الجممورية الجزائرية الديمتراطية الشعبية وزارة التعليو العالبي والبدش العلمي **UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA** جامعة باجي مختار – عنابـــة BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY Faculté : TECHNOLOGIE Département : ÉLECTROTECHNIQUE Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES Filière : ÉLECTROTECHNIQUE Spécialité : RÉSEAUX ELECTRIQUES Mémoire Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master Thème: TITRE : L'Impact économique de l'Intégration de Système Photovoltaïque au Réseau Electrique Présenté par : BELABED Mounir NEHALA Nardjes Grade : MCA Université: UBMA Encadrant : KSENTINI Abdelhamid Jury de Soutenance : Pr Président LABAR Hocine UBMA **KSENTINI** Abdelhamid MCA UBMA Encadrant **BENALIA** Nadia UBMA MCB Examinateur

Année Universitaire : 2022/2023





Avant tout nous tenons nos remerciements à notre Dieu de nous avoir donné le courage et la volonté pour Accomplir ce travail.

A la suite nous tenons à remercier vivement Mr KSENTINI ABDLHAMID notre encadreur qui a fourni des efforts énormes, par se informations ses conseils et ses encouragements.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance.

Et tous les professeurs du département d'électrotechnique A tous ce qui furent à un moment ou à un autre et à tout instant partie prenante de ce travail. Nos plus chaleureux remerciements à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.



Avec l'aíde d'Allah le tout puíssant, ce travaíl est achevé

Je le dédie à toutes personnes qui me sont chère ; À ma chère **Mère**, et mon cher **Père**

À mon Fiancé Seif Eddine

À ma seule sœur **Issra**

À mes frères Raouf, Khalíl et Abdel Allah

À mon encadreur Dr. Ksentíní A/H,

À tous mes professeures,

À chère bínôme Mounír

A mes amies : **Khaoula, Iman, Chaíma, Safaa,** merci pour tous ces moment símple quí devenus inoubliable À ma chère **Tante**, Et touts les personnes qui ont m'aider à faire ce travail.

Nardjes





Université Badji Mokhtar- Annaba

Faculté de technologie

Département d'Electrotechnique





Résumé sur le travail de mémoire de Master

Filière : Electrotechnique Spécialité : Réseaux électriques

Intitulé du mémoire :

L'Impact économique de l'Intégration de Système Photovoltaïque au Réseau Electrique

Présentés par : BELABED Mounir NEHALA Nardjes

> Encadré par Monsieur : Mr. KSENTINI Abdelhamid

Résumé :

Les énergies renouvelables font partie des moyens importants qui contribuent à un développement efficace et durable, c'est pourquoi les chercheurs les ont développées afin d'améliorer leur consommation. Ce sont des énergies propres et peu coûteuses par rapport aux énergies fossiles.

Le sujet de notre étude tourne autour de l'énergie solaire photovoltaïque, cette énergie prometteuse résulte de la conversion de la lumière du soleil en électricité grâce à l'utilisation de cellules solaires photovoltaïques. C'est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus importantes. C'est celle qui connaît la croissance la plus rapide d'entre elles. Cette source d'énergie annonce un avenir prometteur en fournissant de l'énergie pour divers usages.

Chaque site sur Terre reçoit une quantité de lumière solaire tout au long de l'année mais la quantité de rayonnement solaire qu'un point reçoit varie d'un endroit à un autre sur la surface de la Terre et cette quantité est appelée également radiation photoélectrique. Elle est émise par le soleil sous forme de lumière que les technologies d'énergie solaire capturent et convertissent en formes d'énergie utiles.

L'objectif de cette recherche est l'intégration des systèmes photovoltaïques via la connexion aux réseaux électriques. Ils seront utilisés à des fins industrielles et domestiques.

Mots clés : énergies renouvelables , photovoltaïque , réseaux électriques



Université Badji Mokhtar- Annaba

Faculté de technologie

Département d'Electrotechnique



Résumé sur le travail de mémoire de Master

Filière : Electrotechnique Spécialité : Réseaux électriques

Intitulé du mémoire :

L'Impact économique de l'Intégration de Système Photovoltaïque au Réseau Electrique

Présentés par : BELABED Mounir NEHALA Nardjes

Encadré par Monsieur : Mr. KSENTINI Abdelhamid

خلاصة

الطاقات المتجددة من الوسائل المهمة المساهمة في التنمية الفعالة والمستدامة لهذا قام الباحثون بتطوير ها من اجل تحسين استهلاكها كونها طاقة نظيفة و غير مكلفة بالمقارنة مع الطاقة الاحفورية.

موضوع دراستنا يتمحور حول الطاقة الشمسية الكهروضوئية هذه الطاقة الواعدة الناتجة عن تحويل أشعة الشمس إلى كهرباء عن طريق استخدام الخلايا الشمسية الكهروضوئية، وتُعدَّ إحدى أهم مصادر الطاقة المتجددة، والأسرع نمواً من بينها؛ حيث تَعِد بمستقبل واعد في توفير الطاقة للاستعمالات المختلفة.

يتلقّى كل موقع على الأرض كمية من ضوء الشمس على مدار العام، إلّا أنّ كمية الإشعاع الشمسي التي تتلقاها بقعة واحدة تختلف من مكان إلى آخر على سطح الأرض، وتُسمى تلك الكمية الإشعاع الشمسي الذي يُعرف أيضاً بالإشعاع الكهروضوئي؛ حيث ينبعث من الشمس على شكل ضوء تلتقطه تقنيات الطاقة الشمسية، وتحوله إلى أشكال مفيدة من الطاقة.

لهدف من هذا البحث هو إدماج الأنظمة الكهروضوئية من خلال توصيلها بالشبكات الكهربائية التي تستخدم بدور ها للأغراض الصناعية و المنزلية .

كلمات مفتاحية: الطاقات المتجددة والطاقة الكهر وضوئية شبكات كهربائية







Faculté de technologie

Département d'Electrotechnique

Résumé sur le travail de mémoire de Master

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Intitulé du mémoire :



L'Impact économique de l'Intégration de Système Photovoltaïque au Réseau Electrique

Présentés par : BELABED Mounir NEHALA Nardjes

> Encadré par Monsieur : Mr. KSENTINI Abdelhamid

Abstract

Renewable energy is among the important means that contribute to effective and sustainable development. That is why researchers developed them in order to improve their consumption. They are clean and inexpensive energy compared to fossil energy.

The subject of our study revolves around photovoltaic solar energy, this promising energy resulting from the conversion of sunlight into electricity through the use of photovoltaic solar cells. It is one of the most important renewable energy sources, and the fastest growing among them. As it promises a promising future in providing energy for various uses.

Every site on Earth receives a quantity of sunlight throughout the year, but the amount of solar radiation that one spot receives varies from one place to another on the surface of the Earth, and that amount is called solar radiation, which is also known as photoelectric radiation. Where it is emitted from the sun in the form of light that solar energy technologies capture, and convert it into useful forms of energy.

The aim of this research is the integration of photovoltaic systems via connection to electrical networks, which in turn are used for industrial and domestic purposes.

Keywords: renewable energies, photovoltaic energy, electrical networks

Résumé	
Introduction Générale	1
1. Généralités	1
2. Problématique	3

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

I.1. Introduction	. 4
I.2. Les différentes formes des énergies	. 4
L3. Types d'énergies	4
L3.1. Energie non renouvelable	. 4
I.3.2. Energie renouvelable	. 4
I.4. Les différents types d'énergie renouvelable	5
I.4.1. L'énergie de la biomasse	. 5
I.4.2. L'énergie géothermique	. 6
I.4.2.1. Principe de fonctionnement	6
I.4.3. L'énergie des mers ou énergie marine	7
I.4.4. L'énergie éolienne	. 7
I.4.4.1. Principe de fonctionnement	8
I.4.5. L'énergie hydraulique	8
I.4.5.1. Principe de fonctionnement des centrales hydrauliques	9
I.4.6. L'énergie solaire	. 10
I.5. Les avantages des énergies renouvelables	. 10
I.6. Rayonnement solaire	10
I.6.1. Différentes composantes du rayonnement solaire	. 11
I.6.1.1. Le rayonnement direct	11
I.6.1.2. Le rayonnement diffus	11
I.6.1.3. Le rayonnement réfléchi	11
I.6.1.4. Le Rayonnement global	12
I.6.2. Rayonnement solaire et son utilisation	. 12
I.7. Les différents types d'utilisation de l'énergie solaire	13
I.7.1. L'énergie passive	. 13
I.7.2. L'énergie solaire thermique	14
I.7.2.1. L'énergie solaire thermique à basse température	. 15

I.7.2.2. L'énergie solaire thermique à haute température	15
I.7.3. L'éclairage naturel	16
I.7.4. L'énergie thermodynamique	17
I.7.5. L'énergie solaire photovoltaïque	18
L8. Situation de l'Algérie	18
I.9. potentiel solaire en Algérie	19
I.10. Raccordement de photovoltaïque au réseau électrique	21
I.11. Les avantages de l'énergie solaire	22
I.12. Conclusion	22

Chapitre II : L'énergie photovoltaïque

II.1. Introduction	23
II.2. L'énergie solaire photovoltaïque	23
II.3. Effet photovoltaïque	24
II.4. Les avantages de l'énergie solaire photovoltaïque	24
II.5. Le panneau solaire	25
II.5.1. Fabrication de panneau photo voltaïque	25
II.5.2. Principe de fonctionnement de panneau solaire	26
II.5.3. Les caractéristiques électriques du panneau solaire	27
II.5.4. Types de panneaux solaires	28
II.5.4.1. Le Monocristallin	28
II.5.4.2. Le Poly-cristallin	29
II.5.4.3. Les panneaux Amorphes	30
II.5.5. Association en série et en parallèle des modules PV	31
II.5.5.1. Mise en série	32
II.5.5.2. Mise en parallèle	34
II.6. Constitution d'un champ photovoltaïque	35
II.6.1. Le Champ photovoltaïque	36
II.6.2. Onduleur	36
II.6.2.1. Critère de choix d'un onduleur	36
II.6.2.2. Type onduleur	36
II.6.3. Régulateur	37
II.6.3.1. Choix et compatibilité	37
II.6.4. Batterie	38
II.6.4.1. Les deux principales caractéristiques des batteries	38

II.6.4.2. Les différents types de batteries	38
II.7. Les différentes installations photovoltaïques	40
II.7.1. Les installations sur site isolé	40
II.7.2. Les installations raccordées au réseau de distribution public	40
II.7.2.1. Solution avec injection totale	41
II.7.2.2. Solution avec injection de surplus	42
II.8. Système photovoltaïque (PV)	42
II.8.1. Classification des systèmes PV	43
II.8.1.1. Systèmes autonomes	43
II.8.1.2. Systèmes PV à injection aux réseaux	44
II.9. Intégration du photovoltaïque au réseau électrique	46
II.9.1. Interaction entre le réseau de distribution et les systèmes PV	46
II.9.1.1. Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de	
distribution	47
II.9.1.2. Influence du réseau de distribution sur le fonctionnement des	
installations photovoltaïques	47
II.9.2. Impact des installations PV sur le réseau public de distribution	48
II.10. Conclusion	50

Chapitre III : Modélisation et commande d'un système Photovoltaïque

III.1. Introduction	51
III.2. Modélisation du rayonnement solaire	51
III.2.1. Le Spectre de rayonnement solaire	51
III.3. Modélisation des systèmes photovoltaïque	54
III.3.1. Modélisation du champ photovoltaïque	54
III.3.1.1. Modèle d'une cellule photovoltaïque	55
III.3.1.2. Modèle d'un module photovoltaïque	65
III.3.1.3. Modèle d'un champ photovoltaïque	65
III.3.2. Modélisation de la Conversion statique	66
III.3.2.1. Hacheur DC/DC	66
III.3.2.2. Onduleur	69

72
73
74
74
76
79
79
79
81
82

Chapitre IV : Simulation d'un Système PV Connecté au Réseau

IV.1. Centrale photovoltaïque de 400 kW connectée au réseau	84
IV.1.1. Résultats de simulation	86
VI.2. Conclusion	93
Conclusion Générale	94
Références Bibliographiques	

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

Figure I.1 : Les différents types d'énergie renouvelable Figure I.2 : Principe de fonctionnement de la biomasse Figure I.3 : Principe de la géothermique Figure I.4 : Conversion de l'énergie cinétique du vent Figure I.5 : Principe de fonctionnement de l'éolienne Figure I.6 : L'énergie Hydraulique Figure I.7 : Principe de fonctionnement des centrales hydroélectriques Figure I.8 : Spectre du rayonnement solaire Figure I.9 : Différents composants du rayonnement Figure I.10 : Les trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné Figure I.11 : Utilisation du rayonnement solaire Figure I.12 : Le chauffage de la maison par énergie solaire passive Figure I.13 : Énergie solaire thermique Figure I .14 : Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique à base température Figure I.15 : Centrale thermodynamique parabolique Figure I.16 : Centrale thermodynamique à tour Figure I.17 : Centrale thermodynamique cylindre-parabolique Figure I.18 : L'éclairage naturel Figure I.19 : Utilisations de l'énergie solaire Figure I.20 : Energie solaire photovoltaïque Figure I .21 : Irradiation solaire globale reçue par l'Algérie : moyenne annuelle Figure I .22 : Potentiel solaire économique des pays les plus actifs Figure I.23 : Potentiel solaire technique en Algérie Figure I.24 : Le cout du potentiel solaire dans le monde Figure I.25 : Raccordement de photovoltaïque au réseau électrique

Chapitre II : L'énergie photovoltaïque

- Figure II.1 : Energie solaire photovoltaïque
- Figure II.2 :L'effet photovoltaïque
- Figure II.3 : Étapes de fabrication d'un panneau solaire
- Figure II.4 : Différentes composants de panneau photovoltaïque
- Figure II.5 : Principe de fonctionnement de panneau solaire
- Figure II.6 : Les caractéristiques électriques du panneau solaire
- Figure II.7 : Types de panneaux solaires
- Figure II.8 : Panneau Monocristallin
- Figure II.9 : Panneau poly- cristallin
- Figure II.10 : Panneau silicium amorphe

