de développement des nations et des sociétés. La civilisation industrielle s'est bâtie autour de l'exploitation du charbon à la fin du 18^e siècle, puis sur l'intérêt des réserves pétrolières au milieu du 20^e siècle, et depuis la consommation de l'énergétique est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. Face à une demande croissante d'énergie et à l'épuisement plus ou moins à long terme en particulier les énergies fossiles, la crise pétrolière de 1973 a accéléré la décision de certains pays à mener une politique orientée vers le nucléaire.

Sachant que les sources d'énergie fossiles (comme le pétrole) contribuent à un changement global du climat, favorisent la constitution des pluies acides et la pollution de notre planète. Les organisations mondiales pour la protection de l'environnement signalent que la concentration de CO₂ a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et elle doublera aux environs de 2050. D'ici la fin du 21^{ème} siècle, on s'attend à une augmentation d'environ 1 à 3,5 degrés Celsius de la température moyenne de la surface du globe par rapport à 1990 ce qui augmentera le taux de réchauffement de la planète [1].

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables. Elles sont issues des éléments naturels : le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, qui n'engendrent pas ou peu de déchets ou d'émissions polluantes, participent à la lutte contre l'effet de serre et les rejets de CO₂ dans l'atmosphère, facilitent la gestion raisonnée des ressources locales. Ce sont les énergies de l'avenir. Mais elles sont encore sous-exploitées par rapport à leur potentiel puisque ces énergies renouvelables ne couvrent que 20 % de la consommation mondiale d'électricité.

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. Raccorder 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.

Notre projet de fin d'étude (PFE) présenté dans ce mémoire concerne l'étude complète de l'impact de l'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque dans le réseau national de SONELGAZ. Nous traiterons notamment l'exemple de la centrale PV de 20 MW d'Adrar. C'est une centrale réalisée et gérée par la SKTM, une filiale du groupe SONELGAZ. Ce PFE

est justement le fruit d'une collaboration entre notre département et SKTM, représentée par Mr MAIZ HADJ AHMED Bachir, ingénieur et chef de projet.

Ce travail est partagé en quatre chapitres :

Au premier chapitre nous donnerons des généralités sur la production de l'électricité, en Algérie et dans le monde entier, à partir de source renouvelables et non-renouvelables.

Le second chapitre est consacré à la présentation des principales notions qui permettront à lecteur non initié de se familiariser avec l'énergie solaire photovoltaïque. Cette énergie, qui a fait l'objet d'un immense développement ces dernières années, représentera une part importante de notre future énergétique mixte [2], [3],

Au troisième chapitre, après une présentation des équipements et de la configuration finale de la centrale PV objet d'étude, son fonctionnement a été simulé dans l'environnement Matlab/Simulink/Sim-power afin d'observer son comportement en visualisant les différents signaux de sortie.

Enfin, dans le chapitre 4, nous présenterons une étude technico-économique détaillée réalisée à l'aide du logiciel RETScreen Expert afin d'analyser l'impact de ce type de projet sur le réseau électrique en termes de viabilité financière, mais aussi sur l'environnement en ce qui concerne sa contribution à la réduction des émissions de gaz à effet serre (GES) et la limitation de l'utilisation des sources d'énergie fossiles telle que le pétrole.

Chapitre 1

Généralités sur la production d'électricité

1.1. Introduction

La production de l'énergie électrique consiste en la transformation de l'ensemble des énergies convertibles (on parle d'énergies « primaires ») en énergie électrique. De façon prépondérante, la production se fait à partir du pétrole, du charbon, du gaz naturel, de réactions nucléaires, du vent ou de la force hydraulique. En réalité, quelques sources d'énergie supplémentaires et renouvelables, telles l'énergie solaire, la biomasse, la géothermie, etc., existent, et représentent aujourd'hui une part très faible mais croissante de la production mondiale. Si les sources d'énergies sont assez diversifiées, il est aujourd'hui très net que leur répartition est souvent très inégale et dépend principalement de critères et de choix économiques et politiques.

1.2. Production d'électricité dans le monde

L'électricité est un facteur essentiel de développement économique, dans tous les pays du monde. Son importance relative s'accroît avec les progrès technique, l'industrialisation et le besoin de confort moderne. L'augmentation de sa production est synonyme d'amélioration de la qualité de vie et de création de richesse.

1.2.1. Production d'électricité dans le monde pour l'année 2017

Alors que la société mondiale évolue vers de nouvelles sources d'énergie alternatives, les combustibles fossiles conventionnels restent une part importante de la production d'électricité. En 2017, le charbon, la tourbe et les schistes bitumineux représentaient 38,5% de la production d'électricité, loin devant les 8 % des énergies renouvelables non hydroélectriques et des sources de déchets. La figure 1.2 représente les statistiques de la production mondiale d'électricité entre 1990 et 2017. On remarque qu'en 2017, environ 25,7 péta watt heures d'électricité ont été générés dans le monde [4].

Hormis l'énergie solaire photovoltaïque qui transforme l'énergie solaire directement en électricité (objet du chapitre 2), toutes les productions utilisant les autres sources d'énergie (solaire thermique, énergie éolienne, hydroélectricité, combustibles fossiles, fission ou fusion nucléaires, ...) sont basées sur le principe turbine – alternateur, donc la loi de Faraday [5].

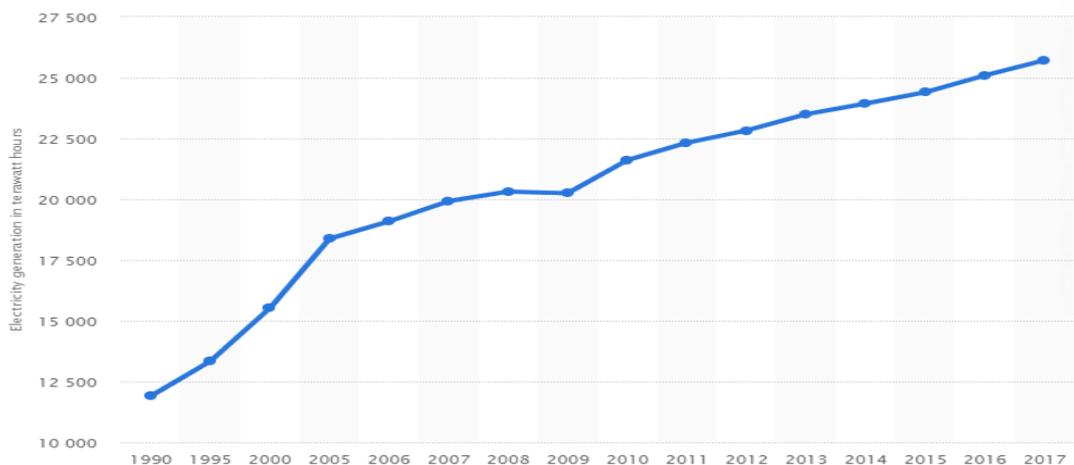


Figure 1.1. Variation de la production d'électricité mondiale entre 1990 et 2017.

1.2.2. Perspectives 2018/2050

On prévoit que l'électricité produite par la plupart des sources d'énergie dans le monde, à l'exception des liquides, augmentera dans les années à venir. L'électricité produite à partir de sources renouvelables devrait connaître la plus forte croissance de 21,66 milliards de kilowattheures en 2050, elle a atteint près de 7 milliards de kilowattheures en 2018. Cette projection voit une consommation accrue de toutes les sources de carburant, sauf pour le charbon, où la demande semble s'être stabilisée. Les sources conventionnelles, comme le charbon, sont de plus en plus remplacées par le gaz naturel, les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire (cf : figure 1.2) [6].

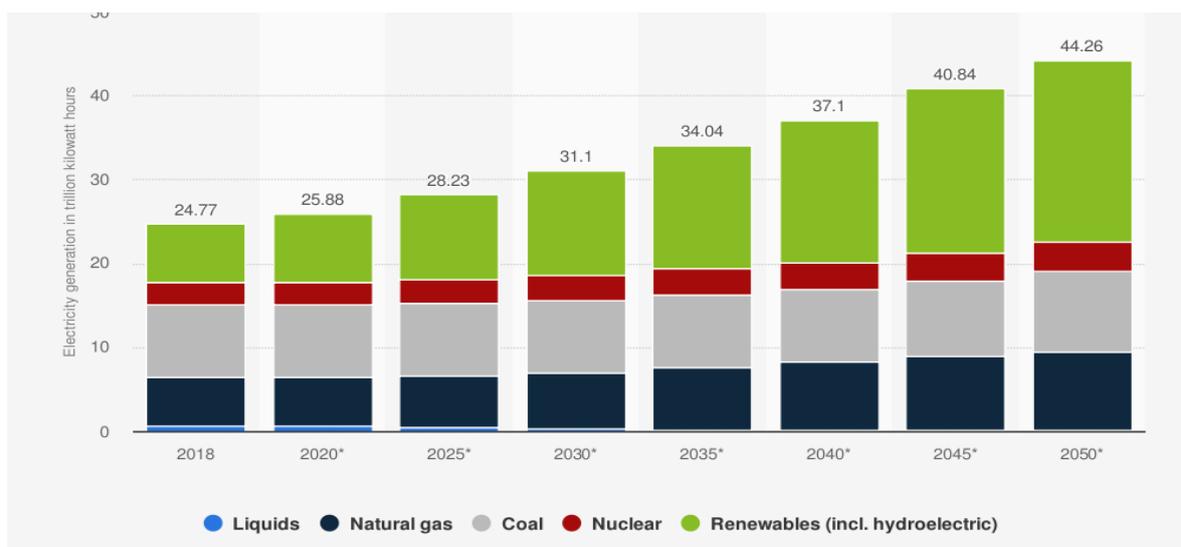


Figure 1.2. Production d'électricité projetée dans le monde de 2018 à 2050, par source d'énergie (en milliards de kilowattheures).

1.2.3. Les dominants de production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde :

Selon l'institut allemand Fraunhofer, la capacité totale installée dans le monde a atteint 242 GW à la fin de 2015, qui a été une année record. Elle était de 134 GW en 2013 et de 178 GW en 2014, ce qui confirme une croissance soutenue du photovoltaïque (elle a été en moyenne annuelle de 42 % entre 2000 et 2015).

La croissance européenne ralentit : sa part était de 48 % en 2014. Fin 2015, l'Europe reste la zone mondiale la plus équipée en solaire photovoltaïque avec une capacité installée représentant 40 % du total mondial. L'Allemagne compte pour 16 % et est désormais devancée par la Chine (21 %). Le Japon vient en 3^e position (14 %), devant l'Amérique du Nord (13 %). Suivent l'Italie, le Royaume-Uni et la France, qui est donc en 7^e position mondiale, suivie de près par l'Espagne et l'Inde. [6]

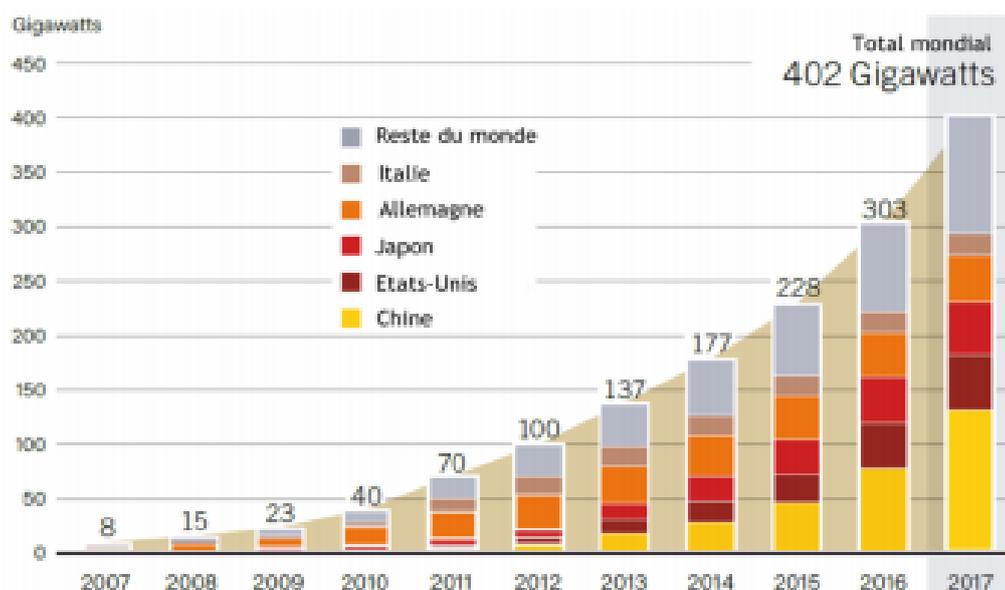


Figure 1.3. Production mondiale en électricité d'origine renouvelable par Giga watts

1.3. L'électricité en Algérie

Beaucoup d'efforts ont été fournis par la Société Nationale d'Electricité et de Gaz, SONELGAZ, et ses sociétés filiales pour le renforcement de la capacité de production nationale d'électricité. Celle-ci a connu ces dernières années une évolution conséquente en termes de puissance installée. Elle est passée de 7492 MW en 2005 à 17 238,6 MW en 2015, soit près de 10 000 MW additionnels mis en service en dix ans.

La production, qu'elle soit assurée par un ou plusieurs producteurs ou par des centrales utilisant de l'énergie renouvelable ou conventionnelle, reste l'un des plus importants segments dans l'architecture globale du secteur électrique. En Algérie, l'énergie électrique est produite, principalement, à partir de gaz naturel. La part de la puissance installée de l'ensemble des centrales utilisant cette énergie primaire dépasse les 96%, le reste des énergies employées se répartit entre le gasoil dans les centrales Diesel et l'eau dans les centrales hydroélectriques [7].

Le mix énergétique utilisé pour la génération de l'énergie électrique en Algérie, par type d'équipement, entre 1980- 2017 (GWh), est détaillé dans le tableau 1.1 [7].

Tableau 1.1. La génération de l'énergie électrique par type d'équipement entre 1980/2017.

Type d'équipement	1980	1990	2000	2006	2010	2016	2017
Thermique vapeur	3621	8397	15757	14558	9692	11512	10074
Thermique gaz	2223	6704	8830	16463	19564	24441	31009
Cycle combiné	-	-	-	3419	15341	28899	29508
Hydraulique	251	135	54	218	173	72	71
Diesel	125	216	368	264	403	281	286
Eolien	-	-	-	-	-	19	21
Photovoltaïque	-	-	-	-	-	205	500
Total	6220	15452	25008	34922	45174	66263(*)	71470(*)

(*) Y compris les injections des tiers (29,607 GWh).

1.3.1. Production d'électricité

Elle consiste en la génération de l'ensemble de la puissance active consommée par le réseau tout entier. En grande majorité, les tensions associées à cette production sont produites sous la forme de systèmes triphasés par l'intermédiaire d'alternateurs entraînés à partir de divers types de sources d'énergie dites « primaires ».

Les impératifs de préservation de l'environnement ont imposé l'utilisation du gaz naturel comme énergie primaire pour la production d'électricité, et exigent aussi de développer d'autres énergies dites propres et renouvelables comme l'énergie solaire et éolienne, dont les gisements sont disponibles et abondants dans tout le pays. La stratégie d'exécution du programme national de production de l'électricité conventionnelle consiste avant tout, à développer une industrie nationale, à même d'assurer la fourniture des équipements destinés au secteur de l'énergie électrique. Le parc de production national est

constitué des centrales électriques de la Société Algérienne de Production de l'Électricité (SPE) et de Sharikat Kahraba Takat Motadjadida (SKTM), qui sont des filiales de Sonelgaz et de certains autres petits producteurs, comme l'indique la figure 1.3. La production totale d'électricité durant l'année 2017 a atteint 71 470 GW [7].

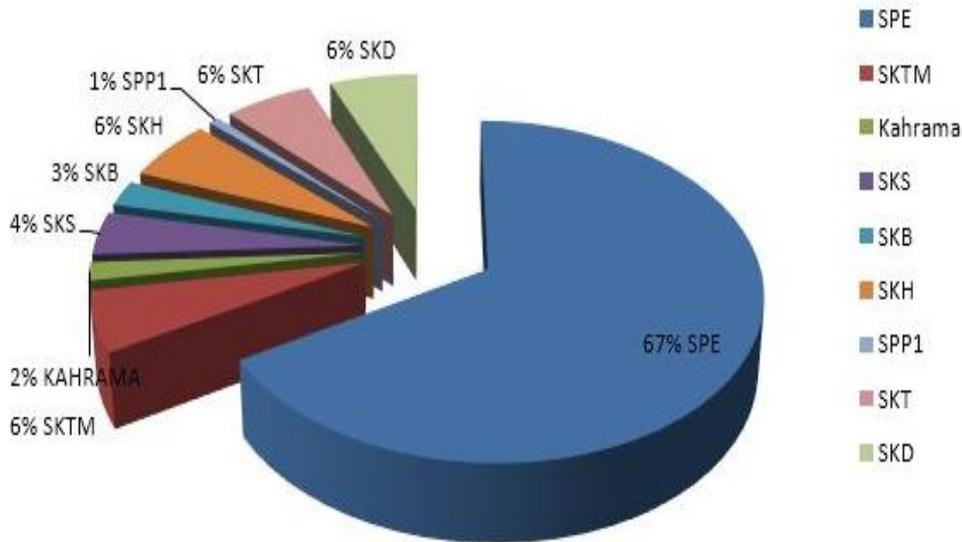


Figure 1.4. Parts des différents producteurs d'électricité en Algérie.