Figure II.11 : Association en série et en parallèle des modules PV

- Figure II.12 : Branchement de panneau solaire en série
- Figure II.13 : Mise en série des panneaux solaires
- Figure II.14 : Les caractéristiques électriques (U et I) des modules branchés en série
- Figure II.15 : Branchement de panneaux solaire en parallèle
- Figure II.16 : Mise en parallèle des panneaux solaires
- Figure II.17 : Les caractéristiques électriques (U et I) des modules branchés en Parallèle
- Figure II.18 : Champ photovoltaïque
- Figure II.19 : Régulateur de charge solaire
- Figure II.20 : Batteries au plomb fermées
- Figure II.21 : Batteries NIHM
- Figure II.22 : Batteries Li-ions
- Figure II.23 : Installation sur site isolé
- Figure II.24 : Exemple des installations photovoltaïques
- Figure II.25 : L'injection d'énergie dans les réseaux
- Figure II.26 : Injection énergie supplément dans le réseau
- Figure II.27 : Système photovoltaïque plus détaillé
- Figure II.28 : Schéma d'un système autonome (hors-réseau)
- Figure II.29 : Système de Pompage PV
- Figure II.30 : A) Injection partielle
- Figure II.31 : B) Injection totale
- Figure II.32 : Installation solaire à injection réseau avec deux compteurs d'énergie.
- Figure II.33 : Détermination de la chute de tension dans une ligne en présence de Pv
- Figure II.34 : Schéma simplifié du courant de fuite via les capacités des panneaux Pv, la Terre et l'onduleur

Chapitre III : Modélisation et commande d'un système Photovoltaïque

- Figure III.1 : Schéma synoptique du système Photovoltaïque
- Figure III.2 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM
- Figure III.3 : Spectres Solaires en plusieurs conditions de AM.
- Figure III.4 : Schéma d'application de l'effet photovoltaïque
- Figure III.5 : Circuit équivalent d'une cellule PV Model idéal
- Figure III.6 : Circuit équivalent d'une cellule PV -Rs-Model -
- Figure III.7 : Circuit équivalent d'une cellule PV -Rs-Model -
- Figure III.8 : Modèle d'une cellule PV –Rs-Model –

- Figure III.9 : la caractéristique I-V d'une cellule solaire
- **Figure III.9.1 :** Fluctuations de la courbe I-V pour T constante (T=25C°) et G variable
- **Figure III.9.2 :** Fluctuations de la courbe I-V pour G constante (G=1000w/m2) et T variable
- Figure III.10 : la caractéristique P-V d'une cellule solaire
- Figure III.10.1 : l'influence du flux sur la caractéristique P= f (V) d'un module
- Figure III.10.2 : l'influence de la Température sur la caractéristique P= f (V) d'un module
- Figure III.11 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série
- Figure III.12 : Caractéristiques résultant d'un groupement de np cellules en parallèle
- Figure III.13 : Schéma Bloc d'un Module photovoltaïque
- Figure III.14 : Schéma Bloc d'un Champ photovoltaïque
- Figure III.15 : Principe de base d'un hacheur.
- Figure III.16 : Hacheur Boost
- Figure III.17 : Caractéristique I-V du PV superposé de la charge
- Figure III.18 : la conductance vu bornes du générateur Pv
- Figure III.19 : Modèle du concept de la commande P&O
- Figure III.20 : Algorithme P&O
- Figure III.21 : Topologies des systèmes photovoltaïques connectés à un réseau
- Figure III.22 : Classement des onduleurs photovoltaïques
- **Figure III.23 :** Topologie d'un convertisseur Boost et schéma bloc d'une boucle a verrouillage de la tension V_{PV}
- Figure III.24 : Caractéristique de la puissance d'un module PV
- Figure III.25: Boucles de commande de l'étage DC/AC
- Figure III.26 : Boucle de régulation de la tension continue
- Figure III.27 : Boucles de commande de l'étage DC/AC
- Figure III.28 : Structure de principe d'une PLL triphasée
- Figure III.29 : Structure du PLL utilise
- Figure III.30 : Circuit de puissance et commande d'un système PV triphasé connecté au réseau électrique
- Figure III.31: Bilan de puissance dans le bus continu
- Figure III.32: Schéma de principe de la commande du hacheur pour limiter la tension du bus continu
- Figure III.33: Tension du bus continu
- Figure III.34: Puissance du panneau PV
- Figure III.35: Tension du panneau PV
- Figure III.36: Puissance sortie de l'onduleur

Chapitre IV : Simulation d'un Système Pv Connecté au Réseau

Figure IV.1 : Générateur GPV de 100 kW + Hacheur Figure IV.2 : Schéma bloc/Simulink d'une centrale Pv de 400 kW connectée au réseau HTA 25 kV Figure IV.3.a : Caracteristiques I-V et P-V en fonction de la température Figure IV.3.b : Caracteristiques I-V et P-V en fonction de l'ensoleillement Figure IV.4.a : Allure du Courant du GPV avec variation la température et ensoleillement constant Figure IV.4.b : Allure de la tension du GPV avec variation température et ensoleillement constant Figure IV.5.a : Allure du Courant du GPV avec variation de l'ensoleillement et température constante Figure IV.5.a : Allure de la tension du GPV avec variation de l'ensoleillement et température constante Figure IV.6.a : Allure de la tension DC bus avec variation de la température Figure IV.6.b : Allure de la tension DC bus avec variation de l'ensoleillement Figure IV.7.a : Allure du courant réseau avec variation température Figure IV.7.b : Allure du courant réseau avec variation de d'ensoleillement Figure IV.8.a : Allure de la puissance injecté dans le réseau avec la variation de la température Figure IV.8.b : Allure de la puissance injecté dans le réseau avec la variation de d'ensoleillement Figure IV.9.a : Allure de la tension réseau avec variation de la température Figure IV.9.b : Allure tension réseau avec variation de d'ensoleillement

Chapitre II : L'énergie photovoltaïque

Tableau II.1. Différents types d'onduleurs

Chapitre IV : Simulation d'un Système Pv Connecté au Réseau

Tableau IV.1 : Caractéristique du module

- **EnR** : Energie Renouvelable.
- **PV**: Photovoltaïque.
- GPV : Générateur Photovoltaïque
- **R** : la résistance totale de la ligne du réseau
- *X* : la réactance totale de la ligne du réseau
- *PG* : Puissance active fournie par PV
- *QG* : Puissance réactive fournie par PV
- *PL* : Puissances active de consommation
- QL : puissance réactive de consommation
- QC : est la puissance réactive du dispositif de compensation éventuel
- *E_{ph}* : représente la quantité d'énergie,
- λ : la longueur d'onde,
- h: la constante de Planck (6.63.10–34 *J.S*)
- *c* : la vitesse de la lumière.
- *I* : courant fourni par la cellule
- *I_{ph}*: photo-courant de la cellule proportionnel à l'éclairement (G)
- I_{θ} : courant de saturation inverse de la diode.
- V_T : Potentiel thermodynamique.
- *K* : la constante de Boltzmann (1.38.10-23 Joules/Kelvin).
- *T* : la température de la cellule en Kelvin.
- q: la charge d'un électron =1,6.10-19C
- A : le facteur d'idéalité de la jonction (la diode)
- V : la tension aux bornes de la cellule
- R_S : La résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions.
- *Rp* : Résistances shunt de la cellule
- *I*_{pho} : le photo- courant générer par la lumière au STC.
- *Ki* : coefficient température en court-circuit I_{sc}, fourni par le fabricant sur la fiche technique
- Kv: coefficient de température en circuit-ouvert V_{oc}, fourni par le fabricant sur la fiche technique
- $T_{ref}(T_n)$: Température de la cellule en STC (298 en Kelvin/ 25 ° C)
- *T* : Température de la cellule en STC (en Kelvin)
- *G*: L'éclairement énergétique solaire ou souvent nommé l'irradiation qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface [W/m2]..
- Go: (1000 W/m²) : est l'éclairement énergétique au STC. L'éclairement de référence
- *I*_{sco} : le courant de court circuit aux conditions normales STC
- E_g : Energie de la bande de jonction
- α : Facteur exposant
- Ta : La température ambiante
- *K1, K2 et K3* : sont des constantes dépendant de la nature de matériau de la cellule et déterminées expérimentalement par le constructeur.

 α : le rapport cyclique sortie de l'MPPT

Vo : la tension de sortie du convertisseur Boost.

Io : le courant de sortie du convertisseur Boost.

V : valeur efficace de la tension du réseau Vres

 $\boldsymbol{\theta}$: angle de synchronisation, donnée par PLL

*L*ond : résistance de l'onduleur

Rond : inductance de l'onduleur

FF : Facteur de forme

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

P&O : Méthode de Perturbation et Observation

PLL : Méthode " boucle à verrouillage de phase " (Phase Locked Loop)

Introduction Générale

1. Généralités :

En raison de sa nature propre, de la diminution des réserves des ressources conventionnelles (pétrole, gaz, etc...), de la croissance démographique et économique et devant l'émergence de nouvelles industries en amont, l'énergie photovoltaïque est devenue une source très prometteuse pour les pays en développement.

De nos jours, l'irradiation solaire qu'on peut recevoir sur le plan horizontal est estimée à 1.367 kW/m^2 . Le développement des capteurs photovoltaïques atteint aujourd'hui, ne permet dans les meilleurs des cas, de transformer en électricité que les 20% de cette énergie. Plus de 80% sont perdus par dissipation de chaleur sur les panneaux solaire installés. Economiquement parlant, cette proportion très importante du manque à gagner motivent encore plus les recherches et attirent l'investissement.

En effet, au cours des dernières années, d'importants capitaux on été injectés dans les différents secteurs industriels autour de la photovoltaïque (PV) dans le cadre de programmes nationaux de transition énergétique. En conséquence la production d'énergie PV s'est développée rapidement.

Bien que renouvelable, disponible en quantité inépuisable et gratuite, sa collecte ne demandant qu'un investissement en matériel et en équipement électrique, cependant, les efforts pour réduire le prix du kWh/ photovoltaïque, actuellement de l'ordre de 0,3 \$, sont timorés et sapent aujourd'hui les opportunités de sa promotion au première rang dans le classement des sources alternatives.

C'est une source intermittente : la puissance dépend de l'irradiation solaire. Cette caractéristique influence négativement le réseau électrique. Dans des perspectives de son intégration aux réseaux, elle a fait l'objet de nombreuses études en la matière. Le raccordement des systèmes PV au réseau de distribution peut avoir divers impacts sur le fonctionnement du réseau de distribution :

- Variation de tension ;
- Déséquilibre de tension entre phases ;
- Injection d'harmoniques au réseau si les onduleurs ne sont pas munis de filtres efficaces ;
- Interactions harmoniques entre onduleurs à travers le réseau ;
- Injection de courant continu au réseau ;
- Courants de fuite ;
- Accroissement des pertes ;

C'est pourquoi, l'objectif de ce mémoire est de mesurer l'impact de l'intégration des systèmes PV afin de pouvoir :

- Réduire le coût total du système PV;
- Augmenter les performances des onduleurs PV raccordés au réseau ;
- Augmenter le taux de pénétration des systèmes PV.

Plus que l'apport en production (réduction de pics de consommation) qu'offrent les systèmes PV raccordés au réseau, les 'services système' apportés sont aussi importants notamment en : gestion de congestion, respect du plan de tension par régulation, absorption/production de puissance réactive selon le besoin, tenue aux creux de tension, amélioration de la qualité de l'énergie.

Dans ce mémoire, on va donc étudier plus particulièrement

• Les interactions entre systèmes PV et le réseau

Cela passe par :

- La modélisation du système PV raccordé au réseau
- la simulation du comportement du système
- La proposition d'une des solutions expérimentées (contrôle/commande intelligent) qui traite de capacité de tenue aux creux de tension.

Ce mémoire comporte 4 chapitres :

Le premier chapitre est une introduction générale aux énergies renouvelables qui sont communément nommées ressources alternatives et parmi lesquelles figure l'énergie solaire la plus intéressante appelée rayonnement solaire.

Le deuxième chapitre présente l'état de l'art de la production PV sous l'aspect de développement du marché mondial et de son impact sur le réseau de distribution.

Le troisième chapitre concerne la modélisation et la commande des systèmes PV : modèles détaillés et simplifiés. Les modèles détaillés sont utilisés pour développer les méthodes avancées de contrôle/commande.

Le dernier chapitre IV nous présenterons les résultats de la simulation sous Matlab d'une station de production d'énergie photovoltaïque connectée au réseau HTA et l'interprétation des résultats qui reflètent l'impact de l'intégration des générateurs photovoltaïques dans le réseau et qui nous servirons, évidement dans des études ultérieures, à élaborer une approche plus appropriée sur un nouveau réseau à production décentralisée de l'énergie PDE.

2. Problématique des installations PV connectées au réseau et solutions possibles :

Contrairement aux autres sources d'énergie renouvelables, le photovoltaïque attire davantage les industriels, les chercheurs, voir les Etats. Cette particularité trouve une de ses explications dans le fait que malgré le peu de rendement atteint jusqu' à nos jours, entre 10% et 20%, le photovoltaïque est parvenu à une émergence très remarquable : près de 600 gigawatts d'énergie photovoltaïque garantissent aujourd'hui une contribution d'environ 3,6% de la production mondiale d'énergie électrique.

Paradoxalement, la plus grande part (80%) de l'énergie solaire perdue en chaleur sur la surface des panneaux solaires installés, un immense manque à gagner, reste le facteur le plus motivant pour toute les politiques des transitions énergétiques dans leur intéressement au photovoltaïque. Le photovoltaïque demeurera pour longtemps le plus grand gisement d'énergie qui mérite des investissements.

Cependant, son émergence reste encore freinée à cause de sa nature propre qui n'est pas tout à fait cohérente avec la nature des systèmes classique. En effet, les réseaux conventionnels ne sont pas assez adaptés aux spécificités des systèmes photovoltaïques en matière de gestion de l'écoulement de l'énergie via le réseau. Le comportement étrange des Système PV vis à vis des standard de la gestion des réseaux électriques, notamment dans les limites de la dynamique de ses paramètres, demeure un facteur majeur qui ralenti l'intégration de l'énergie photovoltaïque au parc énergétique.

Les multiples progrès de la recherche en amont pour l'amélioration du rendement ne peuvent aboutir fondamentalement sans le développement de nouvelles approches et de nouveaux réseaux plus adaptés aux différentes énergies alternatives. Dans les faits, la totalité de ces études de recherche contribuent à aller dans ce sens. C'est aussi dans cette perspective que nous avons orienté notre travail vers l'étude en aval de l'impact de l'intégration des systèmes PV dans le réseau et plus précisément le comportement des GPV raccordé.

La simulation des modèles des différents composants du système PV vont nous permettre de mesurer l'évolution des paramètres du système dans des situations critiques qui peuvent surgir en réalité.

Chapitre I Généralités sur les Energies Renouvelables

I.1. Introduction

L'énergie peut être définie comme la capacité à exercer une activité. Il existe de nombreuses sources énergétiques, dont les plus importantes sont la chaleur, la lumière et le vent. Il y a aussi l'énergie mécanique générée par les machines et l'énergie chimique qui résulte en l'occurrence des réactions chimiques, il y a l'énergie électrique, l'énergie hydroélectrique, l'énergie cinétique, radioactive, dynamique et atomique. L'énergie peut également être convertie d'une forme à une autre, de l'énergie chimique à l'énergie lumineuse, par exemple, de l'énergie électrique à la cinétique... La quantité d'énergie présente dans le monde est toujours conservée, car l'énergie n'est ni détruite ni créée, mais se transforme d'une forme à l'autre.

L'énergie c'est la capacité de la matière à faire un travail (mouvement). Lorsqu'elle est en action elle est appelée énergie cinétique ; l'énergie qui est liée à la situation, en réserve, elle est appelée énergie potentielle.

I.2. Les différentes formes des énergies

- Énergie chimique
- Énergie Électrique
- L'énergie d'attraction
- Énergie thermique
- Énergie solaire
- Énergie cinétique
- Énergie nucléaire
- Énergie potentielle

I.3.Types d'énergies

I.3.1. Energie non renouvelable

C'est l'énergie conventionnelle ou l'énergie qui est épuisée et comprend le charbon, le pétrole, le gaz naturel et les produits chimiques, c'est-à-dire une énergie qui ne peut pas être reconstruite ou compensée rapidement [13].

I.3.2. Energie renouvelable

Est connue sous le nom d'énergie alternative, dérivant de ressources naturelles inexploitées et inépuisables, notamment l'énergie solaire, éolienne, aérienne et l'eau. [14]

D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. L'eau des rivières faisant tourner les turbines d'un barrage hydroélectrique, le vent brassant les pales d'une éolienne, la lumière solaire excitant les photopiles, mais aussi l'eau chaude des profondeurs de la terre alimentant des réseaux de chauffage. Sans oublier ces

Chapitre I

végétaux, comme la canne à sucre ou le colza, grâce auxquels on peut produire des carburants automobiles ou des combustibles pour des chaudières très performantes. Tout cela constitue les énergies nouvelles et renouvelables, "EnR". En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes [15]



I.4. Les différents types d'énergie renouvelable :

Figure I. 1:Les différents types d'énergie renouvelable

I.4.1. L'énergie de la biomasse :

La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques pouvant se transformer en énergie. On entend par matière organique aussi bien les matières d'origine végétale (résidus alimentaires, bois, feuilles) que celles d'origine animale (cadavres d'animaux, êtres vivants du sol).

Il existe trois formes de biomasse présentant des caractéristiques physiques très variées :

- Les solides (ex : paille, copeaux, bûches) ;
- Les liquides (ex : huiles végétales, bio alcools) ;
- Les gazeux (ex : biogaz).

La biomasse est parfois considérée comme une source d'énergie renouvelable uniquement si sa régénération est au moins égale à sa consommation (par exemple, l'utilisation du bois ne doit pas conduire à une diminution du nombre d'arbres). [16].



Figure I.2 : Principe de fonctionnement de la biomasse

I.4.2. L'énergie géothermique :

La chaleur naturellement présente dans le sous-sol de notre planète représente une formidable source d'énergie. Plus on creuse profondément, plus on atteint des températures élevées. La géothermie utilise cette chaleur pour le chauffage et la production d'électricité. Selon la température des différentes couches du sol, on qualifie la géothermie de « haute énergie » (150 °C), « moyenne énergie» (entre 90 et 150 °C), « basse énergie » (entre 30 et 90 °C) et de « très basse énergie » (moins de 30 °C). Ainsi, plus on s'enfonce dans la terre, plus la température y est élevée et on pourra en faire des usages différents

• L'énergie géothermique est une puissance développée par l'exploitation de la chaleur sous la surface de la terre.

• Des puits sont utilisés pour transporter la vapeur et l'eau chaude dans les profondeurs de la terre, jusqu' à la surface. L'eau chaude utilisée fait tourner les turbines afin de produire l'énergie électrique ou chauffer des locaux.

Pour utiliser cette énergie souterraine, on envoie de l'eau froide sous la Terre. Cette eau froide se réchauffe. Elle est alors pompée et ramenée à la surface où elle est utilisée soit pour produire de l'électricité dans une centrale, soit directement en tant qu'eau chaude dans les logements (eau chaude pour la douche, les radiateurs...) [17]

I.4.2.1. Principe de fonctionnement :

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie profonde ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). Tout bêtement la chaleur du sol chauffe de l'eau que l'on envoie dans les maisons, ou la chaleur du sous-sol transforme de l'eau en vapeur qui fait tourner une turbine (figure I.3). [18]



Figure I.3 : Principe de la géothermique

I.4.3. L'énergie des mers ou énergie marine

Le terme « énergies marines » (également « thalasso-énergies » ou « énergies bleues ») est utilisé pour désigner toutes les formes d'exploitation des ressources renouvelables issues du milieu marin : marées, courants, vagues, chaleur, salinité, biomasse et enfin vents.

La planète est recouverte à plus de 70% par les océans et les mers. Ceux-ci recèlent d'énormes quantités de flux énergétiques qui ont deux origines :

L'énergie solaire qui est à l'origine des vents, de la houle, des grands courants marins et des différences de température de la mer ;

La variation de la gravitation due aux positions respectives de la Terre, de la Lune et du Soleil qui en gendres les marées.

I.4.4. L'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [20]



Figure I .4 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.4.4.1. Principe de fonctionnement :

Une éolienne est un dispositif mécanique destiné à convertir l'énergie du vent en électricité. Elle est composée des principaux éléments suivants :

A. Un mât, haut d'une centaine de mètres en moyenne, qui soutient la nacelle afin que celle-ci puisse capter des vents plus hauts donc plus forts;

B. Une nacelle, située en haut de ce mât, qui abrite notamment la génératrice ;

C. Le rotor, auxquelles sont fixées les trois pales, entrent en mouvement rotatif grâce à l'intensité du vent et fait ainsi tourner un arbre mécanique. Le multiplicateur augmente la vitesse de celui-ci, cette énergie est enfin convertie en électricité par la génératrice.

D. Une éolienne produit de l'électricité lorsque la vitesse du vent se situe entre 3 mètres par seconde (force suffisante pour entrainer la rotation des pales) et 25 mètres par seconde. Lorsque ce dernier seuil de vitesse est atteint, un dispositif présent dans la nacelle se met alors en marche, celui-ci actionne le frein du rotor ainsi qu'une modification de l'inclinaison des pales, ce qui conduit à un arrêt de la machine tant que le vent ne faiblit pas. Actionnées par le vent, les pales fixées sur le rotor entraînent une génératrice électrique installée dans la nacelle. Le courant ainsi produit, d'une tension de 400 à 690 Volts est ensuite transporté par câble souterrain jusqu'au poste de livraison. Il y est élevé à une tension supérieure (20 000 V) afin d'être injecté sur le réseau national. [21]



Figure I .5 : Principe de fonctionnement de l'éolienne

I.4.5. L'énergie hydraulique

L'eau est également une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des barrages, des moulins à eau et des systèmes

Chapitre I

d'irrigation. Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité. [22]



Figure I.6 : L'énergie Hydraulique

I.4.5.1. Principe de fonctionnement des centrales hydrauliques :

L'eau accumulée dans les barrages ou dérivées par les prises d'eau, constitue une énergie potentielle disponible pour entraîner en rotation la turbine d'une génératrice. L'énergie hydraulique se transforme alors en énergie mécanique. Cette turbine accouplée mécaniquement à un alternateur l'entraîne en rotation afin de convertir l'énergie mécanique en Énergie électrique. [23]

La puissance disponible résulte de la conjonction de deux facteurs :

- A. hauteur de la chute d'eau,
- **B.** débit de la chute d'eau.





I.4.6. L'énergie solaire :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m²) répartie sur tout le spectre de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année.

La plupart des utilisations de l'énergie solaire sont directes, comme en agriculture, à travers la photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et chauffage. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité encore importante arrive à la surface du sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m² dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m² lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau. [24]

I.5. Les avantages des énergies renouvelables

Les avantages des énergies renouvelables sont nombreux, car ces dernières sont en général propres, sûres et surtout, elles existent en quantité illimitée parmi lesquelles on peut citer :

- La sûreté est l'un des avantages principaux, car il existe de très faibles risques d'accident ;
- Elles génèrent également peu de déchets, et ces déchets sont parfois recyclables;
- La décentralisation des énergies renouvelables est aussi un facteur positif très important pour développer certains territoires et le développement local ;
- Ces énergies renouvelables permettent de réduire considérablement l'émission de CO2 ;
- L'énergie nucléaire ne participe pas à l'effet de serre, mais les craintes que représente cette énergie sont beaucoup plus graves comme les risques d'explosion ou d'accident, la prolifération des armes nucléaires et le sort des déchets nucléaires. [25]

I.6. Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire parvient au niveau de la terre après avoir parcouru une distance moyenne 150 x 10 6 km, il est constitué de photons aux trajectoires à peu près parallèles, la puissance de ce flux est d'environ 1367 W/m². Ce flux dit constante solaire varie légèrement au cours de l'année suivant les variations de la distance terre-soleil ($\pm 3\%$). [26]

Chapitre I

Le rayonnement solaire est constitué des photons transportant chacun une énergie Eph qui répond, elle-même, à la relation suivante :

$$E_{ph} = h * c / \lambda$$
.....(I.1)

Où

E_{ph} : représente la quantité d'énergie,

 λ : la longueur d'onde,

h : la constante de Planck (6.63.10–34 *J.S*)

c : la vitesse de la lumière.



Figure I.8 : Spectre du rayonnement solaire

I.6.1. Différentes composantes du rayonnement solaire :

I.6.1.1. Le rayonnement direct :

Les rayons du soleil atteignent le sol sans subir de la modification (sans diffusion par l'atmosphère). Les rayons restent parallèles entre eux [27].

I.6.1.2. Le rayonnement diffus :

En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire rencontre des obstacles tels que les nuages, la poussière, etc. Ces obstacles ont pour effet de repartir un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux dans toutes les directions. [27]

I.6.1.3. Le rayonnement réfléchi :

Le rayonnement solaire réfléchi est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement dépend de l'albédo du sol et il peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige)



Figure I.9 : Différents composants du rayonnement

I.6.1.4. Le Rayonnement global :

Une surface horizontale :

C'est l'ensemble du rayonnement d'origine solaire qui parvient sur une surface horizontale sur le globe terrestre. Il comprend donc la composante verticale du rayonnement solaire direct et rayonnement solaire diffus.

Une surface inclinée :

Le rayonnement global sur une surface inclinée est la somme des rayonnements : Direct, Diffus et Réfléchi.



Figure I .10 : Les trois composantes du rayonnement solaire global sur un plan incliné.

I.6.2. Rayonnement solaire et son utilisation :

Elle est d'une importance majeure pour la vie sur terre. Le rayonnement solaire est en effet :

• Energie rayonnante qui rend possible la vie sur Terre d'une part par apport d'énergie thermique (chaleur, qui permet la présence d'eau à l'état liquide et de vapeur) et d'autre part en tant que source d'énergie lumineuse (lumière) ;

- Nécessaire à la photosynthèse (utilisée par les végétaux, mais aussi par les lichens et certains micro-organismes). La lumière solaire est ainsi à l'origine de la quasi-totalité des réseaux trophiques (et de l'essentiel du carbone fossile) ;
- La chaleur apportée par le soleil a un effet synergique qui renforce l'effet désinfectant des UV solaires, mais quand le ciel est lumineux mais couvert, cet effet disparaît.



Figure I .11 : Utilisation du rayonnement solaire.

I.7. Les différents types d'utilisation de l'énergie solaire

Il existe différents types d'énergies solaires que nous allons les citer puis les expliquer :

- L'énergie passive ;
- L'énergie thermique ;
- L'éclairage naturel ;
- L'énergie thermodynamique ;
- L'énergie photovoltaïque ;

I.7.1. L'énergie passive

L'énergie solaire passive est une technique qui vous permet d'exploiter directement l'énergie solaire sans avoir à la traiter. Par exemple, selon la conception de la construction des bâtiments, la quantité d'énergie naturelle utilisée peut être considérablement améliorée.

L'énergie solaire passive utilise des composants pour contrôler la chaleur générée par le soleil. Par exemple: la construction de murs, planchers, plafonds, fenêtres, éléments extérieurs de bâtiment et aménagement paysager. [28]



Figure I .12 : Le chauffage de la maison par énergie solaire passive.

I.7.2. L'énergie solaire thermique

Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique c'est-à-dire en chaleur. Cette énergie peut être utilisée directement soit pour le chauffage mais aussi pour obtenir de l'eau chaude. Le principe général est de concentrer les rayons solaires en un seul endroit. Ceux-ci sont alors piégés par des capteurs solaires thermiques vitrés qui transmettent l'énergie solaire à des absorbeurs métalliques. Ces mêmes absorbeurs réchauffent alors un réseau de tuyaux où circule un fluide caloporteur (c'est-à-dire un fluide qui reçoit de la chaleur en un point de son circuit et qui la cède en un autre point). Cet échangeur va ensuite chauffer à son tour de l'eau stockée dans un cumulus, cette même eau ira alimenter chauffe-eau (pour l'eau sanitaire) et systèmes de chauffages solaires.

[29] [30]



Figure I.13 : Énergie solaire thermique

Il existe deux types d'énergie solaire thermique :

I.7.2.1. L'énergie solaire thermique à base température

Les rayons du soleil, piégés par des capteurs thermiques vitrés, transmettent leur énergie à des absorbeurs métalliques - lesquels réchauffent un réseau de tuyaux de cuivre où circule un fluide caloporteur. Cet échangeur chauffe à son tour l'eau stockée dans un cumulus.

Un chauffe-eau solaire produit de l'eau chaude sanitaire ou du chauffage généralement diffusé par un "plancher solaire direct". [17]



Figure I .14 : Principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique à base température.

I.7.2.2. L'énergie solaire thermique à haute température

La concentration du rayonnement solaire sur une surface de captage permet d'obtenir de très hautes températures généralement comprises entre 400 °C et 1 000 °C. La chaleur solaire produit de la vapeur qui alimente une turbine qui alimente elle-même un générateur qui produit de l'électricité, c'est l'éthérodynamie que trois technologies distinctes sont utilisées dans les centrales solaires à concentration :

• Dans les concentrateurs paraboliques, les rayons du soleil convergent vers un seul point, le foyer d'une parabole. [17]


Figure I.15 : Centrale thermodynamique parabolique.

• Dans les centrales à tour, des centaines voire des milliers de miroirs (héliostats) suivent la course du soleil et concentrent son rayonnement sur un récepteur central placé au sommet d'une tour.



Figure I .16 : Centrale thermodynamique à tour.

• Troisième technologie : des capteurs cylindre-paraboliques concentrent les rayons du soleil vers un tube caloporteur situé au foyer du capteur solaire.



Figure I.17 : Centrale thermodynamique cylindre-parabolique.