1.3.2. Evolution de la puissance maximale appelée (PMA)

a. Le réseau interconnecté du nord « R.I.N »

Le RIN s'étale sur le nord du pays et couvre les régions de Béchar, Hassi Messaoud, Hassi R'Mel et Ghardaïa, il est alimenté par une quarantaine de centrales de production d'électricité reliées entre elles à travers un réseau de transport en 220 kV et 400 kV, permettant le transfert d'énergie des sites de production vers les centres de consommation. Durant les dix dernières années, la puissance maximale appelée du réseau interconnecté du nord est passée de 5 921 MW en 2005 à 12 380 MW en 2015, soit une évolution moyenne annuelle de 7.2% [7].

b. Pôle In Salah-Adrar- Timimoune « PIAT »

Ce pôle est alimenté par les centrales Turbines à Gaz d'Adrar, In Salah, Zaouit Kounta, Timimoun, la ferme éolienne de Kabertene, et les 7 centrales PV, interconnectées à travers un réseau 220 kV.

Les sources renouvelables contribuent avec une puissance installée globale de 53 MW [8].

c. Les Réseaux Isolés du Sud « RIS »

Il s'agit de 26 sites du grand sud, alimentées par des réseaux locaux à travers des groupes Diesels ou des TG (turbines à gaz) compte tenu des distances mises en jeu et des niveaux de consommation relativement faibles.

Pour faire face à l'évolution importante de la demande électrique des localités isolées du sud, Plusieurs centrales turbines à gaz et groupes diesel ont été installés entre 2012 et 2015. Ces capacités de production implantées au niveau des différents sites isolés contribuent fortement à la sécurisation de l'alimentation en énergie électrique des régions isolées du sud, au développement local et l'amélioration des conditions de vie de ces régions [7].

1.3.3. Transport de l'électricité

Il consiste à acheminer les puissances produites par les unités de production vers des lieux de consommation. Les grandes centrales étant en général groupées autour des fleuves, des cours d'eau et des océans, le « grand transport » consiste à parcourir de longues distances en direction des extrémités des territoires nationaux. L'ordre de grandeur de ces distances impose, entre autre, le fait de véhiculer l'énergie électrique sous très haute tension.

Le réseau de transport électrique algérien est relié aux deux réseaux marocain et tunisien via plusieurs lignes électriques, dont les plus récentes sont deux lignes 400 kV (réseau électrique Très Haute Tension). Ces nouvelles interconnexions entre les trois pays confortent les liens traditionnels déjà existants. Le Maroc est relié avec l'Algérie par trois liaisons électriques (2 en 220 kV et 1 en 400 kV). La Tunisie est reliée avec l'Algérie par cinq liaisons électriques (2 en 90 kV, 1 en 150 kV, 1 en 220 kV et 1 en 400 kV) [7].

1.3.4. Distribution d'électricité

Elle consiste en un maillage fin du territoire permettant à chaque utilisateur d'être à proximité d'une liaison au réseau. C'est l'ultime ramification des lignes et des installations qui permet également un passage progressif des très hautes tensions du transport aux basses tensions de la consommation.

Le programme de développement en moyens de production et transport d'électricité est accompagné du renforcement du réseau de distribution (lignes MT/BT et postes), pour assurer la fiabilité de l'approvisionnement et de la distribution de l'énergie électrique et garantir une meilleure qualité de service pour les citoyens.

Le niveau de tension est entre 4 kV à 45 kV pour la moyenne tension et quelques centaines de volts pour la basse tension (220/380 V). En Algérie, nous utilisons la tension 30 kV en aérien et 10 kV en souterrain pour la moyenne tension et (220/380V) pour la basse tension.

A fin 2017, la longueur totale du réseau national de distribution de l'électricité, a atteint 328996 km [7].

1.3.5. Consommation

Chaque récepteur électrique connecté au réseau, consomme une puissance active et une puissance réactive. La consommation domestique, qui est généralement majoritaire, est très ramifiée et se fait sous basse tension souvent monophasée 220 V ou triphasé 380 V. Certains « clients » industriels (grosses usines, ferroviaire, etc.) sont directement reliés en moyenne, haute ou très haute tension.

Les ventes globales des clients ont atteint 55 148,9 GW et le nombre de clients électricité est de 9 184 962, réparties comme suit [7] :

Tableau 1.2. Les Ventes des clients et leurs nombre en 2017

	Ventes d'électricité (GWh)	Nombre de clients
Haute Tension	10 801.7	111 115
Moyenne Tension	15 752.8	57 539
Basse Tension	32 869,2	9 127 308
Total	5 3423,7	9 184 962

1.4. Intégration des énergies Renouvelables en Algérie

L'Algérie s'engage sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile. Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme national de développement des énergies renouvelables qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle. Le solaire devrait atteindre, à moyen terme, une part appréciable de la production nationale d'électricité. Malgré un potentiel assez faible, le programme n'exclut pas l'éolien qui constitue le second axe de développement et dont la part devrait avoisiner les 3% de la production d'électricité en 2030. L'Algérie prévoit également l'installation de quelques unités de taille expérimentale afin de tester les

différentes technologies en matière de biomasse, de géothermie et de dessalement des eaux saumâtres par les différentes filières d'énergie renouvelable avec un potentiel de chercheurs dans des domaines liés de très près à cette problématique [8].

1.4.1. Le programme national des énergies renouvelables

Pour concrétiser la volonté politique de s'engager dans le développement des énergies renouvelables, l'Algérie s'est dotée en mars 2011 d'un programme qui consistait à :

- Installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22 000 MW entre 2011 et 2030 dont 12 000 MW seront dédiés à couvrir la demande nationale de l'électricité et 10 000 MW à l'exportation.
- En 2030, si tout se passe bien, environ 40 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale sera d'origine renouvelable, essentiellement à partir du solaire photovoltaïque et du solaire thermique (37%) [9].

a) Les étapes de réalisation du programme

1. Entre 2011 et 2013, la réalisation de projets pilotes pour tester les différentes technologies disponibles.
2. Entre 2014 et 2015, début du déploiement du programme ;
3. De 2016 à 2020, déploiement à grande échelle, la réalisation d'une puissance de 4010 MW, entre photovoltaïque et éolien, ainsi que 515 MW, entre biomasse, cogénération et géothermie.
4. Le programme de la phase 2021-2030 : prévoit l'installation de 500 MW par an jusqu'en 2023, puis 600 MW par an jusqu'en 2030.

Le développement de l'interconnexion électrique entre le Nord et le Sahara (Adrar), permettra l'installation de grandes centrales d'énergies renouvelables dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoune et Bechar et leur intégration dans le système énergétique national. A cette échéance, le solaire thermique pourrait être économiquement viable.

La figure 1.5 donne un aperçu sur prévisions, en termes de puissance totale installée, pour ce programme à partir de 2015 [9].

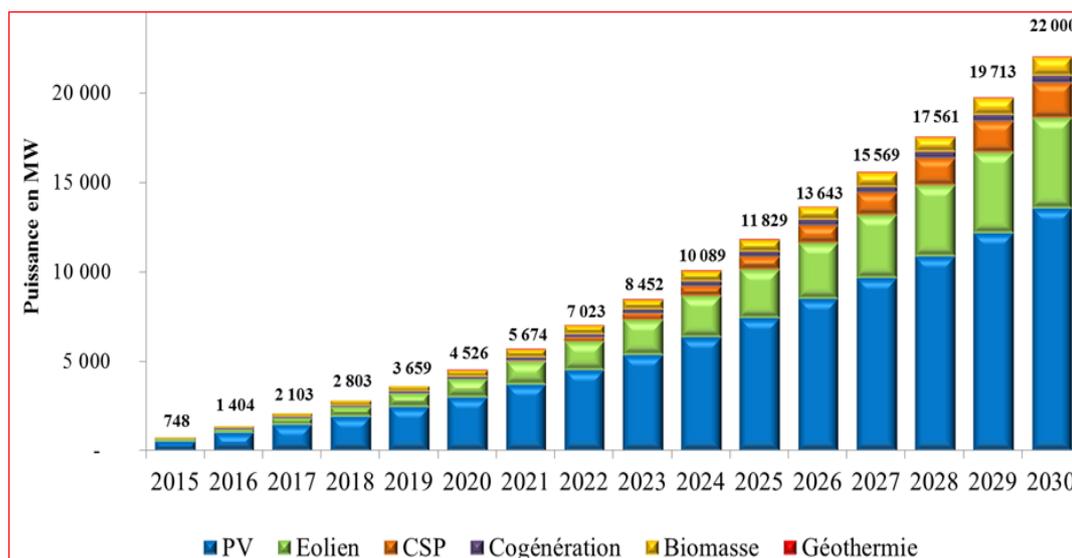


Figure 1.5. Etapes du programme national des énergies renouvelables 2015/2030

b) L'objectif stratégique du programme :

- Développer une véritable industrie du solaire associée à un programme de formation et de capitalisation qui permettra, à terme, d'employer le génie local algérien.
- Plusieurs milliers d'emplois devraient être créés.
- Développer une industrie de l'éolien.
- Volet recherche-développement et formation.

c) Principaux projets réalisés ou en cours de réalisation en matière des Energies Renouvelables :

- Construction de la première centrale hybride solaire/gaz de 150 MW à Hassi R'mel
- Construction du premier parc éolien 10 MW à Adrar.
- Programme d'alimentation en énergie solaire de 20 villages au Sud :
 - Mise en place d'environ 1 million Km² de surface photovoltaïque
 - Production à ce jour de 2 GWh.

d) Les projets réalisés par SKTM :

- Nombre de centrales installée : 24 centrales (23 centrales PV et 01 centrale éolienne).
- Puissance Installée : 354,3 MW (344,1 MWc PV et 10,2 MW Eolien).

- Energie Produite depuis la mise en service 470,318 GWh (418,739 GWh PV et 51,579 GWh Eolien).

Les différentes centrales électriques réalisées par SKTM et les informations concernant leurs puissances et leurs productions sont décrites dans le tableau 1.3 suivant [10].

Tableau 1.3. Les différentes centrales installées par SKTM

Centrales	P installé (MW)	Production (GWh)
Réseau PIAT		
Eolienne kabertène	10.2	51.579
Adrar	20	59.585
Timimoune	09	23.822
In Saleh	05	12.328
Regguen	05	12.221
Aoukef	05	12.557
Réseau RIS		
Tamanrasset	13	36.410
Djanet	03	10.729
Tindouf	09	6.376
Réseau RIN		
Oued NechouGherdaia	1.1	4.593
Ain El Bel	53	25.134
Ain El Melh	20	16.
Ain Sekhouna	30	14.213

1.4.2. Le plan de développement des investissements dans les énergies renouvelables

La stratégie de développement des énergies renouvelables, est accompagnée par la mise en place d'un Programme national de recherche (PNR) en Energies Renouvelables dont les principaux objectifs scientifiques consistent à évaluer les gisements énergétiques renouvelables et à maîtriser les procédés de conversion, de transformation et de stockage de ces énergies et à développer un savoir-faire nécessaire, allant de l'étude jusqu'à la réalisation des installations sur site [11].

1.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons parlé de la production d'électricité par les différentes sources renouvelables et non-renouvelables en Algérie et dans le monde entier. Pour le prochain chapitre nous allons définir l'énergie solaire photovoltaïque ainsi que les différents types de système PV, à la fin nous allons parler de potentiel de l'Algérie en énergies renouvelables plus précisément en Photovoltaïque.

Chapitre 2

Le photovoltaïque

2.1 Introduction

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an [12]. Une partie de ce rayonnement peut être exploitée pour produire directement de la chaleur (solaire thermique) ou de l'électricité : c'est l'énergie solaire photovoltaïque. Ce mode de production ne nécessite pas de réseau de distribution. En effet on peut produire de l'énergie électrique là où on la consomme.

2.2. Energies solaires Photovoltaïques

2.2.1. L'éclairement solaire

On introduit la notion de l'éclairement comme étant la densité de puissance reçue par une surface soumise à un rayonnement lumineux dans les conditions atmosphériques, cette densité de puissance atteint 1KW/m^2 pour un endroit situé au niveau de la mer.

Il est important de préciser qu'en raison de la nature des nuages, de leur distribution dans le ciel, le capteur ne reçoit pas la même quantité d'éclairement de chaque direction, c'est pour cela qu'on parle d'une distribution anisotrope. En de rares cas (ciel complètement nuageux, la distribution est dite isotrope) [13]. [14].

La quantification de l'albédo (éclairement réfléchi) est fortement dépendante de la nature du sol, ainsi un sol recouvert de neige présentera une valeur élevée de l'albédo qu'un sol rocailloux.

La cellule (PV) répond au rayonnement global et dépend beaucoup de longueur d'onde. Elle est particulièrement sensible aux radiations solaires de longueur d'onde comprise entre 0.4 et $1\ \mu\text{m}$ du spectre solaire, comme on peut le remarquer sur la figure 2.1.

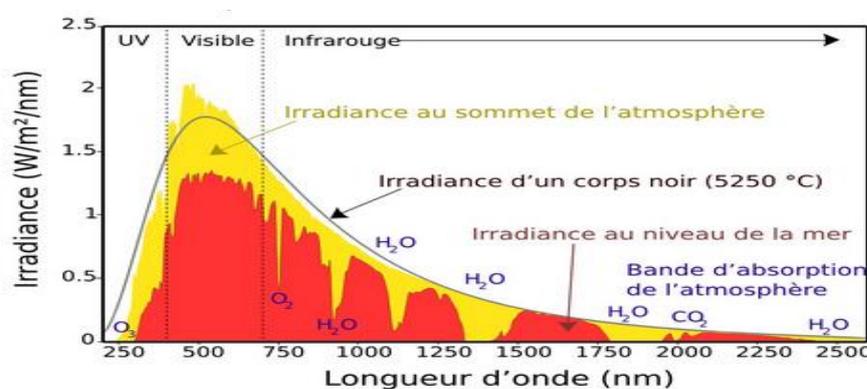


Figure 2.1. Spectre du rayonnement solaire

2.2.2. Effet et cellule photovoltaïques

L'effet photovoltaïque (PV) est l'un des effets photoélectriques. Il est mis en œuvre dans les cellules photovoltaïques pour produire de l'électricité à partir du rayonnement solaire. L'effet photovoltaïque, a été découvert par Antoine Becquerel, dès 1839, avec une chaîne de conducteurs comportant des électrolytes.

Le terme "photovoltaïque" provient du mot grec ancien « photos » signifiant la lumière. L'effet photovoltaïque est la transformation de la lumière en électricité. Ce phénomène physique est propre à certains matériaux dont le silicium, matière première des panneaux photovoltaïques.

En effet, la lumière produite par le soleil est composée de photons. Ces photons vont heurter la surface du panneau solaire et les électrons présents vont alors se mettre en mouvement dans une direction particulière permettant de créer un courant électrique continu [15].

Une cellule PV est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. A l'obscurité, la cellule solaire fonctionne comme une diode.

Lorsque la cellule solaire est exposée à des photons dont l'énergie $E=h\nu=hc/\lambda$ est supérieure à l'énergie du gap E_g du matériau semi-conducteur, le nombre d'électrons libres du semi-conducteur de type P et celui de trous du semi-conducteur de type N augmente considérablement. Si les photons incidents ont une énergie inférieure à E_g , ils ne seront pas absorbés c'est-à-dire leurs énergies ne contribuent pas à la conversion photovoltaïque. La figure suivante illustre le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

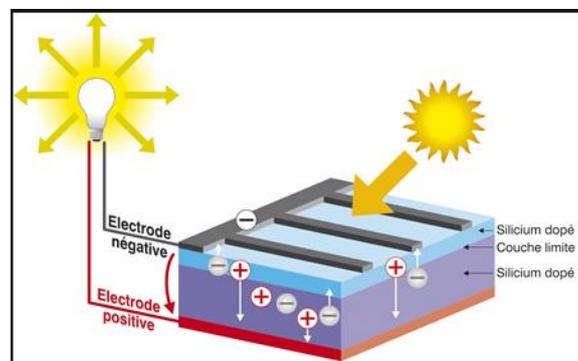


Figure 2.2. Principe de fonctionnement d'une cellule PV (effet Photovoltaïque).

Les caractéristiques de la cellule PV

Une cellule photovoltaïque est caractérisée par ses courbes courant – tension (I-V) et puissance – tension (P-V) (cf : figure 2.3).

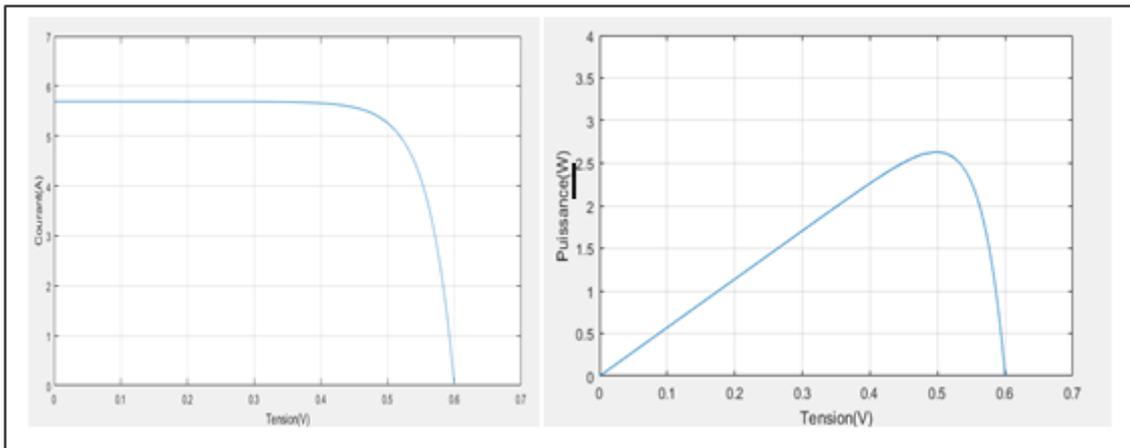


Figure 2.3. Caractéristiques I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque.