I.7.3. L'éclairage naturel

L'éclairage naturel est défini par l'apport lumineux fournit par le soleil, et est source de lumière dynamique, elle varie continuellement a travers la journée. Le système doit être activé manuellement. [17]



Figure I.18 : L'éclairage naturel

I.7.4. L'énergie thermodynamique

L'énergie solaire thermodynamique est un moyen de produire de l'électricité et d'accumuler l'énergie thermique nécessaire à cette production pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, dans des centrales solaires à concentration. Le principe est de concentrer la chaleur du soleil par des miroirs pour chauffer un fluide à haute température (plusieurs centaines de degrés) afin de générer de la vapeur par

échange thermique pour ensuite produire de l'électricité au moyen d'une turbine. Le fluide utilisé peut conserver sa chaleur pendant plusieurs heures après le coucher du soleil, cela permet de produire de l'électricité en début de soirée, au moment où la consommation est la plus importante.



Figure I .19 : Utilisations de l'énergie solaire

I.7.5. L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque tire parti de l'effet photovoltaïque pour générer un courant électrique.

Ce courant qui est produit par des panneaux solaires est un courant continu, qui, correctement traité (convertis en courant alternatif), peut être utilisé pour fournir de l'électricité aux systèmes autonomes ou peut être utilisé pour l'alimentation (vendre) directement au réseau électrique. [1]



Figure I .20 : Energie solaire photovoltaïque.

I.8. Situation de l'Algérie :

A ce jour, le plus grand programme de réalisation de centrales photovoltaïques en Algérie, rentre dans le cadre d'un projet d'une capacité de 343 MW lancé par SKTM, une filiale de Sonelgaz. Ce projet a été réalisé avec succès par l'entreprise allemande Belectric qui a construit 85 MWc, et le groupement chinois Yingli Solar/Sinohydro/Cntic qui s'est vu attribuer 258 MW. Ce projet a été une réussite, ce qui a déterminé les pouvoirs publics à favoriser la place de cette technologie dans le programme de développement des énergies renouvelables [31]



Figure I .21 : Irradiation solaire globale reçue par l'Algérie : moyenne annuelle.

I.9 Potentiel solaire en Algérie

L'étude de gisement solaire est le point de départ de toute investigation dans le domaine de l'énergie solaire. Le gisement solaire est un ensemble de données décrivant l'évolution du rayonnement solaire disponible dans un lieu donné et au cours d'une période donnée. Son évolution peut se faire à partir des données de l'irradiation solaire globale. L'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde.

La durée d'insolation moyenne nationale dépasse les 2000 heures annuellement. Cette valeur peut atteindre les 3900 heures dans les hauts plateaux et le Sahara. Ainsi,

l'énergie moyenne reçue quotidiennement sur une surface inclinée à la latitude est d'environ 7 KWh/m2/jour. Elle est repartie comme suit : Au Nord : 5,6kWh/m2/jour ; Au sud : 7,2kWh/m2/jour [32]

L'Algérie dispose du potentiel solaire le plus élevé de la région du MENA et l'un des plus important au Monde :



Figure I .22 : Potentiel solaire économique des pays les plus actifs.



Figure I .23 : Potentiel solaire technique en Algérie.

Cette figure montre l'importance du potentiel sur le coût du kWh produit :



Figure I .24 : Le coût du potentiel solaire dans le monde

I.10. Raccordement de photovoltaïque au réseau électrique :

Un générateur photovoltaïque connecté au réseau n'a pas besoin de stockage d'énergie et élimine donc le maillon le plus problématique (et le plus cher) d'une installation autonome, C'est en fait le réseau dans son ensemble qui sert de réservoir d'énergie. Deux compteurs d'énergie sont nécessaires : un compteur comptabilise l'énergie achetée au fournisseur d'énergie et un autre compteur mesure l'énergie renvoyée sur le réseau électrique lorsque la production dépasse la consommation. Un troisième compteur est ajouté dans le cas où l'énergie produite est injectée en intégralité dans le réseau (compteur de non-consommation). [33]



Figure I .25 : Raccordement de photovoltaïque au réseau électrique

I.11 Les avantages de l'énergie solaire

L'énergie solaire est une énergie renouvelable qui comporte des avantages :

- L'énergie solaire est une ressource naturelle et non polluante
- Source d'énergie électrique totalement silencieuse
- Énergie durable et peu coûteuse
- Le rendement énergétique est positif

I.12 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description générale des différentes sources d'énergie renouvelables existantes, comme l'éolien, l'hydraulique, la biomasse, la géothermie, le solaire...etc. Nous avons aussi présenté les différents concepts qui entrent dans la production de l'énergie solaire photovoltaïque. D'autre part, nous avons mentionné quelques éléments constitutifs des systèmes photovoltaïques.

Chapitre II

L'énergie Photovoltaïque

II.1. Introduction:

Le terme « photovoltaïque », souvent abrégé par les lettres PV, a été formé à partir des mots « photo », un mot grec signifiant lumière, et « Volta », le nom du physicien italien Alessandro Volta, qui a inventé la pile électrochimique en 1800. L'effet photovoltaïque, c'est la conversion directe de l'énergie solaire en électricité. Les cellules solaires photovoltaïques sont des semi-conducteurs capables de convertir directement la lumière en électricité. Cette conversion, appelée effet photovoltaïque. La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles

course vers l'espace que les cellules ont quitte les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé.

II.2 L'énergie solaire photovoltaïque



Figure II.1 : Energie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque utilise le soleil comme une source de lumière. Cette énergie peut être captée et transformée en électricité grâce à des panneaux solaires installés sur les façades ou les toits des bâtiments. Cette transformation est appelée « effet photovoltaïque ». Elle a été découverte en 1839 par Antoine-César Becquerel. Elle consiste à produire un courant lorsque la surface des panneaux est exposée à la lumière. L'élément le plus important d'un système photovoltaïque est la cellule, élément de base de l'unité qui collecte la lumière du soleil et les modules qui rassemblent un grand nombre de cellules. [34]

II.3. Effet photovoltaïque

La conversion de l'énergie solaire en énergie électrique repose sur l'effet photovoltaïque, c'est-à-dire sur la capacité des photons à créer des porteurs de charges (électrons et trous) dans un matériau. Lorsqu'un semi-conducteur est illuminé avec un rayonnement de longueur d'onde appropriée, l'énergie des photons absorbée permet des transitions électroniques depuis la bande de valence vers la bande de conduction du semi-conducteur, générant ainsi des paires électrons-trous, qui peuvent contribuer au transport du courant (photoconductivité) par le matériau lorsqu'on le polarise [17]



Figure II.2 : L'effet photovoltaïque

II.4. Les avantages de l'énergie solaire photovoltaïque

- L'énergie solaire présente, outre tous les avantages des énergies renouvelables, ses propres avantages, à savoir : énergie maîtrisable et adaptable aux situations de toutes les régions.
- L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme.
 Ce sont des systèmes simples et rapides à installer qui nécessitent très peu de maintenance (d'où des frais de maintenance relativement faibles).
- Le solaire photovoltaïque ne comporte aucune pièce en mouvement, la production électrique est réalisée sans combustion ; il n'existe donc ni d'usure due aux mouvements, ni d'usure thermique comme pour les chaudières.
- En devenant producteur d'électricité avec une installation photovoltaïque, chacun peut améliorer son écobilan, réduire les émissions de Dioxyde de Carbone et préserver les ressources naturelles.
- Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple, des installations éoliennes.

II.5. Le panneau solaire

Un panneau solaire est un dispositif énergétique généralement plat et rigide. Les panneaux photovoltaïques standards mesurent 1,7 mètre de long et 1,0 mètre de large. L'épaisseur de leur cadre en aluminium est de 3 à 4 cm.

Un panneau classique pèse environ 19 kg, soit 11 kg par m².

Il est composé de cellules de silicium, aussi appelées cellules photovoltaïques, capables de capter la lumière du soleil puis de la transformer en courant continu grâce à l'effet photovoltaïque.

II.5.1. Fabrication de panneau photovoltaïque

La première étape de fabrication d'un panneau solaire consiste à produire des lingots de silicium, c'est-à-dire de grands blocs de silicium ultra-pur (à 99,999999%). Pour ce faire, on ajoute à des centaines de kilogrammes de fragments de silicium, une petite quantité de bore, élément semi-métallique assez dur qui permet de donner une polarité positive au silicium. Ces fragments « enrichis » sont ensuite cuits dans un four à plus de 1500 degrés. Le silicium est sorti du four sous forme de barres appelées « lingot ». Les lingots sont découpées en fines plaques appelées « wafers » à l'aide de scies à fil. L'épaisseur des wafers est inférieure à 200 microns d'épaisseur, soit l'équivalent d'une feuille de papier.

- L'étape suivante consiste à traiter chimiquement le wafer pour lui permettre de moins réfléchir la lumière. A l'issue de ce traitement, la surface des wafers, lisse au départ, est constituée de minuscules pyramides.
- Cette texture en relief permet d'augmenter la conversion de la lumière en électricité.

Pour que le wafer devienne une cellule photovoltaïque, du phosphore, corps simple non métallique et lumineux dans l'obscurité, est déposée à très haute température sur sa face avant. Cet apport de phosphore permet de donner une polarité négative à cette face avant.

Le wafer est maintenant une cellule photovoltaïque, disposant d'une face arrière de polarité négative et d'une face avant de polarité positive.

Il reste à déposer des contacts métalliques sur les faces avant et arrière de la cellule pour collecter les électrons libérés dans le silicium. Chaque cellule photovoltaïque fonctionne donc comme une pile électrique, avec un pôle positif et un pôle négatif, à la différence près que la cellule photovoltaïque ne s'épuise jamais !

Les panneaux les plus courants sont composés de 60 cellules. Les cellules sont disposées entre deux pellicules de résine transparente. Un film en polyester est ensuite placé sur la face arrière. Ce sandwich est placé dans un tunnel dans lequel il est chauffé. Les deux pellicules de résine encapsulent les cellules de façon totalement étanche pour les protéger de toutes les agressions extérieures.

Chapitre II



Figure II.3 : Étapes de fabrication d'un panneau solaire.

• L'étape suivante consiste à placer un verre trempé, dont l'épaisseur est de 3 à 4 mm, en face avant. Le panneau est ensuite équipé de son cadre en aluminium dont la composition et le profil ont été étudiées pour offrir les meilleures qualités de résistance mécanique.

Enfin, une boîte de jonction est fixée à l'arrière du panneau solaire : il s'agit de la borne de sortie de l'électricité solaire. Chaque borne présente un câble « plus » et un câble « moins » équipé d'une connectique spéciale pour assurer la meilleure connexion électrique et une étanchéité parfaite [17]



Figure II.4 : Différentes composants de panneau photovoltaïque

II.5.2. Principe de fonctionnement de panneau solaire

Lorsqu'un photon de la lumière arrive, son énergie crée une rupture entre un atome de silicium et un électron, modifiant les charges électriques. Les atomes,

chargés positivement, vont alors dans la zone P et les électrons, chargés négativement, dans la zone N. Une différence de potentiel électrique, c'est-à-dire une tension électrique est ainsi créée. C'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque à la surface, le contact électrique (électrode négative) est établi par la grille afin de permettre à la lumière du soleil de passer à travers les contacts et de pénétrer dans le silicium. [17]



Figure II.5 : Principe de fonctionnement de panneau solaire

II.5.3. Les caractéristiques électriques du panneau solaire

Un panneau photovoltaïque est composé de cellules branchées en série et/ou en parallèle. Ces cellules sont soudées les unes aux autres, traditionnellement sur leur face avant.

Dans le présent travail, le module PV utilisé est formé de 36 cellules en série et 2 branches en parallèle, et le générateur se compose de 15 modules connectés en série et de 2 branches en parallèle [35]

Le passage d'un module à un panneau se fait par l'ajout de diodes de protection, une en série pour éviter les courants inverses et une en parallèle, dite diode by-pass, qui n'intervient qu'en cas de déséquilibre d'un ensemble de cellules pour limiter la tension inverse aux bornes de cet ensemble et minimiser la perte de production associée .[36]



Figure II.6 : Les caractéristiques électriques du panneau solaire

II.5.4. Types de panneaux solaires

Il existe trois types de panneaux solaires :



Figure II.7 : Types de panneaux solaires.

II.5.4.1. Le Monocristallin

Le Panneaux Monocristallins se compose de cellules issues d'un seul cristal de silicium parfaitement homogène. Il s'agit du dispositif qui affiche le meilleur rendement pour les installations dans les régions à faible ensoleillement. [37]



Figure II.8 : Panneau Monocristallin

A. Les avantages :

- Leur rendement énergétique est optimal dans les régions à faible ensoleillement.
- Ils garantissent une certaine autonomie vis à vis des fournisseurs d'énergie.
- Ils affichent un excellent rapport rendement/taille

B. Les inconvénients :

- Ils sont assez coûteux à l'achat.
- Ils sont moins écologiques que des panneaux poly cristallins.
- Ils chauffent beaucoup en cas de températures élevées ce qui diminue leur rendement

II.5.4.2. Le Poly-cristallin

Panneaux Poly-cristallins : disposent de cellules formées de différents cristaux de silicium de tailles diverses. Ils sont indiqués dans les zones très ensoleillées, comme les DOM-TOM. [37]



Figure II.9 : Panneau poly- cristalline

A .Les avantages

- Généralement moins cher.
- Parmi les panneaux cristallins, sa fabrication est la moins énergivore.

B.Les inconvénients :

- Nécessite une surface plus grande à puissance égale.
- Sa couleur bleue non-uniforme peut déranger.
- Interdit par certains documents d'urbanisme [38]

II.5.4.3. Les panneaux Amorphes

Panneaux silicium amorphe ou couche mince : Apparus plus récemment, ces panneaux se reconnaissent par une couleur grise à marron foncé et uniforme avec un grain très fin. Cette informité est due à un procédé de fabrication de dépôt du silicium en couches minces.



Figure II.10 : Panneau silicium amorphe

Les avantages :

- Un peu moins chère que l'autre panneau.
- Fonctionne avec un éclairement faible ou diffus.
- Intégration sur supports souples ou rigides. [17]

Les inconvénients :

- Rendement faible en plein soleil, de 6 % en moyenne
- Rendement de conversion (le passage de l'énergie absorbée à l'énergie utile) et de 60wc/m² il nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que les panneaux poly-cristallin et monocristallin.
- Taille des panneaux qui peut aller jusqu'à 2 fois un panneau monocristallin et donc plus lourd

Monocristallin : 7 à 8 m² Poly-cristallin : 8 à 9 m² Silicium amorphe : 14 à 16m² [39]

II.5.5. Association en série et en parallèle des modules PV

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle pour construire le champ photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation. Toutefois, il importe de prendre quelques précautions car l'existence de cellules moins efficaces ou l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dues à de l'ombrage, de la poussière,....etc.) peuvent endommager les cellules de façon permanente



Figure II.11 : Association en série et en parallèle des modules PV

II.5.5.1. Mise en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la Branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (Modules) en série [40]



Figure II.12 : Branchement de panneau solaire en série

$$U = U_{1} + U_{2} + \dots + U_{n}$$
(I.07)
$$I = I_{1} = I_{2} = I_{n}$$
(I.08)



Figure II.13 : Mise en série des panneaux solaires

Avec :

U: tension totale de module PV

U1 : tension de module PV nombre 1

U2 : tension de module PV nombre 2

Un : tension de module PV nombre n

II : courant de module PV nombre 1

I2 : courant de module PV nombre 2

In : courant de module PV nombre n

Une association de Ns Module en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les modules sont alors traversés par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque Module



Figure II.14 : Les caractéristiques électriques (U et I) des modules branchés en série

II.5.5.2. Mise en parallèle

En additionnant des modules ou cellules identiques en parallèle, la tension de la Branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement Au nombre de modules en parallèle dans la branche. [40]

$$U=U_{1} = U_{2} = U_{3} \dots = U_{n}$$
(I.09)
$$I=I_{1} + I_{2} + I_{3} = I_{n}$$
(I.10)



Figure II.15 : Branchement de panneaux solaire en parallèle.