Modèle mathématique et schéma électrique équivalent

Dans la littérature, une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par deux résistances série R_s et shunt R_{sh} comme le montre le schéma électrique équivalent de la figure 2.4.

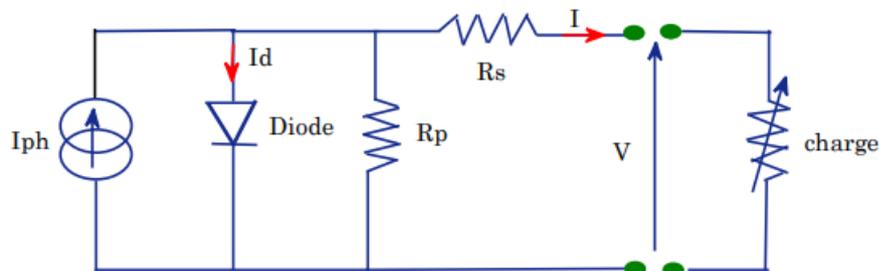


Figure 2.4. Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire.

L'équation qui traduit le schéma électrique :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + I R_s}{n N_s \frac{K T_c}{q}} \right) - 1 \right] - \frac{V + I R_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

Avec,

- I_{ph} : le photo-courant d'un panneau,
- I_0 : le courant de saturation inverse de la diode d'une cellule,

- q : la charge d'électron,
- n : Facteur d'idéalité,
- K : Constante de Boltzman,
- T_c : Température de la cellule,
- V : la tension aux bornes de la cellule,
- I : le courant de la cellule,
- R_s : résistances série, R_{sh} : résistance shunt du module.

La dépendance du photo-courant de l'éclairement et de la température est décrite par l'équation suivante :

$$I_{ph} = (I_{sc} + K_i dT) \frac{G}{G_n} \quad (2.2)$$

Où,

I_{sc} Est le courant de court-circuit

K_i Le coefficient de température de court-circuit

G L'irradiation solaire

G_n L'irradiation solaire nominale

Ces résistances ont une certaine influence sur la caractéristique $I=f(V)$ de la cellule :

- La résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule. Elle est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts face avant et arrière, elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.
- La résistance shunt est une conséquence de l'état de surface le long de la périphérie de la cellule ; elle est réduite à la suite de pénétration des impuretés métalliques dans la jonction, lors du dépôt de la grille métallique ou des prises de contacts sur la face diffusée de la cellule [16].

Paramètres électriques

- **Courant de court-circuit I_{sc}** : C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle ($V = 0$).

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{e(I_{cc} * R_s)}{nKT} \right) \right] - \frac{(I_{cc} * R_s)}{R_{sh}} \quad (2.3)$$

- **Tension en circuit ouvert Voc :** c'est la tension aux bornes de la cellule sans charge où le courant généré $I = 0$, elle reflète la tension de seuil de la jonction PN.

$$V_{co} = V_T \ln \left[\frac{I_{pv}}{I_0} + 1 \right] \quad (2.4)$$

- **La puissance maximale :**

C'est la puissance électrique maximale que peut fournir la cellule, qui est associée à une tension maximale et à une intensité maximale. Lorsqu'il est question de puissance maximale dans les conditions normalisées d'ensoleillement STC standard (25° et un éclairage de 1000W/m²), on parle alors de puissance crête, mesurée en watts-crête.

- **Facteur de forme :** C'est un facteur de performance des cellules solaires ; plus il s'approche de l'unité, plus les cellules sont meilleures. Il compare la puissance maximale délivrée (P_{opt}) au produit du courant de court-circuit (I_{cc}) et de la tension à circuit- ouvert (V_{oc}).

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad (2.5)$$

Le facteur de forme pour une cellule de bonne qualité est supérieur à 0.7 et diminue avec l'augmentation de la température.

- **Rendement énergétique :** Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite et la puissance du rayonnement solaire parvenant à la cellule. Soit S la surface de la cellule PV et E l'éclairement en W/m², le rendement est défini par l'équation suivante : [17]

$$\eta = \frac{P_m}{S \cdot E} \quad (2.6)$$

2.2.3. Générateur photovoltaïque

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que : la puissance, le courant ou la tension.

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur PV (GPV) élémentaire. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est le courant qui augmentera. Ce GPV élémentaire est ensuite encapsulé dans une structure qui le protège des agressions externes. Cette structure munie d'une boîte de connexion est appelée Module PV. [18].

Un module photovoltaïque est caractérisé par sa Puissance de crête P_c : Exprimée en watt-crête (Wc), c'est la puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2) [18].

2.2.4. Paramètres externes

❖ Influence de la température sur les courbes I(V) et P(V)

L'influence de la température est importante et a des conséquences pour la conception des panneaux et des systèmes photovoltaïques.

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules solaires vu que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très sensibles à ce paramètre. Sur les figure 2.5 et 2.6, nous reportons respectivement, les caractéristiques courant-tension et puissance-tension sous un ensoleillement de 1000W/m^2 et à des températures entre 0 et 75°C .

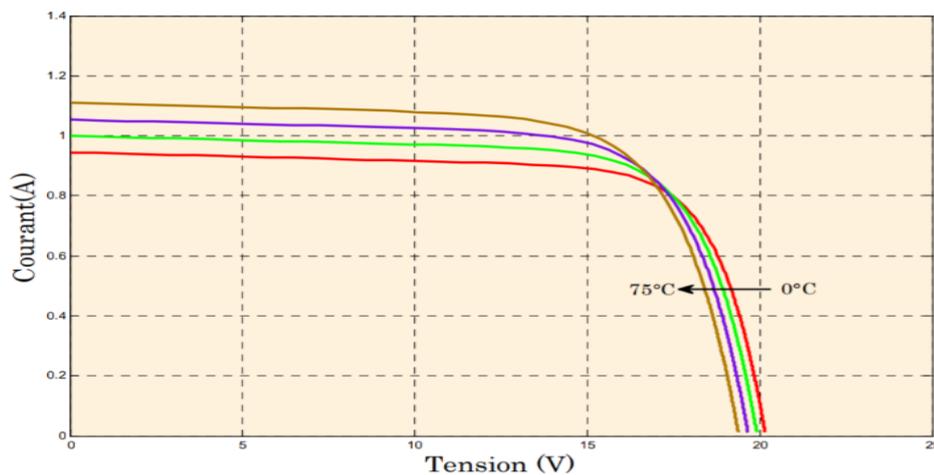


Figure 2.5. Effet de la température sur la caractéristique I(V)

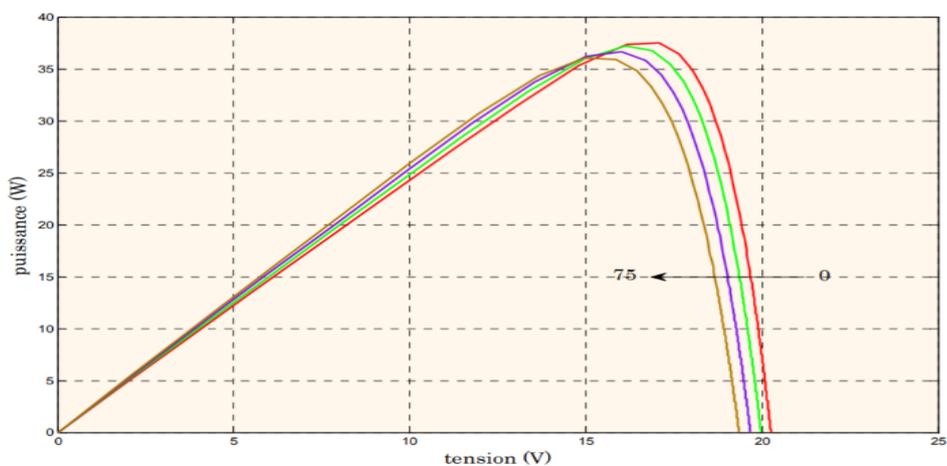


Figure 2.6. Effet de la température sur la caractéristique P(V)

Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue. Par conséquent, la puissance maximale du générateur subit une diminution [19].

❖ Influence de l'ensoleillement

Une baisse de l'ensoleillement provoque une diminution de la création de pair électron Trou avec un courant changé à l'obscurité.

La tension ne varie que très peu en fonction de l'éclairement, contrairement au courant de court-circuit I_{cc} qui augmente fortement avec l'éclairement. La variation des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ est représentée dans les figures 2.7 et 2.8 [19]. [20].

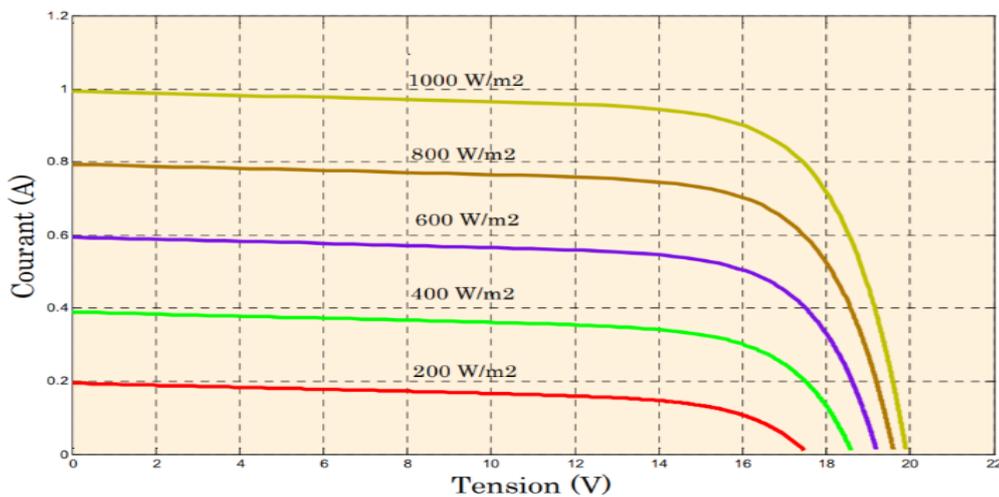


Figure 2.7. Courbes $I(V)$ pour divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$

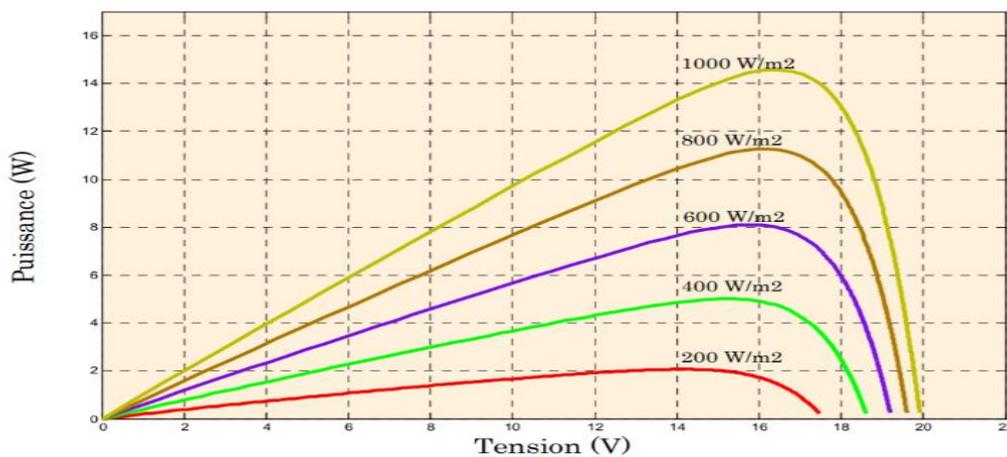


Figure 2.8. Courbe $P(V)$ pour divers ensoleillements à $T=25^{\circ}\text{C}$

2.3. Les différents types des systèmes photovoltaïques

Un système photovoltaïque est composé d'un ensemble de modules (panneaux) photovoltaïques, d'un composant électrique (câbles) et un autre électronique (onduleur). Les

modules utilisent l'énergie solaire incidente pour produire de l'électricité par l'effet photovoltaïque.

Le but du système photovoltaïque est de réaliser une économie d'énergie importante pour la structure servie. Les avantages qui sont à la base du développement cette technologie sont :

- la compatibilité avec les exigences architecturales et de la protection de l'environnement,
- aucune pollution sonore,
- une économie et une alternative aux combustibles fossiles,
- une production d'électricité sans émissions de polluants.

Les systèmes PV sont classés en deux grandes catégories selon la manière dont l'énergie est utilisée.

2.3.1 Système autonome dans un site Isolé

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la figure (2.9) qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé au générateur PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de la production [21].

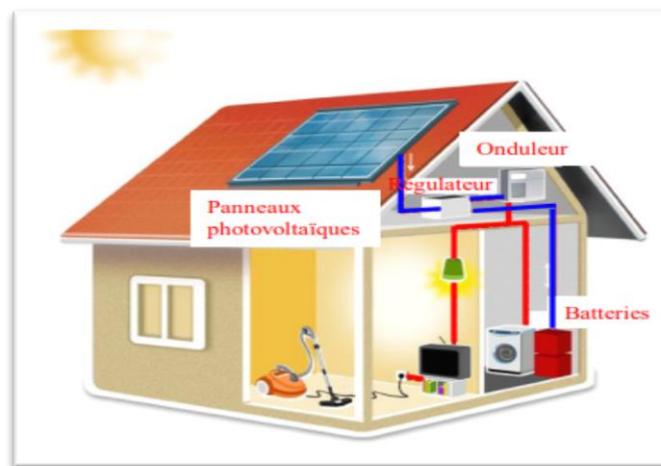


Figure 2.9. Structure d'une maison alimentée par le PV (site isolé)

Les éléments importants d'un système autonome sont :

- ✓ **Le panneau photovoltaïque** : est constitué de plusieurs modules, ces derniers étant constitués de plusieurs cellules en série afin d'obtenir une tension souhaitée, et produisent un courant électrique continu.
- ✓ **Le Régulateur** : Plusieurs types de régulateurs peuvent être utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Le régulateur contrôle les flux d'énergie. Il doit protéger la batterie contre les surcharges (solaires) et décharges profondes (utilisateur). Il doit assurer la surveillance et la sécurité de l'installation.
- ✓ **L'onduleur** : C'est un convertisseur DC/AC qui convertit le courant et la tension continus en courant et tension alternatives pour les charges correspondantes.
- ✓ **Les batteries** : Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes est en général assuré par les batteries. On utilisera des batteries dans le cas où la demande de puissance est décalée par rapport au soleil. Le choix du type de batterie se fait d'après une approximation de la puissance moyenne journalière et du temps de stockage nécessaire.

Les derniers éléments indispensables au bon fonctionnement d'un système photovoltaïque autonome sont les protections contre la foudre, les disjoncteurs et les fusibles [23].

2.3.2. Les installations raccordées au réseau de distribution public

Le rôle principal d'un système PV raccordé au réseau est de contribuer à la production d'électricité d'origine renouvelable sur le réseau. L'énergie produite par les modules est directement consommée par les charges locales d'un habitat par exemple. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée est injecté sur le réseau. Une autre architecture de ces systèmes permet d'injecter l'énergie produite directement au réseau électrique. [24].

❖ Solution avec injection totale

L'énergie produite par les modules est directement injectée sur le réseau électrique. Les périodes d'injections sur le réseau correspondent aux périodes de production photovoltaïque.

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en deux points :

- le raccordement du consommateur qui reste identique avec son compteur de consommation (on ne peut pas utiliser sa propre production),
- le nouveau branchement permettant d'injecter l'intégralité de la production dans le réseau, dispose de deux compteurs :

- l'un pour la production.
- l'autre pour la non-consommation (permet de vérifier qu'aucun soutirage frauduleux n'est réalisé) [25].

Les schémas de base de ces deux raccordements est représenté sur la figure 2.10.

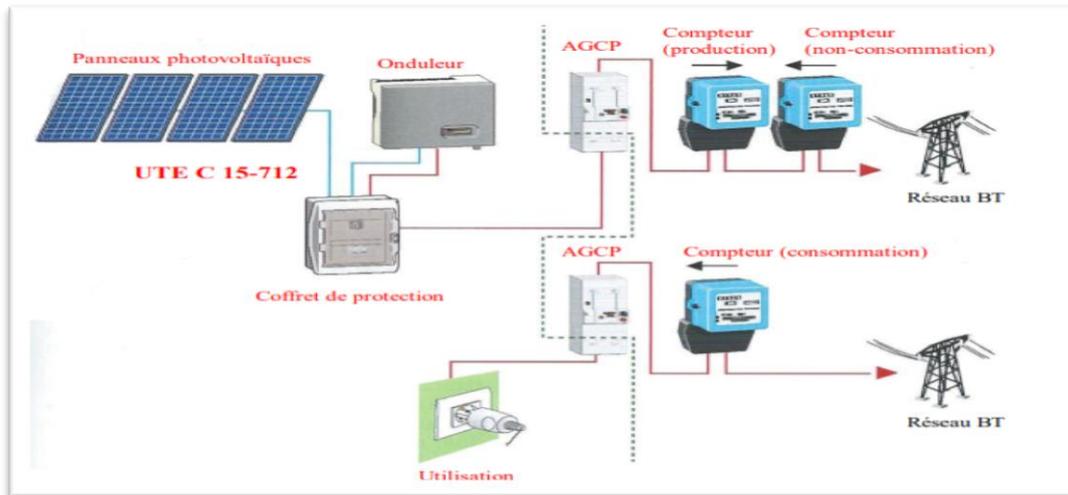


Figure 2.10. Schémas de base des deux types de raccordements d'un système PV totalement raccordé au réseau.