Figure II.16 : Mise en parallèle des panneaux solaires

Une association de Np Module en parallèle permet d'augmenter le courant du générateur photovoltaïque (GPV). Et à la même tension



Figure II.17 : Les caractéristiques électriques (U et I) des modules branchés en Parallèle.

II.6. Constitution d'un parc ou centrale photovoltaïque II.6.1. Le Champ photovoltaïque

Afin d'obtenir la tension nécessaire à l'onduleur, les panneaux sont connectés en série. Ils forment alors une chaîne de modules ou string. Les chaînes sont ensuite associées en parallèle et forment un champ photovoltaïque



Figure II.18 : Champ photovoltaïque

Il faut également installer des diodes ou des fusibles en série sur chaque chaîne de modules. Ces protections sont utiles pour éviter qu'en cas d'ombre sur une chaîne, elle se comporte comme un récepteur et que le courant y circule en sens inverse et l'endommage. [41]

II.6.2. Onduleur

Les onduleurs photovoltaïques sont incontournables pour un raccordement réseau des panneaux solaires photovoltaïques.

Ils permettent d'adapter le courant continu sortant du générateur photovoltaïque en un courant alternatif injectable dans le réseau public. Mais ils jouent aussi un rôle dans le rendement du système photovoltaïque. L'optimisation de la production d'une installation passe par un choix adapté du type d'onduleurs et de leur dimensionnement.

II.6.2.1. Critère de choix d'un onduleur

Avant de faire le choix d'un onduleur, Il faut s'assurer que

- L'onduleur peut démarrer le récepteur (seul un essai est vraiment relevant)
- Son rendement est suffisant au point de fonctionnement de la charge.
- La charge tolère la distorsion de l'onduleur (forme de l'onde).
- Les variations de la tension de sortie sont acceptées par la charge (récepteur) L'onduleur protège contre la surcharge.
- L'onduleur coupe alimentation de l'utilisateur en cas de basse tension (protection de la batterie). [42]

Types	Paramètres	Avantages
Onduleur centralisé	• Pour les montages Combinant branchement en série et en parallèle	 Faible tolérance de puissance entre les modules Possibilité de grimper à une puissance de plusieurs MW

II.6.2.2. Type onduleur [43]

Onduleur « String »	 flux lumineux différents entre les rangées rangées branchées au réseau via son onduleur 	 adaptés aux installations de grande puissance tolérance aux intensités différentes de luminosité entre les rangées
Onduleurs « Multi string »	 types de modules différents orientations de modules variées nombre de modules différents par rangée 	• meilleur rendement que pour un onduleur centralisé grâce à la possibilité d'un MPP trekking pour chaque rangée modularité de l'installation
Onduleur modulaire	• pour les installations de petite puissance	 pas de câblage de courant continu un module ombragé n'influe par sur le reste de l'installation

Tableau II.1. Différents types d'onduleurs

II.6.3. Régulateur

Le régulateur de charge assure plusieurs fonctions :

- Régulation de la charge de la batterie par limitation de la tension pour éviter les surcharges.
- Limitation de la décharge par délestage de l'utilisation, pour éviter les décharges trop profondes risquant d'endommager la batterie.
- Contrôle du fonctionnement du système par voyant ou affichage LCD.

Il doit être installé au plus près de la batterie pour limiter la longueur des câbles et donc les pertes d'énergies. Il est préférable de choisir un emplacement hors gel, au sec et ventilé. Se référer à la notice fabricant. (Figure II. 19)[43]

II.6.3.1. Choix et compatibilité

Le régulateur de charge doit être compatible avec les panneaux solaires et la batterie.

Pour la ou les batteries

Il suffit de connaitre la tension du parc complet, 12V, 24V, 36V ou 48V

> pour le régulateur

- Avec un régulateur classique type "PWM", la tension panneau doit être la même que celle de la batterie. Dans le cas d'une batterie 12V, on doit avoir un panneau 12V ou plusieurs mais branchés en parallèle pour ne pas modifier la tension. On ne pourra pas

utiliser un panneau 24V ou deux panneaux 12V branchés en série qui donnerais du 24V.

- Avec un régulateur MPPT, la tension panneau doit être supérieure à celle de la batterie pour qu'il fonctionne correctement. Dans le cas d'une batterie 24 V, on ne peut pas utiliser un panneau 12V, il faudra au minimum un panneau 24V, deux panneaux 12V branchés en série ou un panneau avec un plus grand nombre de cellules (54 ou 60 par exemple). Pour une batterie 24V, c'est un peu différent, le minimum sera un panneau 24V soit 72 cellules. [44]



Figure II.19 : Régulateur de charge solaire

II.6.4. Batterie

Les batteries sont des accumulateurs d'énergie, ont une durée de vie et un nombre de

Cycles prédéterminés à l'avance par le climat (température ambiante) et par le type d'utilisation que l'on va en faire (profondeur de décharge). Le coût de l'investissement et le coût induit par leur durée de vie, vont dépendre de leur qualité de fabrication et du type de technologie.

II.6.4.1. Les deux principales caractéristiques des batteries

Pour toutes les batteries, quel que soit le type de fabrication, elles ont deux caractéristiques communes :

- ✓ Leur tension exprimée en Volts (V) : dans le photovoltaïque, elle est généralement de 12 V pour les petites batteries rechargeables qui ont une durée de vie d'environ 5 ans. Pour les éléments plus importants avec des tensions de 12, 24 ou 48 V, on utilise des éléments séparés de 2 V, prévus pour être assemblés en série, et qui ont une durée de vie d'environ 10 ans.
- ✓ Leur capacité en Ampères heures (Ah) : Pour l'augmenter, on doit brancher plusieurs batteries en parallèle.

En multipliant la tension par la capacité, on obtient la quantité d'électricité emmagasinée, en kWh. [42]

II.6.4.2. Les différents types de batteries [42] II.6.4.2.1. Batteries au plomb Les batteries au plomb fermées avec un électrolyte gélifié. Elles ont l'avantage d'être sans entretien, facilement manipulable (pas de fuite) avec une stabilité parfaitement contrôlée par le fabricant. Elles ont les inconvénients d'être plus chères et d'avoir une durée de vie plus courte.

Elles fournissent en général environ 400 cycles à 80 % de décharge.



Figure II.20 : Batteries au plomb fermées

II.6.4.2.2. Batteries au nickel

Les NIMH ont une grande densité énergétique et peuvent être complètement déchargée sans porter préjudice à leur durée de vie. Elles ont l'inconvénient d'être de faible capacité

Elles fournissent en général entre 500 et 700 cycles à 80 % de décharge.



Figure II.21 : Batteries NIHM

II.6.4.2.3. Batteries au Lithium

Elles sont réservées aux systèmes photovoltaïques portables où leur grande capacité de décharge (six fois mieux que le plomb étanche) est leur grand intérêt. Leur prix est encore prohibitif mais elles fournissent en général, environ 1 300 cycles à 100 % de décharge.



Figure II.22 : Batteries Li-ions

II.7. Les différentes installations photovoltaïques

II.7.1. Les installations sur site isolé

Ce type de montage est adapté aux installations ne pouvant être raccordées au réseau.

L'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans des accumulateurs pour permettre de répondre à la totalité des besoins.

Les panneaux photovoltaïques produisent l'électricité en courant continu (voir figure II.23). [42]



Figure II.23 : Installation sur site isolé

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

Des récepteurs DC spécifiques sont utilisables. Ces appareils sont particulièrement économes (voir figure II.24). [45]



Figure II.24 : Exemple des installations photovoltaïques

II.7.2. Les installations raccordées au réseau de distribution public II.7.2.1. Solution avec injection totale

Toute l'énergie électrique produite par les capteurs photovoltaïques est envoyée pour être revendue sur le réseau de distribution. 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). (Voir figure II.25) [46]



Figure II.25 : L'injection d'énergie dans les réseaux

En bleu: énergie électrique continue (DC).En rouge: énergie électrique alternative

II.7.2.2. Solution avec injection de surplus

Cette solution est réalisée avec le raccordement au réseau public en un point : 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 (voir figure II.26). [46]



Figure II.26 : Injection énergie supplément dans le réseau

II.8. Système photovoltaïque (PV)

Un système (photovoltaïque) PV est un ensemble d'éléments (constituants) de production d'électricité, en utilisant une source solaire. Ces constituants sont essentiellement le champ PV, le conditionnement de puissance, le système de stockage (dans un certain cas), et la charge (voir figure II.27). Le conditionnement de puissance peut comprendre: un régulateur seul, un régulateur avec un Convertisseur (DC /DC ou/et DC/ AC) ou un convertisseur seul. Un exemple d'un système plus détaillé est montré sur la figure II.27.



Figure II.27 : Système photovoltaïque plus détaillé

II.8.1. Classification des systèmes PV

On distingue deux types de systèmes PV :

- Systèmes PV autonomes
- Système à injection au réseau.

II.8.1.1. Systèmes autonomes

On dit qu'un système PV est autonome si la charge est passive (exemple : lampes, les moteurs, etc.). Le système PV autonome est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autres sources d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique (Figure II.28). Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries ou autres moyens de stockage pour une utilisation durant les périodes de la non disponibilité de l'énergie solaire (par exemple les périodes nocturnes, les périodes non ensoleillées). Les systèmes PV autonomes servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, en îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau (dans certains cas).

En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique. À l'heure actuelle, c'est dans les endroits isolés, loin d'un réseau électrique et où les besoins en énergie sont relativement faibles (généralement moins de 10 kWh) que l'énergie photovoltaïque est la plus concurrentielle. [47]



Figure II.28 : Schéma d'un système autonome (hors-réseau).

II.8.1.1.2. Types de systèmes PV autonomes

On distingue deux types :

- Les systèmes au fil du soleil
- Les systèmes avec stockage
- A) Les systèmes au fil du soleil

Chapitre II

Les systèmes au fil du soleil sont des systèmes sans stockage. Ils exploitent directement l'énergie solaire sans aucune source d'appoint. Ces systèmes sont classés, selon la nature de la charge à alimenter, en deux types systèmes à courant continu et systèmes à courant alternatif. L'application la plus connue est le pompage photovoltaïque avec ses deux types : systèmes de pompage PV à courant continu et systèmes à courant alternatif. Pour le deuxième cas on doit ajouter un onduleur. La Figure II.29 montre un exemple d'un système de pompage PV où le conditionneur d'énergie peut être, selon la fonction exigée, un convertisseur DC/DC, un convertisseur DC/AC ou les deux en même temps (les conditionneurs d'énergie seront étudiés aux chapitres qui suivent). Ces systèmes sont simples mais leur inconvénient est la coupure de l'alimentation en absence du soleil. Ces systèmes utilisent, en général, un autre moyen de stockage tel que les réservoirs d'eau pour le pompage PV. [47]



Figure II.29 Système de Pompage PV

B) Les systèmes avec stockage

Les systèmes avec stockage sont des systèmes qui contiennent des moyens de stockage. Un système de stockage sert à alimenter les charges durant les périodes ayant un ensoleillement faible (passage des nuages) ou une absence totale de l'ensoleillement (les nuits). Le système de stockage sert à emmagasiné l'énergie durant la présence de l'excès d'énergie photovoltaïque et de la restituer durant les autres périodes d'insuffisance d'énergie. Comme exemple, on peut citer l'alimentation des maisons en électricité dans des sites isolés.

II.8.1.2. Systèmes PV à injection aux réseaux

Un système PV raccordé au réseau est un système dont la charge est partiellement ou totalement est le réseau électrique. Ç à d. le générateur PV injecte sa puissance à travers un onduleur dans le réseau électrique [47]



Figure II.31 :B) Injection totale

• Remarque

Pour le premier cas on peut avoir un système de stockage si les lois du pays encouragent la vente d'énergie renouvelable alors que pour le deuxième cas le stockage est utilisé si on veut réduire la consommation durant les heures de pointes, plus particulièrement de nuits.

II.8.1.2.2. Classes des systèmes raccordés aux réseaux [47]

On a deux classes de systèmes raccordés aux réseaux :

* Systèmes à grande puissance ou systèmes centralisés (centrale solaire photovoltaïque);

* Systèmes à petites puissances ou systèmes décentralisés ; généralement installés chez des particuliers.

A) Systèmes à grande puissance ou systèmes centralisés (centrale solaire photovoltaïque)

Les systèmes à grandes puissances sont des systèmes PV localisés dans des endroits où l'alimentation est centralisée. Ils sont utilisés pour renforcer le réseau conventuel durant les périodes de pic de puissances. Ces systèmes nécessitent des espaces très vastes (environ 2 hectares pour un 1MWc).

B) Systèmes à petite puissance ou systèmes décentralisés

En quantité unitaire, les systèmes décentralisés de petite puissance (inférieur à 100 kWc) sont les plus courants, avec approximativement 80 % des systèmes raccordés au réseau mondial, la majorité étant posé sur des habitations individuelles.

Selon la portion injectée dans le réseau on distingue deux sortes de systèmes :

Systèmes à Injection du surplus

Dans cette configuration, le consommateur utilise la puissance fournie par le générateur PV pour satisfaire ses besoins en énergie et dans le cas du surplus, il l'injecte dans le réseau. L'installation du client producteur avec achat des excédents de production doit être équipée de deux compteurs, l'un mesurant l'énergie soutirée au réseau lorsque la consommation excède la production (compteur de soutirage), l'autre mesurant l'énergie injectée dans le réseau (compteur d'injection).