❖ Solution avec injection de surplus

L'énergie produite par les modules est directement consommée sur place par les charges. L'utilisateur consomme l'énergie qu'il produit avec le système solaire et l'excédent est injecté dans le réseau. Quand la production photovoltaïque est insuffisante, le réseau fournit l'énergie nécessaire. Un seul compteur supplémentaire est ajouté au compteur existant [25] comme l'indique le schéma de la figure 2.11.



Figure 2.11. Configuration d'un système PV connecté au réseau avec injection de surplus.

2.4. Potentiel de l'Algérie

L'Algérie est probablement le pays africain et méditerranéen disposant du potentiel d'énergie renouvelable le plus important à l'échelle régionale, de même que les capacités les plus appropriées au développement et à l'exploitation de ce potentiel. Un potentiel énergétique lié à plusieurs types de sources, mais dont l'énergie solaire demeure la plus importante en disponibilité et puissance et, sans doute aussi, la plus compétitive à développer à l'avenir sous diverses formes [25].

Vue, sa localisation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara).

L'énergie reçue annuellement sur une surface horizontale avoisine les 3 KWh/m² au nord et dépasse 5,6 KWh/m² au Grand Sud (cf : figure 2.12) [26].

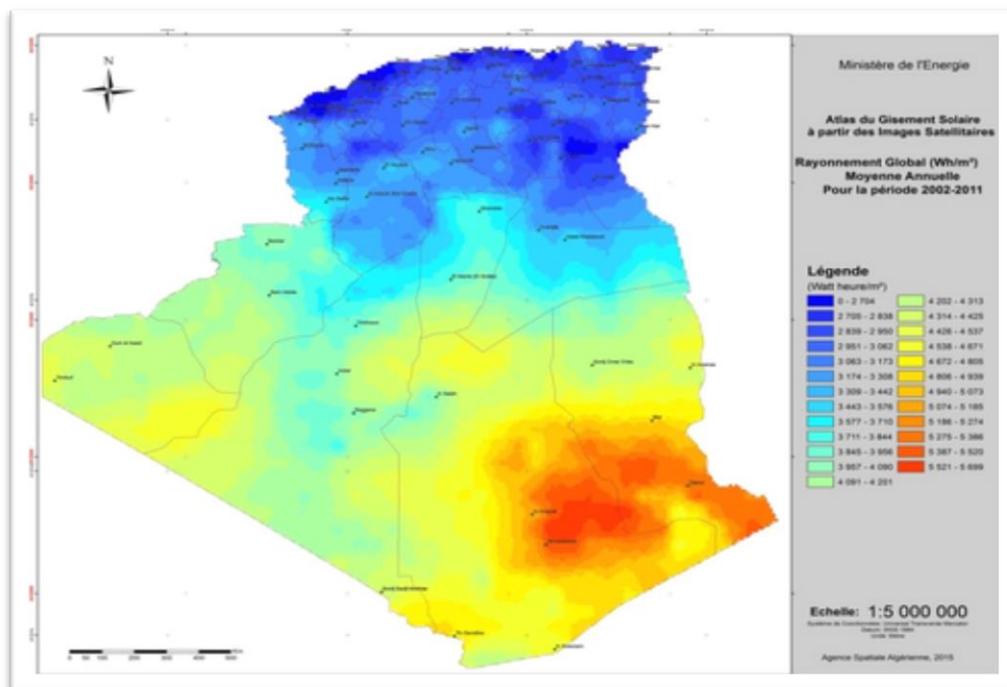


Figure 2.12. Carte du gisement solaire en Algérie.

Le gouvernement algérien avait décidé de lancer dès l'année 2011, un programme à long terme d'énergies renouvelables de 22.000 MW, destiné à la production d'électricité qui se faisait jusqu'alors à base d'énormes quantités de gaz. Le programme en question prévoyait la mise en place à l'horizon 2030, d'une capacité de production d'électricité de 12.000 MW exclusivement destinée au marché intérieur. Tout un éventail d'énergies renouvelables parmi

lesquels 7.200 MW en thermo solaire, 2.800 MW en photovoltaïque, et 2.000 en éolien devaient en être issus. Une tranche supplémentaire de 10.000 MW était même prévue pour être exportée vers la Tunisie et le Maroc. L'objectif ouvertement affiché était d'économiser au maximum le gaz naturel en grande partie destiné à l'exportation [27].

Le renforcement de la part des énergies renouvelables dans le panier énergétique algérien permettra de diminuer la quantité de gaz utilisée dans la production électrique. Cette réduction pourrait augmenter en volume, les quantités de gaz que l'Algérie pourrait exporter vers l'Europe, et renforcer ainsi sa position sur ce marché stratégique.

2.5. Conclusion

Au cours de ce chapitre nous avons pu définir la conversion photovoltaïque en présentant le principe de fonctionnement de la cellule solaire, le module photovoltaïque. Nous avons cité ses caractéristiques électriques qui varient selon la température, l'éclairement solaire ainsi que les trois systèmes d'installation photovoltaïque. Nous avons aussi donné un aperçu sur le potentiel algérien et abordé le programme national de développement des énergies renouvelables.

Au prochain chapitre, nous donnerons un aperçu sur le réseau national algérien ainsi que les sociétés Sonelgaz et SKTM et nous présenterons la centrale photovoltaïque d'Adrar de 20MW.

Chapitre 3

La centrale solaire PV d'Adrar

Description et simulation

3.1. Introduction

Aujourd'hui, le nombre de producteurs d'énergie connectés aux réseaux est en forte augmentation. Plusieurs facteurs expliquent ce fort accroissement. Le premier est l'ouverture progressive du marché de l'énergie au monde.

Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau constituent la plus grande partie des installations photovoltaïques dans le monde : en 2018, la capacité photovoltaïque mondiale installée est estimée à 464 GWc, en progression de 100 GWc pour l'année 2018 [28].

Dans ces dernières années, L'état algérien commence à envisager des solutions économique et aussi écologiques en investissant dans les énergies renouvelables et construire des centrale de production connectées au réseau dans plusieurs site dans le territoire Algérien.

3.2. Le réseau électrique national algérien (SONELGAZ)

3.2.1. SONELGAZ

Le groupe SONELGAZ 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.

SONELGAZ a toujours joué un rôle majeur dans le développement économique et social du pays. Sa contribution dans la concrétisation de la politique énergétique nationale est à la mesure des importants programmes réalisés, en matière d'électrification rurale et de distribution publique du gaz, ce qui a permis de hisser le taux de couverture en électricité à 99,4% et le taux de pénétration du gaz à 62% [29].

SONELGAZ vit, depuis quelques années, une phase particulièrement importante de son histoire. Désormais la restructuration de SONELGAZ, suite à l'avènement de la loi No 01.02 du 05 février 2002 s'est achevée avec la création de l'ensemble des filiales[30] :

On compte :

2. La société de production de l'Electricité (SPE).
3. SharikatKahrabaOuaTakatMoutadjadida (SKTM).
4. Compagnie d'engineering de l'électricité et du gaz (CEEG).
5. Société algérienne de gestion du réseau de transport de l'électricité (GRTE).

6. Société algérienne de gestion du réseau de transport du gaz (GRTG).
7. Opérateur système électrique (OS), chargé de la conduite de système Production/Transport de l'électricité.
8. 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).

3.2.2. 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 [31] :

- 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.

3.2.3. Le réseau électrique national

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 de transformateurs, à des niveaux de 220 kV puis 63 ou 90 kV. Cette partie du réseau électrique constitue le réseau de transport dont les tensions font partie

du domaine HTB ($U_n > 50\text{kV}$), quelques 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 Gestionnaire de Réseau de Transport de l'Electricité, GRTE, 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 ($< 250\text{ kW}$) [32]. Le tableau 3.1. Résume les domaines de tension de ce réseau.

Tableau 3.1. Domaine des tensions du réseau national

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

3.2.4. 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 :

- 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 [33] :

a. Creux et coupure de tension

Un creux de tension est une baisse brutale de la tension en un point d'un réseau d'énergie électrique, à une valeur comprise entre 10 % et 90 % suivie d'un rétablissement de la tension après un court laps de temps allant de 10 ms jusqu'à quelques secondes comme on peut le voir sur la figure 3.1.

Les coupures représentant un cas particulier des creux de tension de profondeur supérieure à 90 % de la tension nominale ou disparition totale pendant une durée généralement comprise entre 10 ms et une minute pour les coupures brèves et supérieure à une minute pour les coupures longues (cf : figure 3.1).

Les creux de tension sont dus aux courts circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle.

Les conséquences des creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbations peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la destruction totale de ces équipements.

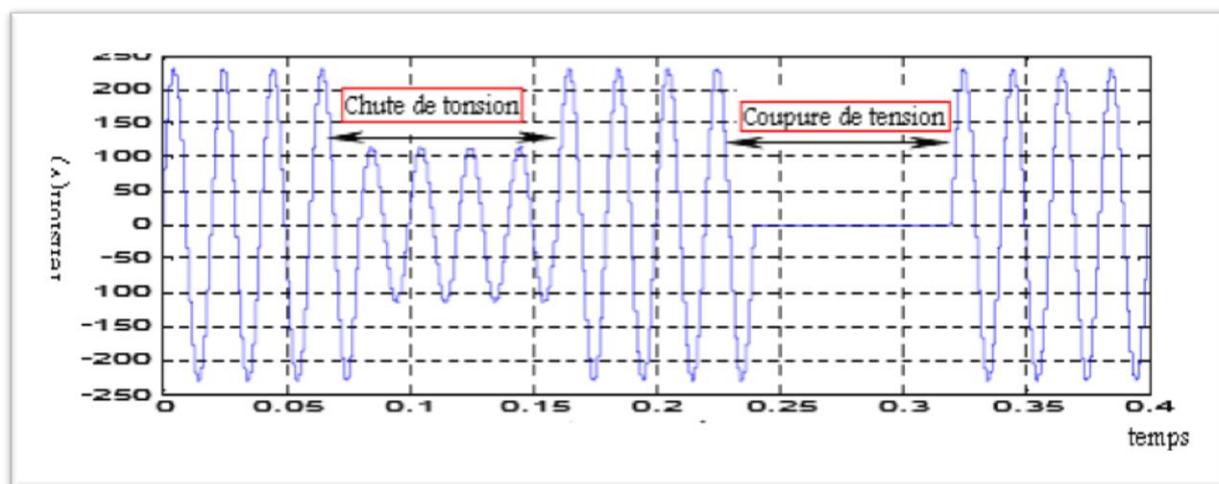


Figure 3.1. Creux et coupure de tension

b. Variations et fluctuation de tension

Les variations de tension sont des variations de la valeur efficace ou de la valeur crête d'amplitude inférieure à 10 % de la tension nominale et les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude (cf : figure 3.2).

Les fluctuations de tension sont principalement dues à des charges industrielles rapidement variables comme les machines à souder, les fours à arc et les laminoirs.

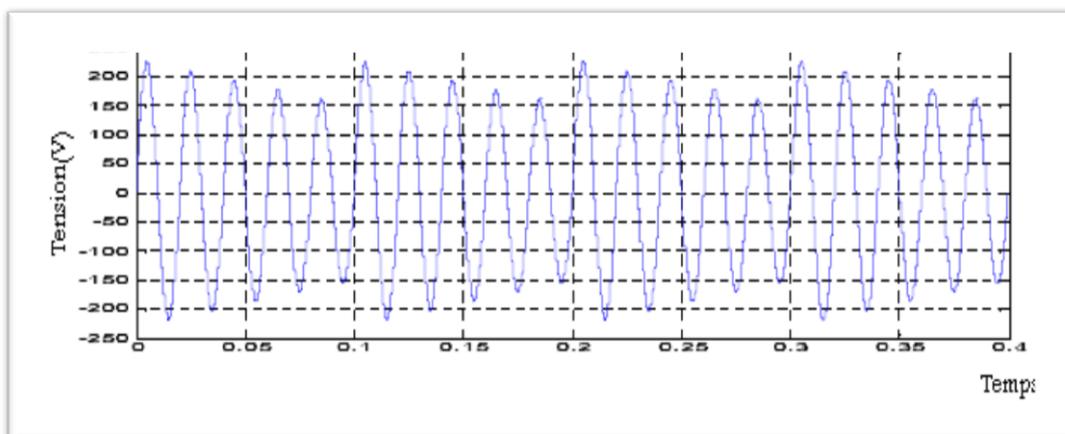


Figure 3.2. Exemple d'une fluctuation de tension

Comme les fluctuations ont une amplitude qui n'excède pas $\pm 10\%$, la plupart des appareils ne sont pas perturbés.

c. Fluctuation de la fréquence

Les fluctuations de fréquence (figure 3.3) sont observées le plus souvent sur des réseaux non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome.

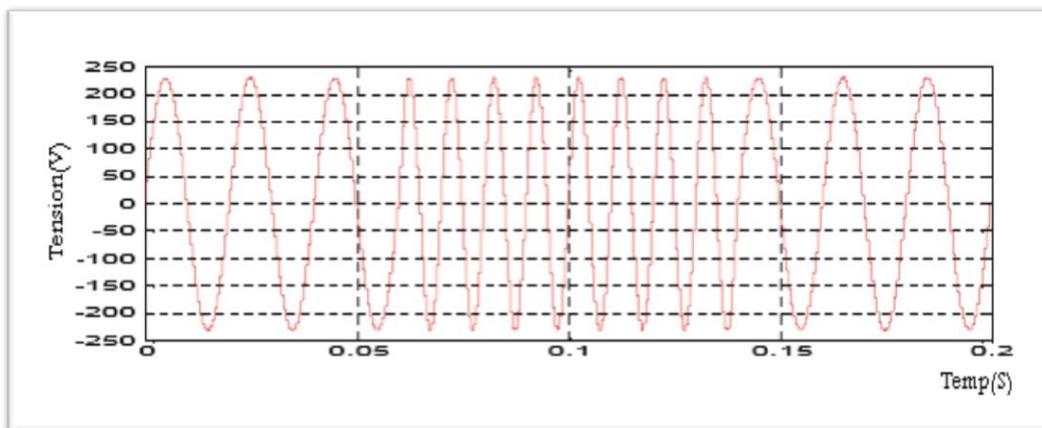


Figure 3.3. Exemple d'une fluctuation de la fréquence

d. Déséquilibre en tension du système triphasé

Les dissymétries du réseau ne provoquent que de faibles niveaux de déséquilibre de la tension (généralement limités à quelques dixièmes de pour-cent). Par contre, certaines charges monophasées (en particulier la traction ferroviaire en courant

alternatif) sont la cause de courants déséquilibrés importants et dès lors d'un déséquilibre significatif de la tension. Un exemple de formes d'ondes d'un système triphasé avec un tel déséquilibre est illustré sur la figure 3.4

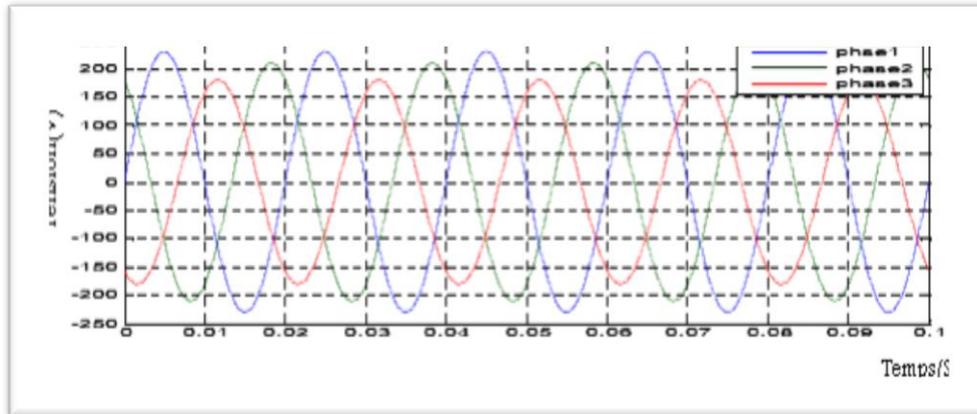


Figure 3.4. Exemple de déséquilibre du système triphasé

Le problème principal engendré par le déséquilibre est l'échauffement supplémentaire des machines tournantes triphasées.

e. Harmoniques et inter-harmoniques

Les harmoniques sont une superposition sur l'onde fondamentale à 50 Hz, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples entières de celui du fondamental. Tandis que Les inter-harmoniques sont des composantes sinusoïdales, qui ne sont pas à des fréquences multiples entières de celui du fondamental (cf : figure 3.5).