A chaque moment, un seul compteur mesure



Figure II. 32 : Installation solaire à injection réseau avec deux compteurs d'énergie

> Systèmes à injection de la totalité

Dans ce cas toute la production de la station solaire est injectée dans le réseau. Ces besoins en consommation sont satisfaits par le réseau. Cette configuration est très utilisée dans les pays qui encouragent l'introduction des énergies renouvelables où l'achat du kWh d'énergie renouvelable peut atteindre jusqu'à cinq fois le kWh des énergies fossiles dans certains pays. [47]

II.9. Intégration du photovoltaïque au réseau électrique

II.9.1. Interaction entre le réseau de distribution et les systèmes PV

La filière photovoltaïque, dont le développement est soutenu par les pouvoirs publics (lutte contre le changement climatique, augmentation de la part des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique, soutien de la filière industrielle, ...) possède des caractéristiques spécifiques :

- La puissance de production des installations varie de quelques kW à plusieurs MW.
- Le nombre de producteurs peut devenir à terme très important, [13]

Chapitre II

- La plupart des raccordements sont réalisés sur la partie basse-tension du réseau public de distribution (au 31 décembre 2009, 99.95 % des installations PV en France étaient raccordées en BT dont 90 % étaient inférieures à 3 kWc, [ESPRIT_10a])
- Les installations comportent des convertisseurs statiques (pas de machines tournantes)
- Les équipements (onduleurs et modules) disponibles sur le marche sont varies,
- La production d'énergie est naturellement intermittente,
- Le raccordement des installations est le plus souvent le résultat d'initiatives individuelles et donc n'est pas planifie. [13].

II.9.1.1. Influence des systèmes photovoltaïques sur le réseau de distribution

Dans le passé, les réseaux de distribution se comportaient comme des éléments passifs dans lesquels les flux de puissance s'écoulent de manière unidirectionnelle du poste source vers les consommateurs finaux. Du fait de l'insertion des productions décentralisées, les flux de puissance et les tensions sont impactes non seulement par les charges mais aussi par les sources.

Par suite de ces spécificités techniques des installations photovoltaïques, le raccordement des systèmes PV au réseau a des impacts qui peuvent être négatifs, voire générer des dysfonctionnements. L'injection de la production électrique des systèmes photovoltaïques (PV), intermittente et parfois aléatoire, dans un réseau électrique public, influe sur sa stabilité et sa protection. Ceci pose de nouveaux défis pour la gestion du réseau.

Les impacts potentiels des installations PV sur le réseau électrique sont :

Influence sur le plan de tension:

- Variation locale de tension
- Déséquilibre des tensions
- Variation rapide de puissance (intermittence)

Influence sur le plan de protection

• Aveuglement de protection

Influence sur la qualité de l'énergie :

• Injection des harmoniques

Influence sur les pertes dans les réseaux de distribution [13]

• Impact de la puissance PV sur les investissements du réseau électrique

L'onduleur PV est une source de problèmes, c'est le maillon faible de la chaine de conversion. Sa commande revêt une importance cruciale.

II.9.1.2. Influence du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques

Les caractéristiques, le fonctionnement et les perturbations des réseaux de distribution peuvent influencer le fonctionnement normal des systèmes PV. Ceci

provient généralement, soit des caractéristiques intrinsèques des réseaux de distribution, soit de la qualité de tension dégradée par d'autres utilisateurs du réseau, soit d'une association de ces deux causes. Ces effets entrainent généralement des découplages injustifiés des onduleurs. Les influences du réseau de distribution sur le fonctionnement des installations photovoltaïques peuvent se résumer comme suit :

- Régime de neutre et courants de fuite
- Niveau de tension du réseau
- Creux de tension et tenue des systèmes PV
- Présence de composante continue et d'harmoniques de tension
- Inter harmoniques [13].

II.9.2. Impact des installations PV sur le réseau public de distribution

L'objectif de cette partie est de synthétiser les conclusions des études publiées concernant l'impact des installations PV sur le réseau public de distribution.

a- Elévation et fluctuation locale du niveau de tension: Dans le réseau de production PV présenté dans la Figure I.7, le transit de puissance est modifié par rapport à un réseau classique. La chute de tension entre le réseau et le point de raccordement du PV s'approxime bien par la formule ci-dessous [7].

Où :

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

PG, QG sont les puissances actives et réactive fournies par PV

PL, QL sont les puissances active et réactive de consommation

QC est la puissance réactive du dispositif de compensation éventuel





Dans le réseau de distribution, la puissance active injectée par un système PV joue un rôle important dans la variation de la tension car la résistance linéique est plus importante que la réactance linéique (R>>X). Plus la puissance PV installée est grande, plus la tension au point de raccordement est élevée.

De plus, l'ensoleillement variable provoque la fluctuation de la puissance PV, donc implique la fluctuation de la tension locale.

b- Surtension temporaire

Une étude réalisée en Espagne [1] rapporte que des surtensions ont détruit des équipements électriques comme des compteurs. De tels incidents sont survenus lorsqu'une coupure de réseau en amont de l'onduleur PV entraine son isolement par rapport à la charge. La surtension peut dépasser 200% par rapport à la valeur nominale de la tension du réseau. Des simulations effectuées dans le cadre du projet Esprit [2] ont montré qu'au moment de la coupure du réseau, plus la production PV est importante par rapport à la consommation, plus la surtension est élevée.

c- Harmoniques de courant

Deux autres études [3] et [4] montrent que la multiplication des onduleurs sur le réseau peut augmenter les harmoniques quand les onduleurs sont de même type, alors que des onduleurs de types différents tendent à atténuer les harmoniques générés par aplatissement du spectre résultant.

Ce problème d'harmonique courant s'atténue avec les nouvelles technologies d'onduleurs.

d- Injection de courant continu

L'étude [5] montre que tous les types d'onduleurs (avec transformateur HF, BF, sans transformateur) injectent un courant continu (les onduleurs de type transformateur BT injectent un courant continu plus faible). Dans le cas du projet DISPOWER, différents tests réalisés avec des onduleurs de puissance maximale 4kW montrent que la composante continue est inférieure à 600mA, dans ces 8 sur 12 cas, inférieure à 100mA. Cette composante continue influence négativement le fonctionnement et la durée de vie les équipements du réseau comme la protection différentielle et les compteurs [6]. Les auteurs du projet DISPOWER recommandent de maintenir la composante continue en dessous de 0,5 % du courant nominal des transformateurs de distribution [7].

e- Contribution aux courants de court-circuit

En cas de court-circuit sur le réseau, le courant de court-circuit apporté par le générateur PV, peut perturber la détection du défaut par les dispositifs de protection prévus sur le réseau. Donc il est nécessaire de proposer des stratégies de coordination des différentes protections – réseau, PV, consommation- pour assurer le bon fonctionnement des protections de court-circuit.

f- Courants de fuite

Avec les onduleurs de type sans transformateur raccordée au réseau en régime de neutre (le cas de réseau BT en France), un courant de fuite peut être créé et circuler entre la capacité (du panneau PV et EMC filtre) et la terre. La somme des courants de fuite de plusieurs systèmes PV circulant dans le conducteur de terre, et en cas de

défaut (coupure du fil de terre) provoque une surtension dangereuse si on touche des équipements. Si la valeur de ce courant de fuite atteint le seul de protection différentielle (30mA en France), une coupure du PV aura lieu [7].



Figure II.34 : Schéma simplifié du courant de fuite via les capacités des panneaux PV, la Terre et l'onduleur

Les onduleurs installés dans les secteurs résidentiels sont normalement de petite puissance, et de structures monophasées. Dans un réseau triphasé BT, si la puissance de production PV n'est pas correctement répartie entre les 3 phases, un phénomène de déséquilibre du réseau BT peut apparaître.

II.10. Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté le potentiel solaire nous ainsi que des généralités sur les systèmes photovoltaïques comme la cellule solaire, le module photovoltaïque et le panneau solaire. Nous avons expliqué le fonctionnement de la cellule photovoltaïque ainsi que ces types. Ensuite nous avons présenté la structure des panneaux photovoltaïques plus les différents types d'installation de systèmes photovoltaïques. Enfin, nous avons met de la lumière sur les l'interaction qui peuvent surgir entre le réseau et le système PV raccordé.

Dans le prochain chapitre, nous présenterons les modèles mathématique des convertisseurs statiques DC/DC qui sont les Hacheurs et les onduleurs ainsi que leurs commandes, respectaient la commande MPPT et la commande PLL.
Chapitre III

Modélisation et Commande d'un Système Photovoltaïque

III.1. Introduction

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. A ce niveau, la condition qui s'impose c'est de connaître les critères d'entrées (donnée de base) c'est- à-dire les données météorologiques au site, les données relatives aux utilisateurs, et les données relatives aux équipements. [1] Les principaux composants d'un système étudié seront modélisés comme suit :

- Le rayonnement solaire
- Le générateur photovoltaïque
- Un hacheur DC/DC
- Un onduleur triphasé
- Transformateur
- Réseau



Figure III.1 : Schéma synoptique du système Photovoltaïque.

III.2. Modélisation du rayonnement solaire

L'étude des systèmes énergétiques à sources renouvelables qu'ils utilisent une seule source (système photovoltaïque ou système éolien) ou plusieurs sources comme dans le cas d'un système hybride nécessite que l'on prenne en compte l'évolution des grandeurs qui caractérisent ses performances sur une période longue et que l'on utilise des modèles de type « entrée-sortie ». Ces modèles, existants ou à élaborer, permettent de calculer la puissance électrique produite à partir de la variation de la source d'énergie. Pour ce faire, il convient d'estimer le potentiel énergétique primaire sur la base des données météorologiques disponibles (irradiation solaire).

Il arrive que les données disponibles ne soient pas exactement celles dont nous avons besoin en entrée de nos modèles de comportement comme par exemple :

• l'éclairement solaire global est mesuré sur des plans horizontaux alors que les capteurs photovoltaïques sont dans la plupart des cas inclinés par rapport à l'horizontale.

Il convient donc de convertir les données météorologiques disponibles en données météorologiques \ll utiles \gg pour nos modèles. L'influence du potentiel énergétique primaire sur le comportement du système et sur sa structure même intervient de deux manières :

- par sa quantité c'est-à-dire par son contenu énergétique, il intervient sur la productivité du système photovoltaïque;
- par sa répartition temporelle (caractère d'intermittence) [6]

III.2.1. Le Spectre de rayonnement solaire :

Un faisceau lumineux est un déplacement de petits corps porteur d'énergie appelés photons, la lumière est décrite également comme une onde électromagnétique dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0.2 μ m) à l'infrarouge lointain (3 μ m). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise.

L'énergie totale transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleilterre est de l'ordre de 1350W/m² (AM0) dans l'espace hors atmosphère terrestre (Figure III-2) (cette valeur varie de quelques% dans l'année à cause des légères variations de la distance terre-soleil). Lorsque le rayonnement solaire traverse l'atmosphère, il subit une atténuation et une modification de son spectre, à la suite de phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz, l'eau et les poussières. Ainsi, la couche d'ozone absorbe une partie du spectre lumineux provenant du soleil, et en particulier une partie des ultraviolets dangereux pour la santé. Le rayonnement solaire direct reçu au niveau du sol (à 90°d'inclinaison) atteint 1000 W/m² du fait de l'absorption dans l'atmosphère (AM1). Cette valeur change en fonction de l'inclinaison des rayons lumineux par rapport au sol. Plus l'angle de pénétration θ est faible, plus l'épaisseur atmosphérique que les rayons auront à traverser sera grande, d'où une perte d'énergie conséquente. Par exemple, l'énergie directe transportée par le rayonnement solaire atteignant le sol avoisine les 833 W/m² (AM1.5). [3]

En chaque point, la valeur de la masse d'air est donnée par l'Équation III-1

$$AM \approx \frac{1}{\sin\theta}$$
(III-1)

Pour connaître le rayonnement global reçu au sol, il faut ajouter à ce dernier le rayonnement diffus. Le rayonnement diffus concerne tout le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de 1000W/m², la Figure III-2 correspondant à nos latitudes. [3]



Figure III.2 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D.

Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de $\approx 45^{\circ}$ par rapport au zénith). Le « G » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct

Normalisation

Les conditions standards de qualification des modules photovoltaïques sont : un spectre AM1.5 sous un éclairement de 1000W/m² et une température de 25°C. [2]

Les constructeurs de panneaux solaires spécifient les performances de leur matériel dans les conditions normalisées citées ci-dessus (S.T.C. : Standard Test Conditions). [3]

Signalons que l'irradiation solaire dépend :

- de l'orientation et l'inclinaison de la surface,
- de la latitude du lieu et son degré de pollution,
- de la période de l'année,
- de l'instant considéré dans la journée,

La combinaison de tous ces paramètres produit la variabilité dans l'espace et le temps de l'irradiation journalière. Des cartes météorologiques sont établies et nous renseignent sur l'irradiation moyenne par jour ou bien sur une année

Le scientifique français, Edmond Becquerel, fut le premier à découvrir en 1839 l'effet photoélectrique. Il a trouvé que certains matériaux pouvaient produire une petite quantité de courant sous l'effet de la lumière. Par la suite, Albert Einstein a découvert, en travaillant sur l'effet photoélectrique, que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie était portée par des particules, les photons. L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

 $E = h. c / \lambda \dots (III-2)$

Où :

- *h* : la constante de Planck
- c : la vitesse de la lumière

 λ : la longueur d'onde

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte value à Albert Einstein le prix Nobel en 1905.



Figure III.3 : Spectres Solaires en plusieurs conditions de AM.

III.3. Modélisation des systèmes photovoltaïque

III.3.1. Modélisation du champ photovoltaïque

Dans la littérature, on trouve deux types de modèles de modules photovoltaïques : les modèles électriques et énergétiques.

Le **modèle électrique** est appelé modèle équivalent à une diode (Figure III.7) ou deux diodes (plus complexe à mettre en œuvre). Dans cette approche le courant fourni et la tension aux bornes du module sont calculés à partir de l'éclairement solaire reçu, de la température ambiante et parfois de la vitesse du vent (Rosell et Ibarñez, 2006, Hamidat et Benyoucef, 2008; Ai *et al*, 2003; Nfah *et al*, 2007). Il peut être appliqué

dans des études de processus de courte durée, lors qu'il est nécessaire de connaître les grandeurs électriques ou de calculer la puissance de sortie du système photovoltaïque.

Le **modèle énergétique** utilise la notion de rendement de conversion. Ces modèles ne peuvent être utilisés que pour des études énergétiques de l'installation photovoltaïque, parce qu'ils permettent de déterminer la puissance de sortie mais pas la tension et le courant (Perlman *et al*, 2005; Sukamongkol *et al*, 2002, Tina *et al*, 2006). Certains auteurs simplifient les calculs en utilisant une valeur fixe du rendement (Shaahid et Elhadidy, 2003). [6]

Pour notre système photovoltaïque connecté au réseau, nous estimons plus opportun de s'intéresser au modèle électrique.

III.3.1.1. Modèle d'une cellule photovoltaïque

De nombreux modèles mathématiques, ont été développés pour représenter le comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semiconductrices qui sont à la base de la réalisation des cellules PV. On rencontre dans la littérature plusieurs modèles représentatifs pour la cellule PV qui différent entre eux par la procédure et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la tension et du courant final du générateur photovoltaïque. [3]

A. Model de base :



Figure III.4 : Schéma d'application de l'effet photovoltaïque

B. Modèle Idéal :

La réflexion précédente nous permet d'aboutir au modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque représentée dans la figure III.4, appelé le modèle idéal. C'est le modèle le plus simple pour représenter la cellule solaire, car il ne tient compte que du phénomène de diffusion. Le circuit équivalent simplifié d'une cellule solaire se compose d'une diode et d'une source de courant montés en parallèle. La source du courant produit le photon courant **Iph** qui est directement proportionnel à l'éclairement solaire G. [3]



Figure III.5 : Circuit équivalent d'une cellule PV - Model idéal

L'équation courant tension I-V du circuit équivalent est donné comme suit:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{V}{AV_T}} - 1 \right)$$
.....(III-4)

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V}{AV_T}} - 1 \right)$$

$$V_T = \frac{KT}{q}$$

Avec :

I : courant fourni par la cellule

I_{ph}: photo-courant de la cellule proportionnel à l'éclairement (G)

 I_{θ} : courant de saturation inverse de la diode.

 V_T : potentielle thermodynamique.

- *K* : la constante de Boltzmann (1.38.10-23 Joules/Kelvin).
- *T* : la température de la cellule en Kelvin.
- q: la charge d'un électron =1,6.10-19C
- A: le facteur d'idéalité de la jonction (la diode). Pour les cellules actuellement commercialisées au silicium : A=1

V : la tension aux bornes de la cellule

C. Modèle avec pertes ohmiques (Rs-MODEL) :

Ce modèle tient compte de la résistivité du matériau et des pertes ohmiques dues aux niveaux des contacts, ce qui permet une meilleure représentation du comportement électrique de la cellule par rapport au modèle idéal. Ces pertes sont représentées par une résistance série Rs dans le circuit équivalent représenté cidessous [3]:



Figure III.6 : Circuit équivalent d'une cellule PV -Rs-Model -

Après analyse du circuit, l'équation courant- tension est donnée comme suit :

$$I = I_{ph} - I_D$$

$$V_D = R_p I_{Rp} = V + R_s I \dots (III-5)$$

$$I_{D=I_0} \left(e^{\frac{qV_D}{AKT}} - 1 \right) \dots (III-6)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_s)}{AKT}} - 1 \right) \dots (III-6)$$

 R_S : La résistance série caractérisant les diverses résistances de contacts et de connexions.

D. Modèle a une diode "Modèle 1-D "

Ce modèle est désigné aussi par Rp-Model. Ce model tient compte non seulement des pertes en tension exprimée par la résistance série Rs mais aussi des fuites de courants exprimées par une résistance parallèle Rp. C'est le modèle sur lequel s'appuient les constructeurs en donnant les caractéristiques techniques de leurs cellules solaires (data sheet). Il est aussi considéré satisfaisant et même une référence pour les constructeurs pour cataloguer typiquement les modules solaires. [3]

Le Modèle 1-D ou le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque est présenté dans la figure III.7. Il inclut une source de courant, une diode, une résistance série et une résistance shunt



Figure III.7 : Circuit équivalent d'une cellule PV -Rs-Model -

$$I = I_{ph} - I_D - I_{Rp}$$
$$I_{ph} = [I_{pho} + K_i (T - T_{ref}) * \frac{G}{G_0}].....(III-7)$$

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{q(V+IR_S)}{AKT}} - 1 \right)$$
.....(III-8)

$$I_{Rp} = \frac{V + R_s I}{R_p}.$$
(III-9)

Rs et *Rp* sont les résistances série et shunt de la cellule *Ipho* : le courant généré par la cellule dans les conditions STC

$$I_0 = I_{0n} \left(\frac{T}{T_n}\right)^3 e^{\left(\frac{q E_g}{AK}\left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T}\right)\right)} \qquad (\text{III-11})$$

$$I_{0n} = \frac{I_{scn}}{e^{\left(\frac{Vocn}{AVT_n}\right)} - 1}$$
 (III-12)

Ki : coefficient température en court-circuit Isc, fourni par le fabricant sur la fiche

technique

- Kv: coefficient de température en circuit-ouvert V_{oc}, fourni par le fabricant sur la fiche technique
- T_n (*Tref*) : Température de la cellule en STC (T_n = 298 en Kelvin, T_n = 25 ° C)
- *T* : Température de la cellule en STC (en Kelvin)
- *G* : L'éclairement énergétique.
- Go: (1000 W/m2): est l'éclairement énergétique au STC.
- *I*_{scn} : le courant de court circuit au conditions normale STC
- Vocn: Tension a circuit ouvert aux conditions normales STC
- E_g : Energie de la bande de jonction

Les deux modèles : Modèle 1-D & Modèle 2-D confrontes les paramètres inconnus suivants :

- Modèle 1-D (05paramères inconnus : Ipv ,I0 ,F , Rs,, Rp)
- Modèle 2-D (07paramères inconnus : Ipv, I01, I02, FH, FI, Rs, Rp)

En outre Io1, Io2, Rp et Rs, sont obtenus par itération. Pour simplifier encore, plusieurs chercheurs suppose FH=1 et FI=2. C'est l'approximation de la recombinaison Schokley-Read-Hall dans la couche de charge d'espace dans la photodiode. Bien que cette hypothèse est largement utilisé, mais pas toujours vrai. Tel que discuté dans la section d'introduction, de nombreuses tentatives ont été faites pour réduire le temps de calcul pour le modèle à deux diodes. Cependant, ils semblent être satisfaisants. [3]

Nous mettons le schéma électrique équivalent d'une cellule PV en un schéma bloc (Figure III.8) comportant quatre variables.

Les deux variables d'entrées sont :

- "G" ensoleillement dans le plan des panneaux (W/m2);
- "T" température de la jonction des cellules (C°).

Les deux variables de sortie sont :

- " I " courant fourni par le module PV (A) ;
- "V" tension aux bornes du module PV (V).



Figure III.8 : Modèle d'une cellule PV -Rs-Model -

Courant de court circuit Isc :

Il est obtenu pour une tension de sortie nulle à partir de l'équation (III-10)

$$I_{sc} = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qR_s I_{sc}}{AKT}} - 1 \right) - \frac{R_s I_{sc}}{R_p}$$

Dans le cas d'une cellule idéale $R_S \longrightarrow 0$ et $R_P \longrightarrow \infty$)

$$I_{sc} = I_{ph} = qg(L_n + L_p)$$
 (III-13)

Tenant compte de l'effet des résistances RS et RP ; le courant de court circuit varie en fonction de ces deux résistances et est proportionnel au flux incident.

Tension en circuit ouvert Vco:

Elle est obtenue pour un courant de sortie nul à partir de l'équation (III-10)

$$0 = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{qV_{co}}{AKT}} - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_p}$$

Dans le cas d'une cellule idéale $R_s \rightarrow 0$ et $R_P \rightarrow \infty$, $I_{cc} = I_{ph}$ et A=1

Vco augmente quand Io diminue, elle ne dépend que de la nature du cristal et de jonction

Modèle de la température :

A. Température de jonction $T_c = f(T_a)$:

La température du jonction Tc de la cellule est donnée par la relation suivant [10]

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{800}G.....$$
 (III-15)

NOCT: la température nominale de fonctionnement de la cellule solaire

(Nominal operating cell température)

Ta : est La température ambiante

B. Variation du courant court circuit $I_{sc} = f(G; T_c)$:

La variation de courant de court-circuit Isc dépend de la température de jonction, de ce fait elle est représentée par la relation empirique suivante [10]

$$I_{sc} = K_1 G [1 + K_2 (G - G_0) + K_3 (T_c - T_0)]$$
.....(III-16)

Avec :

G0 : l'éclairement de référence (1000 w/m²) T0 : la température de référence (298 K) K1, K2 et K3 sont des constantes dépendant de la nature de matériau de la cellule et déterminées expérimentalement par le constructeur.

III.3.1.1.1. Caractéristique de la cellule PV A. la caractéristique I-V d'une cellule solaire



Figure III.9 : la caractéristique (I-V) d'une cellule solaire



Figure III.9.1: Fluctuations de la courbe (I-V) pour T constante (T=25C°) et G variable Figure III.9.2: Fluctuations de la courbe (I-V) Pour G constante (G=1000w/m2) et T variable



Figure III.10 : la caractéristique P-V d'une cellule solaire



Figure III.10.1 : l'influence du flux sur la caractéristique (P-V) d'un module

Figure III.10.2 : l'influence de la température sur la caractéristique (P-V) d'un module

Chapitre III

Paramètres Caractéristiques d'un module solaire:

Voici la description des paramètres d'un module :

La puissance crête PC : puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standard (25° C et un éclairement de 1000W/m2).

La caractéristique I (V) : courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui –ci.

Tension à vide Vco : tension aux bornes du module en absence de tout courant, pour un éclairement « plein soleil »

Elle est obtenue pour un courant de sortie nul à partir de l'équation (III-14)

Courant de court-circuit Icc : courant débité par un module en court circuit pour un éclairement « plein soleil ».

Il est obtenu pour une tension de sortie nulle à partir de l'équation (III-13)

Point de fonctionnement optimum (Um , Im) : lorsque la puissance de crête est maximum en « plein soleil » , Pm=Um .Im .

Rendement maximal : rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.

Facteur de forme FF: rapport entre la puissance optimale Pm et la puissance de radiation incidente.

Facteur de forme : rapport entre la puissance optimale Pm et la puissance maximale que peut avoir la cellule : Vco, Icc. [5]

Rendement énergétique maximum

Groupement des cellules solaires

Dans des conditions d'ensoleillement standard (1000W/m² ; 25°C ; AM1.5), un exemple de puissance maximale délivrée par une cellule silicium de 150 cm² est d'environ 2.3 Wc sous une tension de 0.5V. Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires

Une association de ns cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, Figure II-8.

L'équation (II-5) résume les caractéristiques électriques d'une association série de ns cellules. [3].

$V_{cons} = ns \ x \ V_{co}$ avec $I_{cc} = I_{ccns}$ (III-17)

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble.



Figure III.11 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série

D'autre part, une association parallèle de $\mathbf{n}_{\mathbf{p}}$ cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, Figure II-11

L'équation (III-18) résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de n_p cellules



Figure III.12 : Caractéristiques résultant d'un groupement de np cellules en parallèle

III.3.1.2. Modèle d'un module photovoltaïque :



Figure III.13 : Schéma Bloc d'un Module photovoltaïque

Le modèle utilisé pour simuler les performances du module PV (groupement en série de Ns cellule identiques) est déduit du modèle de la caractéristique d'une cellule solaire par l'équation suivante

Avec R's et R'_P résistance série et parallèle du module défini par : $R'_{S}=N_{S}R_{S}$ et $R'_{P}=N_{S}R'_{P}$ $V'=N_{S}V$

L'équation de base (III-10) de la cellule photovoltaïque élémentaire ne représente pas la caractéristique I-V d'un module photovoltaïque. Les modules sont composés de plusieurs cellules photovoltaïques connectées en série ou en parallèle. Les cellules connectées en série augmentent la tension et les cellules connectées en parallèle augmentent le courant. En se basant sur tout ce qu'est fourni par le logiciel Matlab nous pouvons valider notre modélisation et simuler les caractéristiques I-V, P-V du module PV.

III.3.1.3. Modèle du champ photovoltaïque :



Figure III.14 : Schéma Bloc d'un Champ photovoltaïque

III.3.2. Modélisation de la Conversion statique

En fonction du but recherché deux approches sont possibles dans la modélisation des convertisseurs électroniques. La première est utilisée dans des analyses de processus lents. Dans ce cas, l'influence du convertisseur est prise en compte par son rendement, souvent considéré comme constant, hypothèse qui ne reflète pas la réalité. La seconde est liée à des processus de courte durée, elle utilise un modèle établi sur la base de l'application des lois de Kirchoff dans le circuit électrique. Ces modèles sont appliqués à différents circuits qui prennent en compte l'état des différentes composants électroniques reliant le circuit à courant continu et celui à courant alternatif [5]

III.3.2.1. Modèle Hacheur DC/DC:

En alternative, un simple transformateur permet de changer la tension d'un niveau à un autre. Mais dans le cas d'une tension continue, on doit avoir recours à une approche bien différente, en utilisant un convertisseur DC-DC. Les convertisseurs de ce type convertissent un niveau de tension, à un autre par action de commutation. En raison de leur petite taille et leur efficacité par rapport aux régulateurs linéaires, ils s'imposent dans un très grand domaine d'application. Largement utilisés dans les équipements informatiques et électroniques pour fournir des tensions continues. La grande variété de topologie de circuit de convertisseurs varie entre une configuration à un transistor unique ; abaisseur (Buck), élévateur (Boost) et abaisseur élévateur (Buck-Boost) et des configurations complexes comportant deux ou plus d'interrupteurs et qui emploient la commutation douce ou les techniques de résonance pour contrôler les pertes de commutation Les convertisseurs DC-DC de type **Buck et** Boost, sont utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités. Ce type de convertisseurs n'est constitué que par des éléments réactifs (selfs, capacités) qui, dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'ils sont caractérisés par un grand rendement. La modélisation des convertisseurs a pour but d'analyser le comportement dynamique de ceux-ci, afin de synthétiser les lois de commande nécessaires qui permettent d'atteindre les performances désirées. La difficulté majeure vient du principe même de ces convertisseurs: ils sont non linéaires et présentent plusieurs configurations électriques distinctes lors d'une période de commutation. La modélisation du comportement dynamique doit permettre de caractériser le fonctionnement de convertisseur DC-DC dans les deux modes de conduction (continu et discontinu) [2]



Figure III.15 : Principe de base d'un hacheur.

Ce dernier est un convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « Boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la figure III.13 Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure. [1]



Figure III.16 : Hacheur Boost

Ce convertisseur est régi par les équations suivantes :

$$V_o = \frac{V}{(1-\alpha)} \quad \dots \quad (\text{III-21})$$

$$I_o = I(1 - \alpha)$$
(III-22)

 α : le rapport cyclique

Vo : la tension de sortie

Io : le courant de sortie du convertisseur Boost.

Le rapport cyclique a, est la sortie du système de commande MPPT (P&O).

Un panneau solaire donne des caractéristiques I-V et P-V présentées sur les figures 9 et 10 respectivement, et ces courbes mettent en évidence un point où la puissance absorbée par la charge est maximale, ce point est appelé point de puissance maximale, PPM. Cette puissance se dégrade en fonction de l'ensoleillement et la température. [4] La charge impose également sa propre caractéristique qui est en général différente du PPM, figure 16.