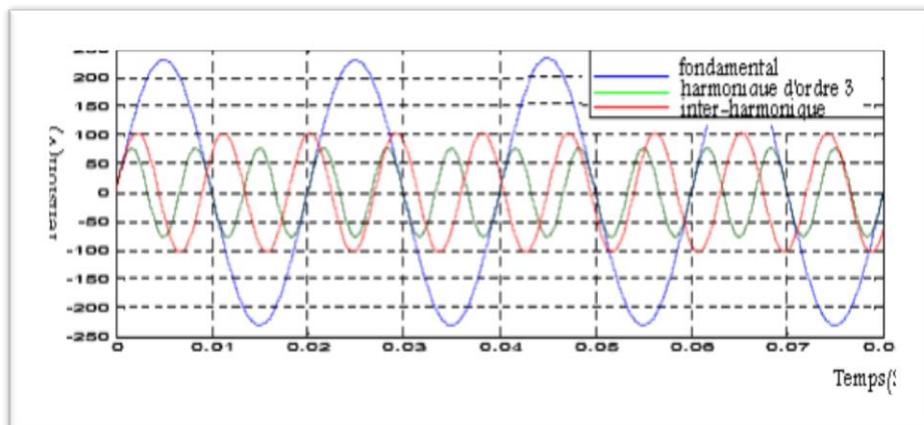


Figure 3.5. Harmonique et inter-harmonique

3.3. Etude de raccordement de la centrale PV de 20MWc d'Adrar sur le réseau de distribution 30KV

3.3.1. La centrale photovoltaïque d'Adrar

La centrale photovoltaïque d'Adrar s'inscrit dans le cadre du programme national 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, 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. Le plan de masse de la centrale est présenté dans la figure 3.6.

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 avec un apport d'énergie annuelle de 36414 MWh produite par la centrale Photovoltaïque.
- Préservation des ressources primaires : économie des combustibles fossiles (environ de 10080 m³/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 CO₂).



Figure 3.6. Plan masse de la centrale

3.3.2. . Les composants de la centrale

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 boîte de jonction sont raccordées à une boîte parallèle et chaque 4 boîte parallèle 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. Le schéma de cette centrale est illustré sur la figure 3.7.

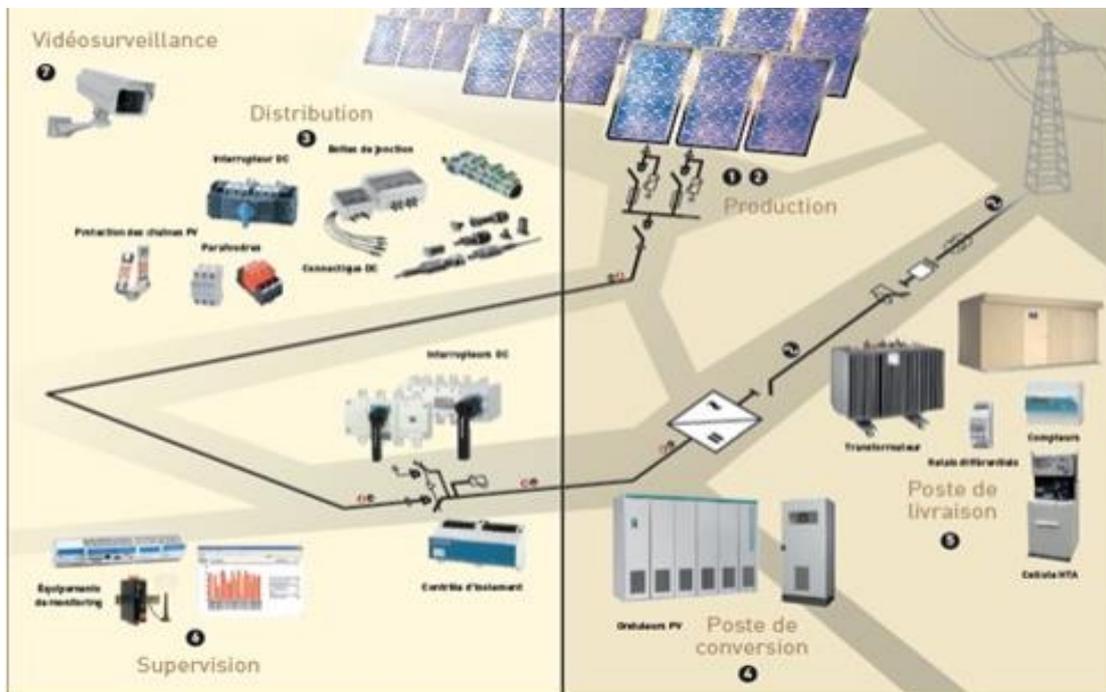


Figure 3.7. Schéma de la centrale de production

3.3.2.1. Structure porteuse / de fixation

Les structures porteuses sont les supports sur lesquels sont disposés les modules PV (figure 3.8). Le rôle de ces structures est de :

- Être stable.
- Supporter le poids des panneaux.
- Résister aux contraintes environnementales.



Figure 3.8. Châssis au sol

3.3.2.2. Panneaux Solaires Photovoltaïques

Les cellules poly-cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. L'avantage c'est que le coût de fabrication moins cher par rapport au coût de fabrication du Monocristallin. Le prix de modules PV en silicium poly cristallin est, par conséquent, plus réduit que ceux en silicium monocristallin, d'où l'utilisation de modules PV en silicium poly cristallin pour cette centrale PV d'Adrar. Les caractéristiques de ces modules PV sont décrites dans le tableau 3.2.

Tableau 3.2. Caractéristique des modules PV de la centrale.

Marque	YINGLI SOLAR
Type du module	Poly cristallin
Tension en fctn optimal V_{mp}	30.2
Tension mesuré (V)	29.6
Puissance mesuré (W)	245
Fusible série max A	15
Courant mesuré (A)	8.28
Tension a circuit ouvert (V)	37.5
Courant de court-circuit (A)	8.68
Tension système Max(V)	1000
Courant en fctn optimal I_{mp}	8.11
Rendement du module	15%

3.3.2.3. Les onduleurs

A l'intérieur 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 comme illustré sur la figure 3.9.

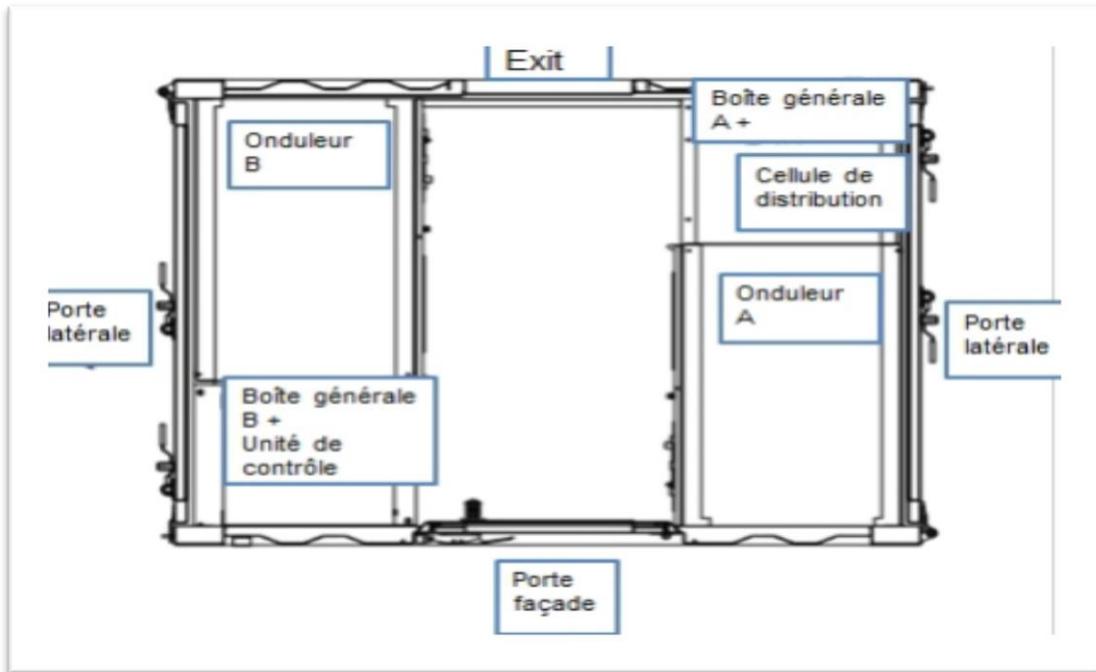


Figure 3.9. Disposition de l'onduleur dans le shelter

Les caractéristiques techniques des onduleurs utilisés dans cette centrale sont indiquées dans le tableau 3.3 suivant.

Tableau 3.3. Caractéristiques de l'onduleur

Type	SUNGROW-SG 500MX
Quantité	40
Protection IP	IP21
Température de fonctionnement	-30°C à +55°C
Entrée DC	
Tension Max (V)	1000
I_{SC} (A)	1344
Tension V_{mppmin} (V)	500
Tension V_{mppmax} (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)	3315
Fréquence de sortie nominale (KW)	50
Courant de sortie Max (A)	1008
Facteur de puissance	[-0,9 -1] [0,9 1]
Catégorie de surtension	III

Tous les équipements de la centrale ont un système de refroidissement naturel, à l'exception des onduleurs qui sont équipés de ventilateurs (Air Forcé) installés dans un shelter équipé de ventilateurs (figure 3.10).



Figure 3.10. Shelter des onduleurs

3.3.2.4. Le transformateur

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, fonctionnant selon la température. Le transformateur est placé en avant, et en arrière se trouve une cellule de boucle et de distribution. Une vue du shelter du transformateur est donné à la figure 3.11, tandis que les caractéristiques du transformateur sont indiquées dans le tableau 3.4.

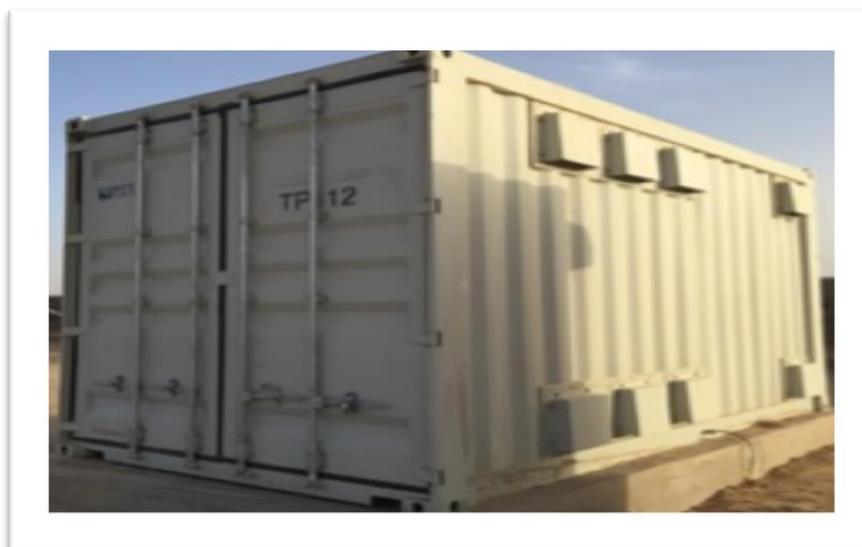


Figure 3.11. Local du transformateur

Tableau 3.4. Caractéristique de transformateur de puissance principal

Désignation	30KV
type	SGB VEY08266
Isolement	Sec classe F
Enroulement	Aluminium classe E ₂ , C ₂ , F ₁
Puissance nominale	1250KVA
Puissance de secondaire	630/630KVA
Tension primaire	30.5KV
Tension de secondaire	0.315KV
courant nominale	24.6 A $\pm 2 \times 2.5\%$
Courant de secondaire	1155 A
Niveau isolement	LI 170, AC 70 KV
Couplage	DY11Y11
Tension de court-circuit	6%
Type de refroidissement	AF

3.3.2.5. Boite de raccordement

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

Leurs fonctions sont :

- Raccorder les chaînes de panneaux entre elles.
- Protéger les chaînes de panneaux et les intervenants des risques électriques et atmosphériques.
- Assurer l'acheminement du courant produit vers les postes de conversion (transformateur, onduleur).

Une vue d'une boîte jonction de la centrale est donnée à la figure 3.12 et celle d'une boîte parallèle à la figure 3.13, tandis que les caractéristiques techniques des deux boîtes sont données au tableau 3.5.

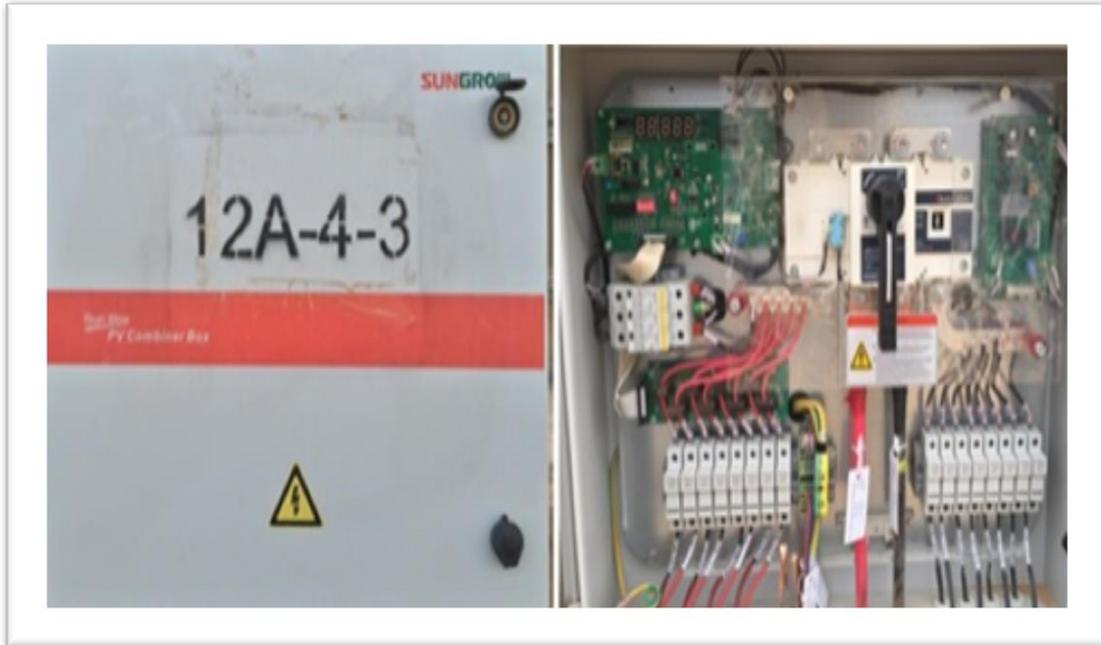


Figure 3.12. Boîte de jonction

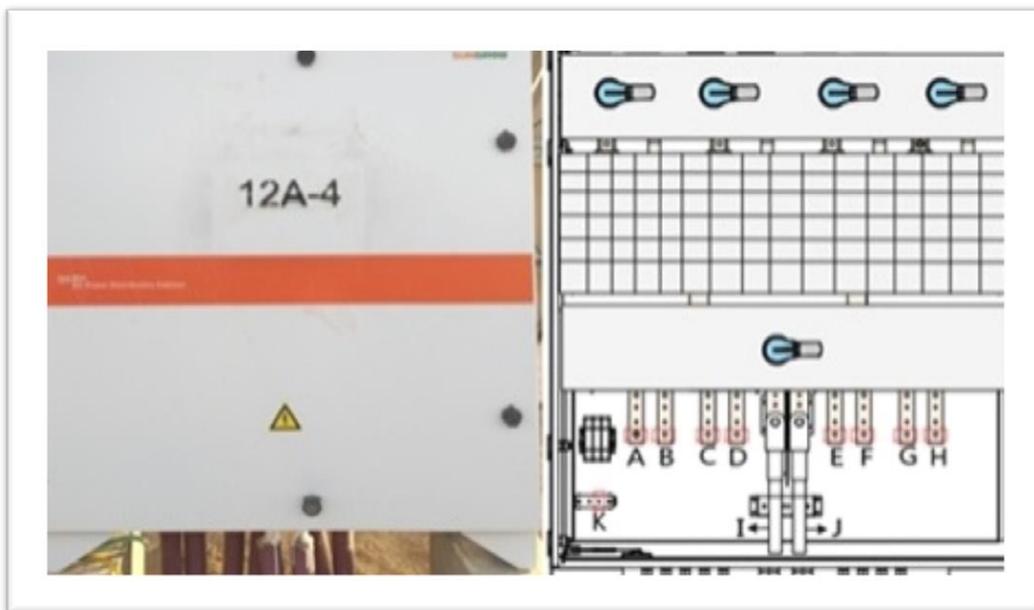


Figure 3.13. Boîte parallèle

Tableau 3.5. Caractéristique de la boîte parallèle et la boîte de jonction

	B parallèle	B de jonction
Marque	SUNGROW	SUNGROW
Modèle	PMD-D125K	PMD-D500K
Puissance nominale	125Kw	500Kw
Tension Max DC	1000V	1000V
Max N°d'entrée DC	4	4
Protection IP	IP65	IP20
Température ambiante	-25°C à +60°C	25°C à +60°C

3.3.2.6. 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

Le rôle du poste d'évacuation est de :

- 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).

Une vue et le schéma du poste sont donnés à la figure 3.14.



Figure 3.14. Schéma de la cellule MT de la centrale d'Adrar

3.3.2.7. 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) 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).

3.3.2.8. Maintenance et équipements de nettoyage

Un programme détaillé de maintenance est fournis par le constructeur YSH (YinglySolar/Sinohydro/Hydro China), contenant les horaires de la vérification préventive des équipements. Le constructeur YSH a fournis pour le nettoyage, un camion avec des kitcher annuels 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 (cf : figure 3.15).



Figure 3.15. Equipement de nettoyage

3.3.3 Raccordement de la centrale 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.

- Du côté continu, il faut protéger l'installation contre le court-circuit 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.

3.4. Simulation du fonctionnement de la centrale PV sous

Matlab/Simulink

La modélisation et la simulation d'une telle centrale dans l'environnement Matlab/Simulink, permet de l'étudier aisément et de prévoir certains dysfonctionnements bien avant sa réalisation.

Compte tenu de la structure de la centrale, composée de 20 sous champs PV et utilisant 40 onduleurs de 500 kW (donc en réalité 40 sous champs PV identiques), nous avons donc modélisé et simulé le fonctionnement d'un seul sous champ PV sous Matlab/Simulink.

3.4.1. Modélisation du champ PV

A partir de l'équation (2.1) du chapitre 2 et les équations suivantes (3.1) (3.2) (3.3) (3.4), on peut déduire l'équation (3.5) pour un champ PV.

Pour un champ en a :

$$\bullet \quad I_{Champ} = N_p * I_{Module} \quad (3.1)$$

$$\bullet \quad V_{Champ} = N_s * V_{Module} \quad (3.2)$$

$$\bullet \quad R_{S/Champ} = N_s * R_{S/Module} \quad (3.3)$$

$$\bullet \quad R_{Sh/Champ} = N_s * R_{Sh/Module} \quad (3.4)$$

$$I_{Champ} = N_p I_{Ph} - N_p I_0 \left[\exp \left(\frac{\frac{V}{N_s} + I_m * \frac{R_S}{N_p}}{n * N_s * \frac{K * T_c}{q}} \right) - 1 \right] - \frac{N_p V_m + I_m * N_s R_S}{N_s R_{Sh}} \quad (3.5)$$

Où :

- I_{Champ} est le courant de champ,
- V_{Champ} la tension de champ,
- I_{Ph} : le photo-courant d'un panneau,
- q : la charge d'électron,
- n : Facteur d'idéalité,
- K : Constante de Boltzman,
- T_c : Température de la cellule,
- V_m : la tension aux bornes de module,
- I_m : le courant module,
- R_s : résistances série, R_{sh} : résistance shunt du module.
- N_p , N_s sont respectivement le nombre de module en parallèle et en série

3.4.2. Simulation

Après avoir modélisé le sous champ PV, nous avons effectué la simulation de son fonctionnement. Pour cela nous avons implémenté les modèles obtenus dans Simulink.

➤ Implémentation du champ PV sous Simulink

L'équation de la caractéristique tension-courant du champ PV donnée par l'équation (3.5) est représentée sous Simulink par la Figure (3.16)

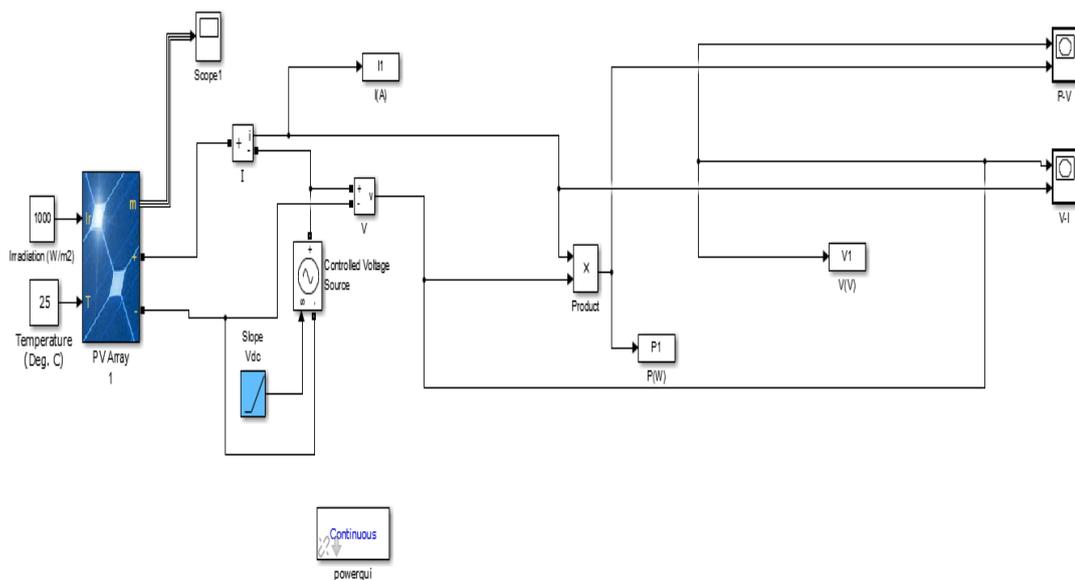


Figure 3.16. Simulation des caractéristiques I(V) et PV d'un champ PV sous Simulink

➤ **Implémentation sous Simulink du système complet :**

La figure suivante représente le système complet d'un champ PV raccordé à une charge de puissance de 500kW.

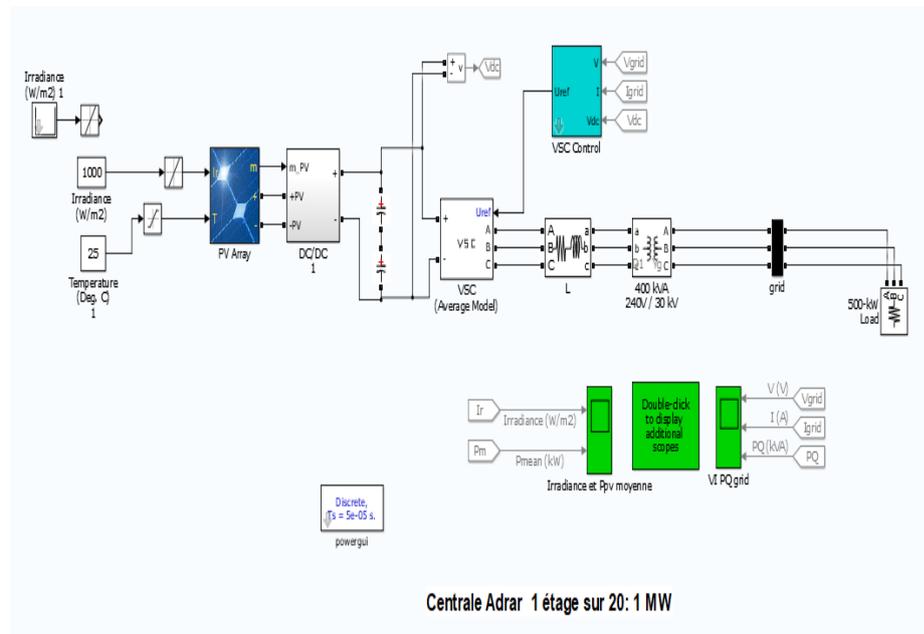


Figure3.17. Schéma du système complet sous Simulink

3.4.3. Résultats et analyses

Les simulations faites permettent d'obtenir les courbes I-V et P-V du champ PV pour différents éclaircissements et températures. La Figure 3.19. Illustre l'évolution du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différentes valeurs de l'ensoleillement à une température $T = 25^{\circ}\text{C}$.

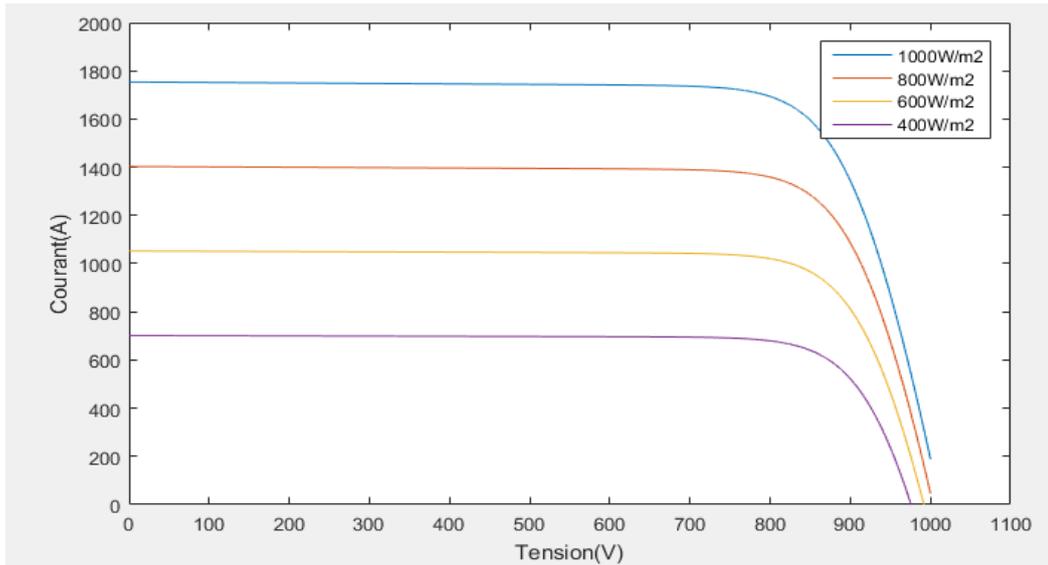


Figure 3.18. Caractéristiques I(V) du champ PV pour une variation de l'éclairement

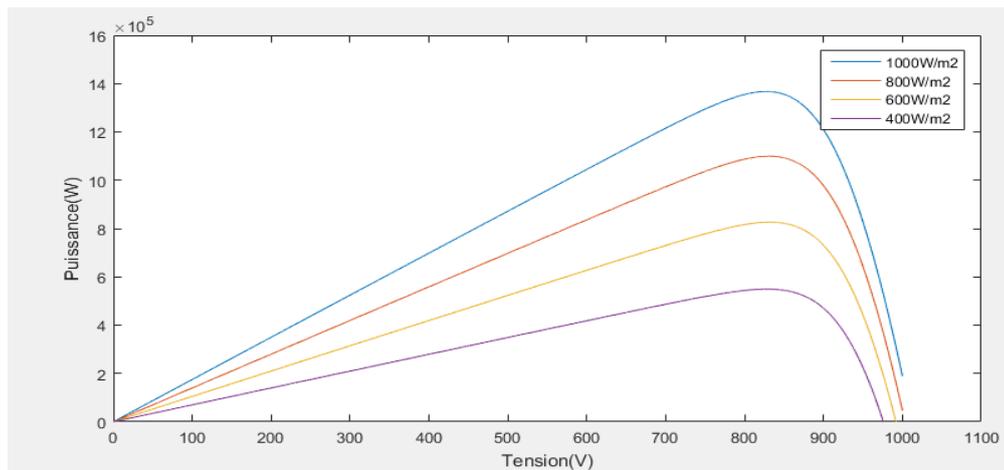


Figure 3.19. Caractéristiques P(V) du champ PV pour une variation de l'éclairement

On observe que lorsque $G = 400 \text{ W/m}^2$, 600 W/m^2 , 800 W/m^2 et 1000 W/m^2 , les puissances maximales respectives du champ PV sont de 200kW, 300kW, 400kW et 500kW.

La puissance maximale du champ PV croît avec l'ensoleillement respectivement. Il en est de même pour le courant qui croît avec l'éclairement.

Pour voir l'influence de la température nous avons tracé les courbes I-V et P-V du champ PV pour une irradiation $G = 1000 \text{ W/m}^2$ et des températures différentes. Elles sont présentées sur la Figure 3.20.

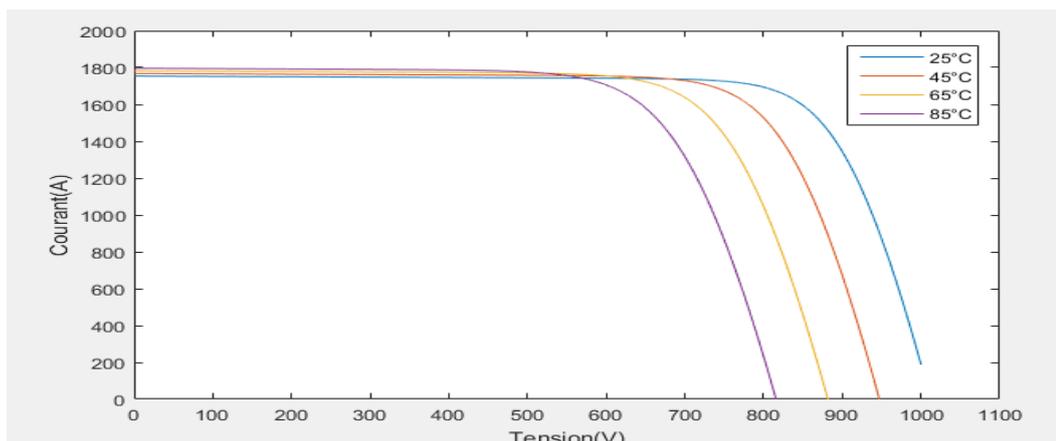


Figure 3. 20. Caractéristiques statiques I(V) lors d'une variation de la température ambiante

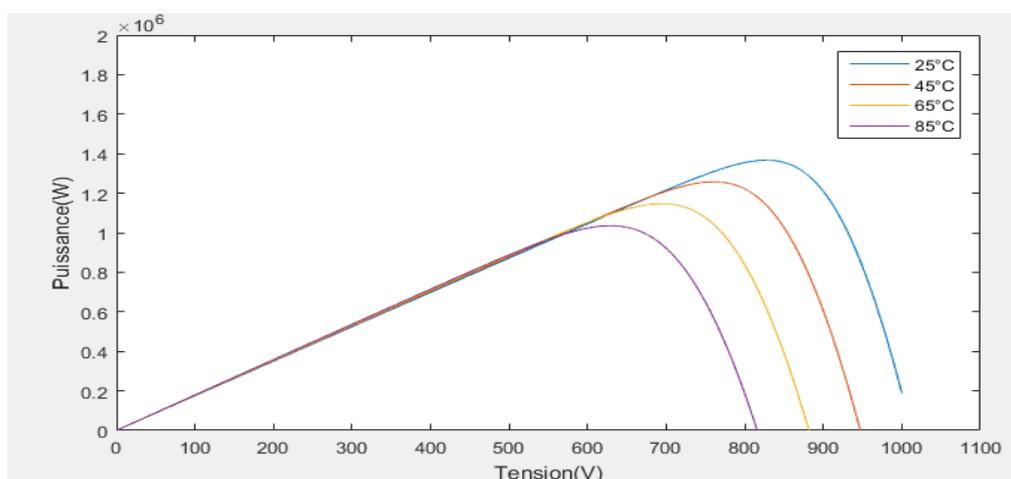


Figure 3.21. Caractéristiques statiques P(V) lors d'une variation de la température ambiante

On observe que lorsque $T= 25^{\circ}\text{C}$, 45°C , 65°C et 85°C les tensions maximales du champ PV sont respectivement 925 V, 870V, 800 V et 745 V.

La tension décroît lorsque la température augmente. Il en est de même pour la puissance maximale qui décroît avec la température.

Et lorsque $T = 25^{\circ}\text{C}$, nous remarquons que la puissance maximale du champ PV est égale 500K qui correspond à la puissance maximale P_{MPP} .

- La puissance moyenne avec irradiation de $1000\text{W}/\text{m}_2$ et une température de 25°C

La simulation faite permettant aussi d'obtenir la puissance moyenne à la sortie de champ PV à l'aide d'une commande MPPT qui nous a permis de chercher le point de puissance maximale qui est fourni par le champ photovoltaïque à l'irradiation $1000\text{W}/\text{m}_2$ et une température de 25°C .



Figure 3.22. La puissance moyenne à 25°C et irradiation de $1000\text{W}/\text{m}_2$

On observe sur la figure 3.22 à $t = 0,5\text{ s}$ MPPT est activé et puissance se stabilise autour de la puissance maximale (588 kW)

- La puissance moyenne avec irradiation variable et une température de 25°C

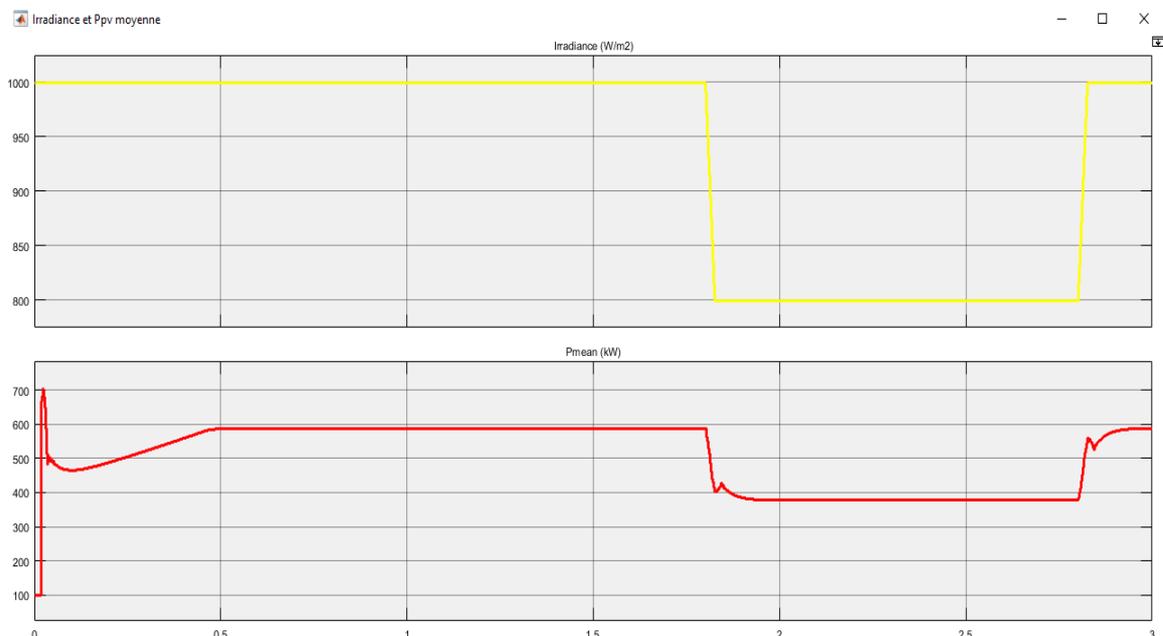


Figure 3.23. La puissance moyenne à 25°C et irradiation variable

- A $t = 1,8\text{ s}$ quand l'éclairement est diminué à $800\text{ W}/\text{m}_2$, la puissance $P_{\text{mean}} = 381\text{ kW}$.

- On note que le MPPT continue à suivre la puissance maximale lors de ce changement d'éclairage rapide.

En place entre la sortie de l'onduleur et la phase de réseau un filtre qui permet à l'onduleur de fournir au réseau des courants ou tension quasi sinusoïdaux, la figure 3.24 et la figure 3.25 représente le courant et la tension triphasée qui va injecter au réseau.

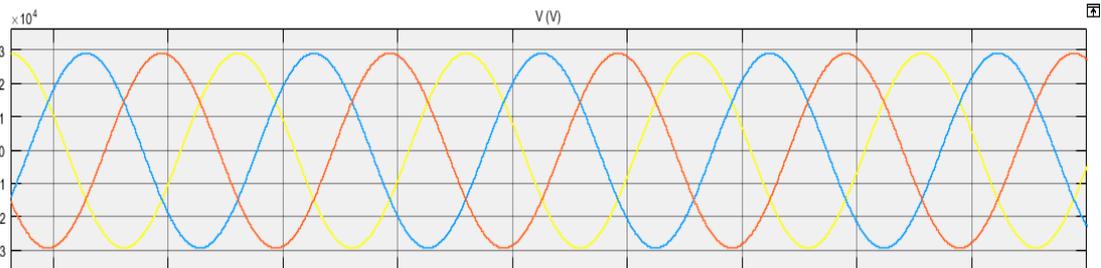


Figure 3.24.les tension à la sortie de l'onduleur

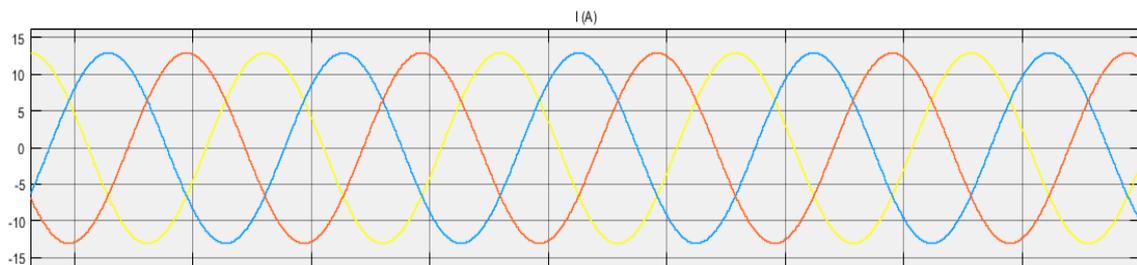


Figure 3.25 les courants à la sortie de l'onduleur

On observe que la forme du courant et de la tension fourni au réseau et le courant et la tension fourni sont sinusoïdaux et équilibrées, et de même fréquence de 50Hertz

Telle que a $t=1.499s$:

- la valeur maximum de la tension est 29260V.
- La valeur max de courant est 130A
- La puissance réactive injecté au réseau :

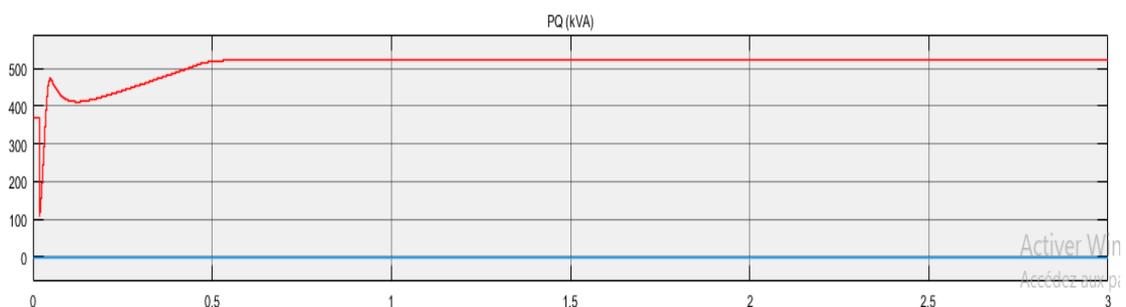


Figure 3.26. La puissance réactive à injecté au réseau.

La figure 3.26 illustrent la puissance réactive fournit a la charge (520kVA).

3.5. Conclusion

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 la présentation de réseau électrique national algérien mais aussi à l'étude et la description détaillée de la centrale solaire d'Adrar SKTM. Le chapitre d'après est basé sur l'étude technico-économique de la même centrale effectuée avec le logiciel Retscreen Expert

Chapitre 4

Etude technico-économique de la centrale d'Adrar

4.1. Introduction

Dans ce chapitre nous allons simuler une centrale Photovoltaïque et on analyse une possible économie d'énergie qui soit importante, ainsi que la possibilité de réduction de l'émission de GES (gaz à effet de serre).

La simulation de l'installation à Adrar en utilisant le logiciel RETScreen Expert qui aide les décideurs à déterminer rapidement et à peu de frais si un projet d'énergie renouvelable, d'efficacité énergétique est financièrement et techniquement viable.

4.2. Présentation du logiciel Retscreen Expert

Afin de tirer profit des technologies d'énergies propres, les utilisateurs, décideurs, responsables politiques, planificateurs, investisseurs et fournisseurs d'équipements potentiels doivent être en mesure d'analyser facilement et rapidement le bienfondé d'une proposition de projet d'énergies propres. Ce type d'analyse devrait permettre, avec un minimum d'effort et d'investissement en temps, de révéler si oui ou non un projet potentiel d'énergies propres est suffisamment prometteur pour mériter une étude plus poussée. Le logiciel RETScreen Expert répond à toutes ces exigences. RETScreen Expert est un modèle mathématique complexe pour évaluer la production d'énergie, les économies des coûts, les réductions d'émissions, la viabilité financière, et de risque pour les différents types des énergies propres et technologies. Chaque modèle de technologie d'énergie propre RETScreen Expert a été développé dans un classeur Microsoft Excel individuel. Chaque classeur est ensuite composé d'une série de feuilles de calcul ont un aspect commun et suivent une démarche normalisée, commune à tous les modèles RETScreen Expert [34].

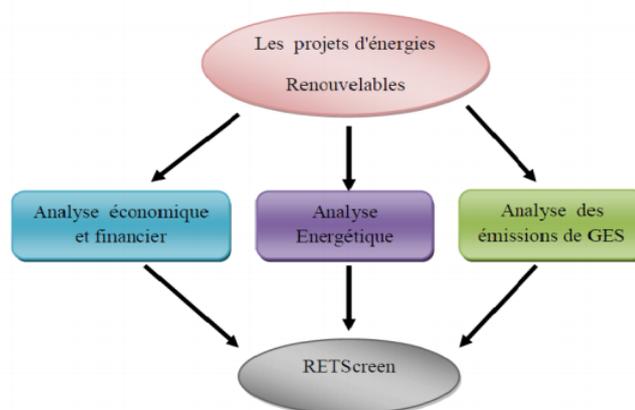


Figure 4.1. Les axes d'analyse d'énergie renouvelable par RETScreen Expert

4.3. Etude technico-économique

4.3.1. Analyse technique

4.3.1.1. Région et ses paramètres

La centrale photovoltaïque 20 MW d'Adrar/Touat se trouve à 10 km du chef-lieu de la wilaya. Le tableau 4.1 ci-dessous donne les données météorologiques calculées par le logiciel RETScreen Expert du site d'étude.

Le tableau 4.1. Données météorologiques calculées par le logiciel Retscreen du site d'étude.

	Lieu des données climatiques	Lieu des installations
Latitude	27.9	28.1
Longitude	-0.2	1.1
Zone climatique	Très chaud Sec	
Élévation	283 m	444 m
Amplitude des températures de sol	27 °C	

La région d'Adrar a un climat désertique chaud et sec typique de la zone saharienne hyperaride, c'est-à-dire du cœur du Sahara, avec un été torride, très long et un hiver court, tempéré chaud. La figure 4.2 représente les données météorologiques de la Nasa pour le site d'Adrar pendant une année (2016) où on remarque que la valeur moyenne mensuelle du rayonnement solaire horizontal pour cette année est de 6.24 kWh/m²/j et la moyenne de la température de l'air est de 24.4°C.

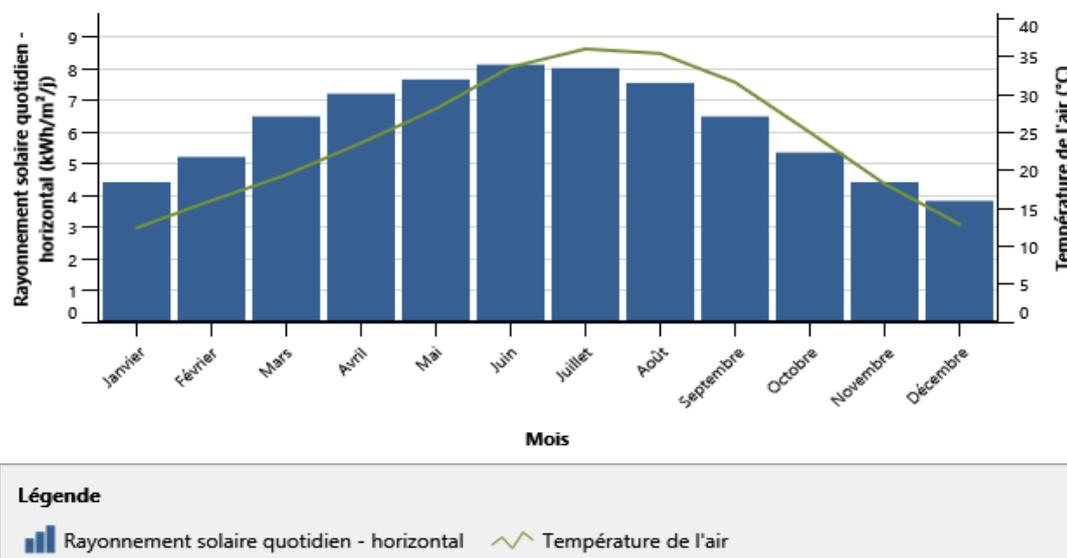


Figure 4.2. Les données climatiques du site

4.3.1.2. Les paramètres techniques de la centrale électrique

En se fondant sur les renseignements (facteur d'utilisation et la taille de la centrale qui est 20MW) fournis à Retscreen Expert, le logiciel peut calculer la quantité d'électricité transférer au réseau qui vaut 36486MWh.

Cette partie de l'étude sert à effectuer une analyse technique détaillée, en présentant en détail les équipements les plus importants de la centrale d'étude. Le tableau qui suit résume ses informations.

Tableau 4.2. Données générales des équipements de l'installation.

Les équipements	Centrale d'Adrar 20MW	
Le champ PV	Type	Poly-si
	Marque	Yingli Solar
	Puissance d'un module	245
	Nombre de module	81840
	Capacité électrique produite	36486 MWh
	Rendement	15%
	Superficie	40 hectares
	Tension de système Max	1000 V
Les onduleurs	Capacité	500 KW
	Quantité	40
	Température de fonctionnement	-30°C à +55°C
	Rendement	99%
Les transformateurs	Type	élévateur 315 V/30 KV
	Quantité	40
	Puissance nominal	1250 KVA

4.3.2. Analyse environnementale (Emission à effet de serre)

Les gaz à effet de serre (GES) sont des gaz qui absorbent une partie des rayons solaires en les redistribuant sous la forme de radiation au sein de l'atmosphère terrestre. Le dioxyde de carbone est principalement issu de la combustion des énergies fossiles (pétrole, charbon...) et de la biomasse.

L'analyse faite à l'aide de logiciel RETScreen Expert établit la différence en matière d'émission entre le cas proposé (qui est notre centrale Photovoltaïque) et le cas de référence qui est une centrale de type diesel de même puissance. D'après le calcul du modèle de RETScreen Expert, la centrale d'Adrar permettrait d'éviter de produire pas moins de **33198.5 tCO₂/an**. Cela est équivalent à 77 205.9 barils de pétrole brut non consommés, comme le montre la figure 4.3.



**33 198,5 tCO₂ est équivalente à 77 205,9
Barils de pétrole brut non consommés**

Figure 4.3. L'équivalent de la réduction annuelle nette d'émissions de GES de cas proposé en barils brut de pétrole.

Donc, au terme de sa durée de vie, cette centrale éviterait **995955 tCO₂** et économiserait l'équivalent de 2316177 barils de pétrole brut.

Le facteur d'émissions GES, émissions de GES cas de référence, émissions de GES cas proposé, réduction annuelle brute d'émissions de GES sont calculés par le logiciel RETScreen comme indiqué sur le tableau 4.3.

Tableau 4.3. Données du cas de référence et résultats du cas proposé

			Facteur d'émission GES tCO₂/MWh
Cas de référence	35697.4	tCO ₂	0.978
Mazout (#6)			
Cas proposé	2498.8	tCO ₂	
Photovoltaïque			
Réduction annuelle brut d'émission GES	33198.5	tCO ₂	

La figure suivante représente la feuille de calcul « Analyse des réductions d'émissions ».

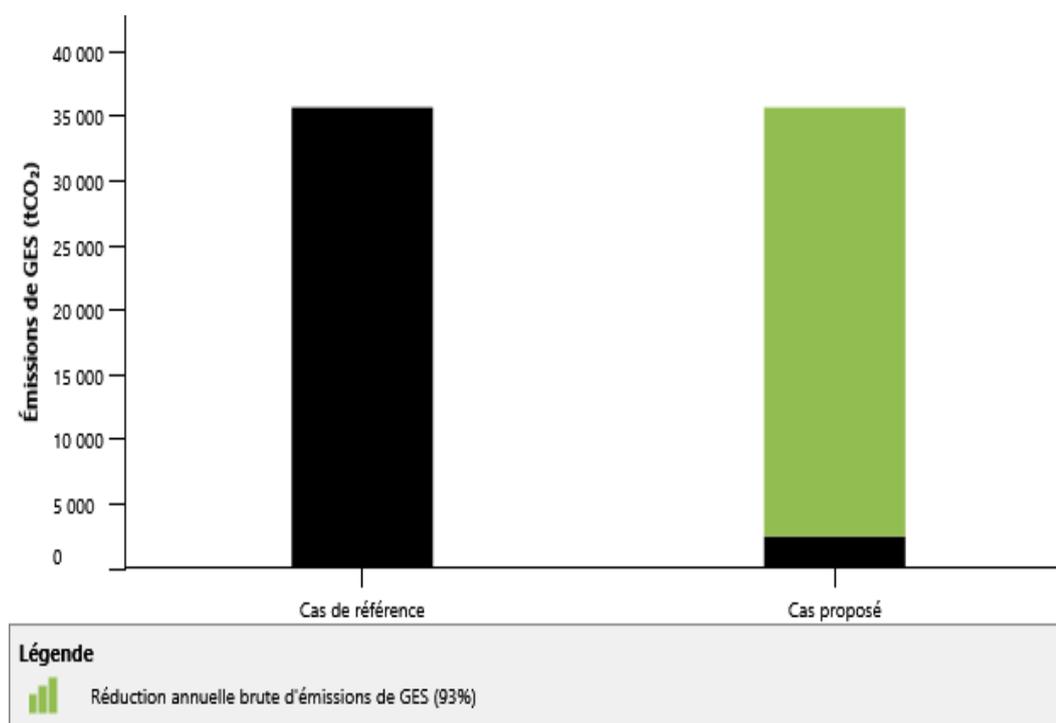


Figure 4.4. Comparaison des émissions de GES entre le cas de référence et le cas proposé.

On constate que le pourcentage de la réduction annuelle brute d'émissions de GES par rapport à une centrale conventionnelle (cas de référence) est de 93%.

4.3.3. Analyse financière :

4.3.3.1. Paramètres financiers

La rubrique "Paramètres financiers" permet d'insérer les données relatives à l'aspect financier du projet, à savoir :

- ❖ **le taux d'inflation** : c'est le taux annuel moyen d'augmentation du coût évité en énergie prévu sur la durée de vie de notre projet, on l'a fixé à 2%.
- ❖ **la durée de vie du projet** : 30 ans
- ❖ **le ratio d'endettement** : nous avons choisi d'investir 30 % d'argent propre et on a emprunté le capital nécessaire restant (70%).
- ❖ **La durée d'emprunt** : Nous avons finalement choisi de nous baser sur une durée de remboursement de 15 ans après un renseignement sur les procédures générales lors de la réalisation d'une étude d'un tel projet avec un taux d'intérêt sur la dette de 7%.

4.3.3.2. Cout, économie et revenus

Le tableau 4. 4. suivant présente les coûts obtenus en détails après l'analyse financière.

Tableau 4.4. Cout, économie, revenue

Cout, économie, revenue	
Couts d'investissement	
Cout d'investissement 100%	5 942 937 016 DZD
<hr/>	
Total des couts d'investissement 100%	5 942 937 016 DZD
Flux monétaire annuels	
Frais annuels et paiements de la dette	
Coûts d'exploitation et entretien (économies)	33 556 658DZD
Paiements de la dette - 15 ans	456 751 777DZD
<hr/>	
Total des frais annuels	490 308 435DZD
Économies et revenus annuels	
Revenu d'exportation d'électricité	540 583 743 DZD
Revenu pour réduction de GES	0 DZD
Total des économies et des revenus annuels	540 583 743DZD
<hr/>	
Flux monétaire annuel net - An 1	50 275 308DZD
Viabilité financière	
avant impôt - capitaux propres	11,9%
avant impôt – actifs	4,3%
Retour simple	11,7 an
Retour sur les capitaux propres	13,6 an

D'après les résultats obtenus avec RETScreen Expert, si on choisit, parmi les différents indicateurs financiers, le flux monétaire annuel net par An, à titre d'exemple, qui est égale à 50 275 308DZD /an, on peut dire que notre centrale Photovoltaïque est financièrement rentable au long de sa durée de vie.

4.3.3.3. Sensibilité et risque

La dernière feuille de calcul sur RETScreen Expert est « Analyse de sensibilités et de risques » qui nous permet de trouver les paramètres qui ont une influence importante sur le Retour sur les capitaux propres.

La figure 4.5 suivante montre l'effet relatif de la variation des paramètres clés effectués sur la variabilité de retour des capitaux propres (cout d'investissement).

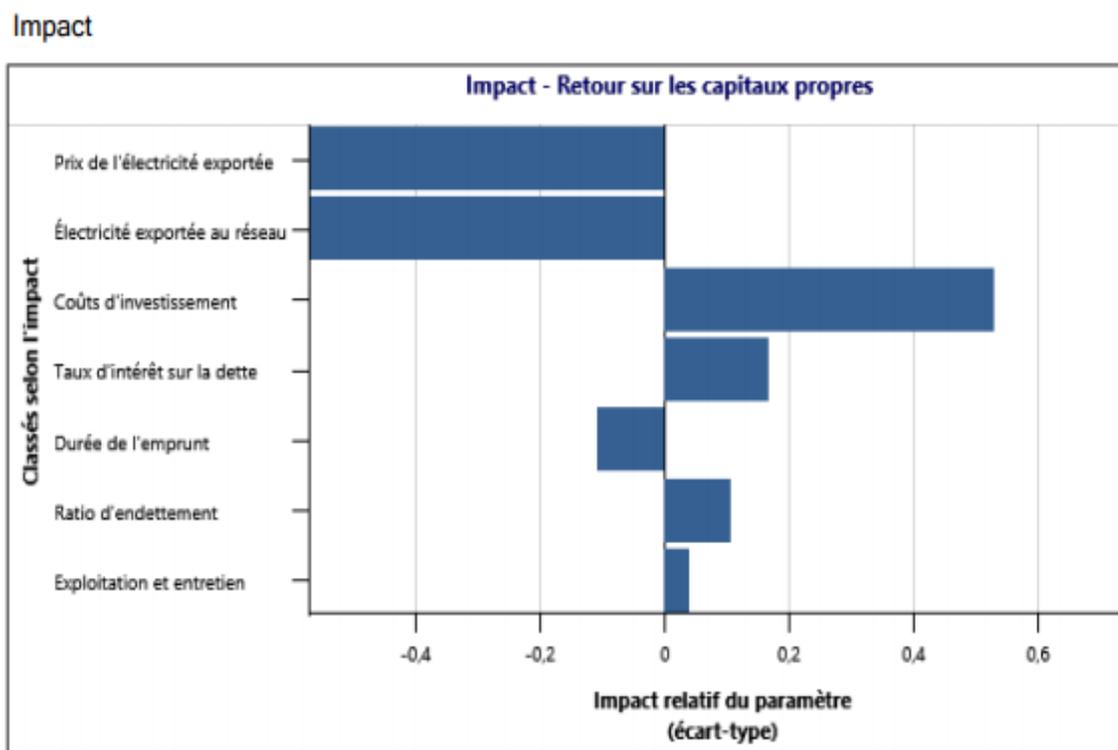


Figure 4.5. L'impact des paramètres clés de la centrale sur le retour d'investissement.

Pour les paramètres donnés, plus que l'écart type est grand plus que l'impact de ce paramètre sur la variabilité de l'indicateur financier est plus importante.

Les paramètres qui influent sur le « retour sur les capitaux propres » sont :

- La quantité d'électricité exportée au réseau.
- Le prix de l'électricité.
- Le cout d'investissement.

Le modèle d'analyse financière sur un intervalle de confiance de 25 % est montré dans le tableau 4.5.

Tableau 4.5. L'impact des paramètres techniques et financiers sur une plage de 25 %.

Paramètres	Unité	Valeur	plages	Minimum	Maximum
Coûts d'investissement	DZD	5942937	25%	4 457 202	7428671
Exploitation et entretien	DZD	33 556 658	25%	25 167 493	41 945 822
Electricité exporté au réseau	MWh	36 486,48	25%	27 364,86	45 608,10
Prix de l'électricité exportée	DZD/MWh	14 816,00	25%	11 112,00	18 520,00
Ratio d'endettement	%	70,0	25%	52,5%	87,5%
Taux d'intérêt sur la dette	%	7,00%	25%	5,25%	8,75%
Durée de l'emprunt	An	15	25%	11	19

En fonction des résultats obtenus pour la plage de confiance choisie (25%), le modèle financier de RETScreen Expert nous a défini un niveau de risque de 10%, que nous jugeons acceptable pour la centrale.

4.3.3.4. Flux monétaire

Afin d'évaluer économiquement notre centrale, on a établi les hypothèses suivantes :

- L'année d'investissement initial est l'année Zéro;
- Les coûts et les crédits sont donnés pour l'année Zéro, et par conséquent, le taux d'inflation est appliqué à compter de l'année Une;
- Le calcul des flux monétaires est effectué à la fin de l'année.

❖ Flux monétaire annuel

Le flux monétaire annuel net avant impôt est un diagramme qui estime, pour chaque année, les sommes d'argent déboursées ou rentrées (la différence entre le flux sortant et le flux entrant) avant impôt, tout le long de vie de la centrale d'étude. D'après la figure suivante, nous remarquons que le cout d'investissement est représenté par le flux monétaire de l'année zéro c'est-à-dire le début de fonctionnement de la centrale, ensuite à partir de la première année le flux s'accroît lentement les quinze premières années à cause du paiement des dettes. Dès la seizième année le revenu s'améliore d'une façon considérable.

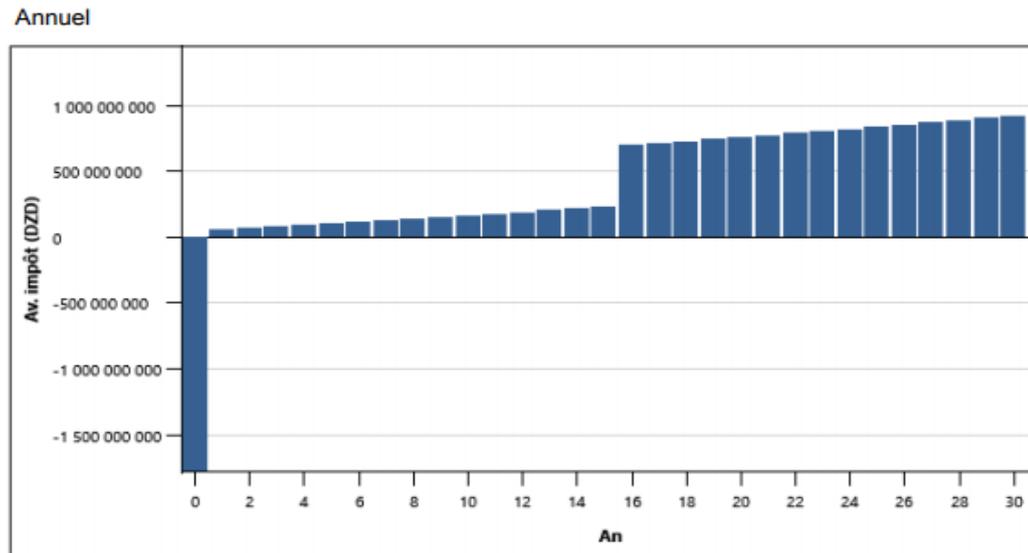


Figure 4.6. Flux monétaire annuel

❖ Flux monétaire cumulatif

RETScreen Expert présente les résultats de l'analyse financière sous forme d'analyse des coûts globaux du projet sur son cycle de vie, ce qui permet de réaliser une juste comparaison entre les technologies d'énergies propres et leurs correspondants conventionnels.

Les résultats des flux monétaires cumulatifs sont montrés à la figure 4.7, ils sont produits par RETScreen Expert pour le scénario de base, sans subvention et en considérant que le taux d'indexation des combustibles soit égal à zéro, c'est-à dire le prix des combustibles reste constant pour les 30 ans prochains (la durée de vie du projet).

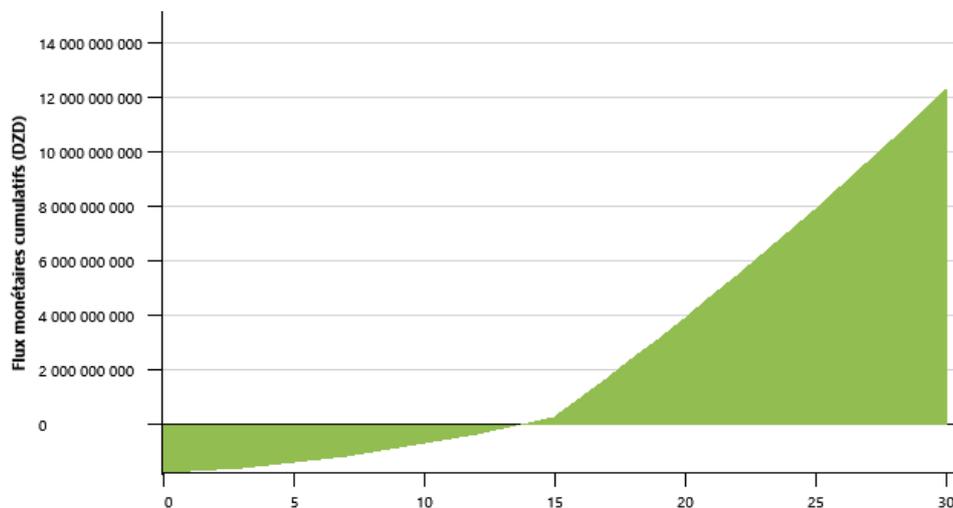


Figure 4.7. Flux monétaire cumulatif

On remarque que le graphique des flux monétaires cumulatifs est divisé en trois parties :

- La première partie (0 ans à 13 ans) : dans cette partie, le graphique des flux monétaires cumulatifs est négatif parce que les coûts de l'installation de PV sont supérieurs aux bénéfices tirés du projet, où en l'année 12 on récupère le coût initial du projet.
- La deuxième partie (13 ans à 15ans) : le graphique des flux monétaires cumulatifs s'accroît lentement parce que durant cette période le paiement des intérêts est toujours en cours.
- La troisième partie (15 ans à 30 ans) : pour cette partie le graphique des flux monétaires cumulatifs est positif et augmente rapidement parce que les bénéfices tirés du projet sont supérieurs aux coûts du projet.

4.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude technico-économique de la centrale photovoltaïque 20 MW connectée au réseau isolé d'Adrar de 30 KV, à l'aide du logiciel de calcul et de gestion d'énergies propres RETScreen Expert.

D'après cette étude, notre centrale photovoltaïque produit une énergie électrique exportée au réseau de 36486 MWh par an. Pour un coût d'investissement de 5 942 937 016 DZD et un prix de vente d'un kWh égale à 14.816 DZD, on aura une rente de 50 275 308 DZD par année. Du côté environnemental, la centrale PV permet d'éviter plus de 33 100 tCO₂ par an. Les résultats qu'on a trouvés prouvent la rentabilité de projet et justifie ainsi son inscription dans le programme national de développement des énergies renouvelables.

Conclusion générale

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

Notre étude a porté sur l'analyse des systèmes photovoltaïques de puissances raccordés au réseau de distribution, nous avons présenté la centrale photovoltaïque que nous avons étudiée (Centrale de 20MW d'Adrar) et défini les différents composants de la centrale. Puis à l'aide du logiciel MATLAB/Simulink, nous avons simulé les caractéristiques électriques d'un sous champ et le fonctionnement d'un sous-système complet.

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

Justement, pour approfondir cet aspect technico-économique, nous avons réalisé, dans la dernière partie (chapitre 4), une étude compète de la centrale d'Adrar en utilisant le logiciel RETScreen Expert. Nous avons conclu que les systèmes PV raccordés au réseau, non seulement permettraient de réduire le coût de l'installation, en supprimant le coût des batteries, car le stockage ne sera plus nécessaire, mais surtout de générer des profits après une période moyennement courte, ce qui amortirait le prix d'investissement initial. C'est donc une solution réellement économique pour couvrir les besoins de base en électricité. L'autre aspect très important abordé dans cette étude est l'impact environnemental où nous constaté que la centrale PV étudiée permet une réduction importante des émissions de gaz à effet de serre (GES) en la comparant à un cas de référence qui est une centrale Diesel de même puissance.

A l'issue de cette étude, nous pouvons conclure que les projets d'envergure, de même type que la centrale PV d'Adrar, son à encourager et généraliser, notamment dans les régions éloignées du grand sud.

Référence

- [1] Alain Bourque, Les changements climatiques et leurs impacts, open edition journals vol 1 N°2, septembre 2000.
- [2] Emissions gap report 2019, UN environnement programme, 26 novembre 2019.
- [3] Mélissa Petrucci, Énergie solaire : Le futur est aux innovations, les-smartgrids, 12 juin 2017.
- [4] Eric desrosiers, Les énergies renouvelables moins chères que tout autre carburant fossile, Le Devoir ,3 juin 2020.
- [5] <https://www.statista.com/statistics/270281/electricity-generation-worldwide/>
- [6] <http://ressources.univ-lemans.fr/AccesLibre/UM/Pedago/physique/02/electri/faraday.html>
- [7] <https://www.statista.com/statistics/269811/world-electricity-production-by-energy-source/#statisticContainer>
- [8] <https://www.statista.com/statistics/238610/projected-world-electricity-generation-by-energy-source>
- [9] PHOTOVOLTAICS REPORT, Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, ISE with support of PSE Projects GmbH, 16 September 2020.
- [10] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=electricite-et-gaz#>
- [11] <https://www.usthb.dz/fr/page/66>
- [12] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>
- [13] Programme National des Energies Renouvelables 2015-2030 Présenté par Monsieur TOUMI Abdallah Bakir Chef de département maintenance-SKTM.Spa (filiale de SONELGAZ).
- [14] <http://www.andi.dz/index.php/fr/les-energies-renouvelables>
- [15] Oriol Planas - Ingénieur Technique Industriel, spécialité mécanique, Energie solaire, variations du rayonnement solaire, 25 octobre 2019, <https://lenergie-solaire.net/>
- [16] www.doc-developpement-durable.org
- [17] Bouchaker amir Abderaouf, BENBRINIS Mouad, Structure et Commande d'une installation photovoltaïque en site isolé, mémoire de master Université Badji Mokhtar – Annaba, 2018.

Référence

- [18] A. Ould Mohamed Yahya, A. Ould Mahmoud et I. Youm. Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque, Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008).
- [19] Bendjamâa Ibrahim « Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque » mémoire de magistère, ABOU-BAKR BELKAID _TLEMCEM 2012.
- [20] A. Sahli, « Filtrage actif et contrôle de puissances : application aux systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau », Mémoire de Magistère, Université de Sétif, 2012.
- [21] R.Merahi, R. Chenn, M. Houbes, Modélisation et Simulation d'un Module PV par MatLab, Journal of Scientific Research N° 0 vol. 1 (2010), pp 223-227.
- [22] MECHALIKH M.Nadjib, HAMADACHaraf Eddine « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau » mémoire de Magistère, Université KASDI MERBAH – OUARGLA, 2013.
- [23] W. Boucheritte, « Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau», Mémoire de Magistère, Université de Biskra, 2013.
- [24] MISSOUM MOHAMMED, Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie, mémoire de Magistère Université Hassiba Benbouali de Chlef, 2011.
- [25] M. R. Yaiche, A. Bouhanik, S M A. Bekkouche & T. Benouaz, Revised solar maps of Algeria based on sunshine duration. Energy Conversion and Management 82, (2014).
- [26] Nordine Grim, Énergie solaire: L'Algérie enfin déterminée à exploiter son énorme potentiel, Algérie-Eco, 04 avril 2018.
- [27] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>
- [28] <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/solar>.
- [29] <https://www.sonlgaz.dz/fr/category/qui-sommes-nous?fbclid=IwAR0Byx9hUq4c0ugdLVmhz3Xa79H8IL34CmhTS0qD5D5Fny0mooFmbw6L53k>
- [30] Assistante du PDG Chargée des Relations avec les Médias Sonlgaz. Rapport annuel et comptes de gestion consolidés du Groupe Sonlgaz. Groupe Sonlgaz, 2015.
- [31] Présentation de SKTM : <http://www.sktm.dz/?page=article&id=11>

Référence

- [32] Société de distribution en électricité et du gaz à l'ouest SDO. Philosophie de réglage des protections à SDO, rapport technique du groupe Sonelgaz, 2008.
- [33] Lyes ABBASSEN. Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque. Thèse de doctorat, Université Mouloud Maamri de TiziOuzou, 2011.
- [34] RETScreen Expert, Logiciels d'analyse de données et outils de modélisation : www.rncan.gc.ca