Figure 17 : Caractéristique I-V du PV superposé de la charge

Pour un module connecté directement à une charge, le manque à gagner en puissance est évident comme résultats retenus sur un module expérimenté à titre d'exemple, pour une puissance disponible à ces bornes de 60W, et une charge résistive de 50 Ω , cette dernière n'arrive à en extraire que 9W, dans des conditions d'ensoleillement et de température idéales.

Pour pallier ce manque, nous insérons, dans le montage, entre le module et la charge, un hacheur élévateur à rapport cyclique variable α généré par un système de commande MPPT. L'intérêt de cet ajout est de modifier l'équation caractéristique de la charge qui passe de $\frac{1}{R}$ à $\frac{1}{R(1-\alpha)^2}$ et par conséquent, l'impédance est adaptée à la source. [4] formule (III.23)

Comme il est expliqué sur la figure III.17 ce type de convertisseur fait adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal.



Figure III.18 : Conductance vu aux bornes du générateur PV



Figure III.19 : Modèle du concept de la commande P&O



Figure III.20 : Algorithme P&O

III.3.2.2. Onduleur

L'onduleur transforme le courant électrique continu produit par le module PV en courant électrique alternatif injecté au réseau. Le point-clef dans la conception de l'onduleur reste toujours le rendement de conversion DC/AC. Le rendement des onduleurs actuels est très élevé :

Par exemple, SolarMax fabrique les onduleurs ayant un rendement jusqu'à 97% pour quelques dizaines de kW, et jusqu'à 98,5% pour quelques centaines de kW [7].

Comme tout système électronique, l'onduleur a une durée de vie limitée, comprise entre 10 et 15 ans.

III.3.2.2.1. Architectures de l'association Modules PV-Onduleurs

Dans des conditions d'ensoleillement standard (1000W/m² ; 25°C ; AM1.5), un exemple de puissance maximale délivrée par une cellule silicium de 150 cm² est d'environ 2.3 Wc sous une tension de 0.5V. Une cellule photovoltaïque élémentaire constitue donc un générateur électrique de faible puissance insuffisante en tant que telle pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Les générateurs photovoltaïques sont, de ce fait réalisés par association, en série et/ou en parallèle, d'un grand nombre de cellules élémentaires. Une association de ns cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, Figure II-8. L'équation (II-5) résume les caractéristiques électriques d'une association série de ns cellules. [3]

Actuellement, il existe principalement trois associations de module PV et onduleur comme indiqué dans Figure III.20 : [7].

Système centralisé : un seul onduleur dimensionné en fonction de la puissance totale : soit l'option la plus adaptée aux petites installations

Système modulaire : plusieurs onduleurs sont reliés à une série de modules PV. L'option requise lorsque plusieurs champs de modules sont orientés différemment.

Système onduleurs intégrés aux modules PV pour les installations de grande puissance.



Figure III.21 : Topologies des systèmes photovoltaïques connectés à un réseau électrique



Figure III.22 : Classement des onduleurs photovoltaïques

L'isolement galvanique de l'onduleur connecté au réseau dépend des normes en vigueur dans chaque pays. Par exemple aux USA, l'isolement galvanique est toujours exigé. Pour l'isolement galvanique, on utilise un transformateur de BF ou HF. Cette dernière solution est plus compacte, mais il faut faire attention à la conception des transformateurs afin de minimiser les pertes (les pertes du système dépendront aussi du transformateur). C'est pourquoi l'onduleur sans transformateur a toujours le rendement le plus élevé. Différents types d'onduleur PV sont présentés dans la Figure III.21.

Les systèmes PV produisant un courant continu, la connexion au réseau électrique rend nécessaire un étage DC/AC. Parfois un seul convertisseur assure les deux réglages usuels : l'extraction du maximum de puissance et l'injection au réseau de courants sinusoïdaux. Mais on se prive d'un degré de la liberté du fait qu'il n'y a qu'un seul étage de conversion. C'est pour cela que la plupart de structures industrialisées comportent deux étages de conversion successifs : un DC/DC et un DC/AC.

III.4. Commande des systèmes photovoltaïques connectés au réseau

L'énorme avantage de cette solution est l'absence de batterie. On ne stocke plus l'énergie, on l'injecte directement dans le réseau local ou national. Et ceci sans limite quantitative, donc toute l'énergie est récupérée. Il y a un compteur qui tourne dans un sens pour la consommation, et un autre dans l'autre sens pour la production. Mais il faut tout de même convertir le courant continu des panneaux en alternatif au travers d'un onduleur et celui-ci doit être homologué par la compagnie d'électricité qui va recevoir ce courant car il doit respecter des normes sur sa qualité «sinusoïdale» [2]

Ce type de système offre beaucoup de facilités pour le (producteur/consommateur) puisque c'est le réseau qui se charge du maintien de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité. [9].

Dans notre travail nous nous sommes intéressées aux systèmes raccordés au réseau électrique pour les avantages suivants :

- 1- C'est le réseau qui s'occupe du maintien de l'équilibre entre la production et la consommation d'électricité.
- 2- Absence de batteries, on ne stocke plus l'énergie on l'injecte directement dans le réseau local ou national.
- 3- Toute l'énergie est récupérée.

III.4.1. Commande du premier étage DC/DC

III.4.1.1. Les hacheurs et la commande MPPT

Par définition, une commande MPPT (maximum power point tracking) associée à un étage intermédiaire d'adaptation (convertisseurs DC/DC) figure III.17, permet de faire fonctionner un générateur PV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quels que soient les conditions météorologiques, la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum((MPP): (Vmpp, Impp) [9]. De nombreux algorithmes ont été conçus pour atteindre un objectif aussi particulier pour les GPv. Mais loin de les abordés tous, nous avons préféré nous concentrer sur les meilleures et les plus utilisées de ces méthodes en raison de leur efficacité.

Dans cette perspective, nous allons étudier un convertisseur Boost, commandé par un MPPT de type perturbe & and observe (P&O) en utilisant le logiciel Simulink de MATALB

Le convertisseur statique continu/continu (DC/DC) utilisé, est le plus fréquemment utilisé comme convertisseur élévateur (Boost) (figure 16) [4].

• Commande de la tension VPV du module PV

Le bloc MPPT donne la tension V_{pv_ref} et on doit ensuite déterminer le courant de référence I_{Lref} qui assure cette tension et ce, via la commande du hacheur. Un correcteur PI est utilisé pour déterminer I_{Lref} , les coefficients Kp et Ki sont calculés comme suit :



Figure III.23 : Topologie d'un convertisseur Boost et schéma bloc d'une boucle à verrouillage de la tension V_{PV}

L'équation du condensateur C_{PV} est:

En appliquant une transformation Laplace, on obtient la fonction de transfert du modèle en petits signaux :

$$G_1(p) = \frac{V_{PV}(p)}{i_L(p)} = \frac{-1}{C_{PV*}p}$$
(III-25)

Avec un correcteur PI $C_1(p) = K_{p1} + \frac{K_{i1}}{p}$ La fonction de transfert de la boucle fermée (FTBF) s'écrit :

$$FTBF_{1}(p) = \frac{C_{1}(p).G_{1}(p)C_{PV}(p)}{1+C_{1}(p).G_{1}(p)} = \frac{1+\frac{K_{p1}}{K_{i1}}.p}{1+\frac{K_{p1}}{K_{i1}}.p-\frac{C_{PV}}{K_{i1}}.p^{2}}.....(III-26)$$

En comparant le dénominateur de FTBF avec la forme normalise $p^2 + 2.\zeta_{i.}\omega_{i.}p + \omega i^2$ on obtient :

$$K_{i1} = -\frac{C_{PV}}{T_1^2}$$
(III-27)

$$K_{p1} = -\frac{2.\xi C_{PV}}{T_1}$$
.....(III-28)

Pour annuler l'oscillation, on choisit $\zeta i = 1$. On veut un temps de réponse T₁=10ms ou bien $\omega_i = 1/T$.

III.4.1.2. P&O : Perturbation Et Observation (, Perturb And Observe):

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension, ou du courant, et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée (P=VI) [37]. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV. [2]



Figure III.24 : Caractéristique de la puissance d'un module PV

III.4.2. Commande du deuxième étage DC/AC

III.4.2.1. Commande de l'Onduleur

L'onduleur joue le rôle de commande du courant de sortie et indirectement de la tension du bus continu. Ce qui revient à dire que l'onduleur règle la tension du bus continu V_{DC} (à son entrée) via le réglage du courant injecté au réseau (à sa sortie), il assurera de même une poursuite sinusoïdale de ce courant. Parfois, pour plus de transparence par rapport à l'amont, on peut demander à cet onduleur des fonctions comme la compensation de réactif et encore plus rarement la compensation d'harmoniques (filtrage actif).

Le schéma de commande de l'onduleur est représenté dans Figure III.25, il se compose de deux parties ayant deux rôles différents :

- commande du courant de sortie (boucle interne)
- commande de la tension du bus continu (boucle externe) via la commande de la puissance sortie de l'onduleur. [11]



Figure III.25 : Boucles de commande de l'étage DC/AC

a) Régulation de la tension du bus continu

La tension moyenne V_{DC} aux bornes du condensateur doit être maintenue à une valeur fixe. La principale cause susceptible de la modifier est liée aux pertes (dans les interrupteurs et filtres de sortie) ou bien la fluctuation de la tension du réseau. La sortie du régulateur P_{ref} engendre un courant fondamental actif corrigeant ainsi V_{DC} . La puissance P_{ref} représente la puissance active nécessaire pour maintenir la tension V_{DC} égale à la valeur de la tension de référence souhaitée (V_{DCref}). [7]

En négligeant les pertes de commutation de l'onduleur ainsi que l'énergie stockée dans l'inductance du filtre de sortie, la relation entre la puissance absorbée par le filtre actif et la tension aux bornes du condensateur peut s'écrire sous la forme suivante :

A partir de la relation ci-dessus, et en prenant en compte le régulateur PI, la boucle de régulation de la tension continue peut être représentée par le schéma de la Figure III.24



Figure III.26 : Boucle de régulation de la tension continue

b) Commande du courant de sortie

A la sortie de la boucle de régulation de tension V_{DC} on obtient la puissance de référence P^*_{ref} . Grâce à cette puissance de référence et la tension du réseau V_{res} , on peut identifier le courant de référence (Figure II.25) : [7]

$$I_{ref} = I \sqrt{2.sin\theta}$$
(III-30)

ou

$$I = \frac{P_{ref}}{V}$$

V : valeur efficace de la tension du réseau Vres θ : angle de synchronisation, donnée par PLL



Figure III.27 : Boucles de commande de l'étage DC/AC

Équation d'état de l'onduleur :

Lond et Rond : inductance et résistance de l'onduleur

Transformation Laplace de la fonction de transfert du modèle aux petits signaux

$$G_3(P) = \frac{I_{ond}(P)}{\beta(P)} = \frac{V_{DC}}{L_{ond} \cdot P + R_{ond}} \dots (\text{III-32})$$

Le correcteur PI est de la forme: $G_3(P) = K_{p3} + \frac{K_{i2}}{P}$ Fonction de transfert en boucle fermée :

$$FTBF_{3}(P) = \frac{C_{3}(P).G_{3}(P)}{1+C_{3}(P).G_{3}(P)}.....(III-33)$$

$$FTBF_{3}(P) = \frac{\frac{V_{ond}}{L_{ond}}(PK_{p3}+K_{i3})}{P^{2} + \frac{K_{p3}V_{DC}+R_{ond}}{L_{ond}}P + \frac{K_{i3}V_{DC}}{L_{ond}}}.....(III-34)$$

En identifiant dénominateur de FTBF à la forme normalisée $p_2 + 2\sigma\omega i p + \omega i^2$ On obtient :

$$\frac{K_{p3}V_{DC} + R_{ond}}{L_{ond}} = 2\sigma\omega i$$

$$\frac{K_{i3}V_{DC}}{L_{ond}} = \omega i^{2}$$

$$K_{p3} = \frac{2\sigma\omega i \cdot L_{ond} - R_{ond}}{V_{DC}}$$

$$K_{i3} = \frac{\omega i^{2} \cdot L_{ond}}{V_{DC}}$$
...... (III-35)

III.4.2.2. PLL

Afin de connecter des sources PV au réseau électrique, il faut synchroniser la tension alternative du générateur PV (en fait les courants injectés) à celle du réseau, c'est pourquoi l'information de phase et de fréquence de la tension du réseau est nécessaire. [7].

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes classiques telles que

- Zéro Crossing » [30] qui utilise une logique de OU Exclusif ;
- Méthode de filtrage de la tension comme $\alpha\beta$ filtre ou dq filtre
- Méthode PLL (Phase Locked Loop)

La méthode PLL est la plus efficace, sa structure est très diversifiée, mais comprend toujours 3 blocs :

- Détecteur de phase,
- Correcteur,
- Oscillateur commandé en tension.

Pour le système triphasé, le principe de la PLL est présenté dans la figure III.28. Avec les techniques avancées de PLL, on recherche une poursuite robuste de la phase du réseau et ce, face aux perturbations possibles :

- saut de phase,
- creux et bosses de tension,
- harmoniques,
- saut de fréquence. [7].



Figure III.28 : Structure de principe d'une PLL triphasée

Les PLL monophasés sont soumis aux mêmes problèmes que le triphasé avec une difficulté supplémentaire qui résulte du champ d'information plus réduit (une seule phase). Pour créer 2 signaux orthogonaux, la PLL triphasée peut utiliser la transformation de Park, mais pour la PLL monophasée, il faut rajouter un bloc « Quadrature » de démodulation. Plusieurs solutions sont décrites dans la littérature en utilisant des retards, et diverses transformations : Hilbert, projection sur un repère orthogonal, intégrateurs généralisés. Un filtre est souvent introduit dans la boucle afin de réduire les distorsions du signal de la tension mesurée : simple passe bas, résonant, moyenné glissant.

Dans cette partie, une PLL dont la structure présentée dans la Figure III.29. Cidessous est utilisé:



Figure III.29 : Structure du PLL utilise

Les performances de cette PLL sont évaluées par les résultats de simulation dans ce qui suit. Ces résultats présentent la réponse de la PLL dans tous les cas de perturbations : saut de fréquence, chute de tension, distorsion harmonique, saut de phase et ils nous montrent que la PLL choisie est performante et robuste par rapport aux perturbations du réseau. On peut ainsi explorer les lois de contrôle/commande du système PV sans se soucier outre mesure de la fiabilité de la PLL.



Figure III.30 : Circuit de puissance et commande d'un système PV triphasé connecté au réseau électrique

III.5. Influence du réseau sur le système PV

Afin d'éviter des déconnexions non-justifiées, l'orientation proposée porte sur l'intégration d'un système de contrôle/commande (intelligent) dans les onduleurs PV. L'utilisation d'un tel contrôle/commande des onduleurs pourrait avoir comme avantages :

- la réduction des coûts de raccordement,
- l'augmentation des performances des onduleurs PV,
- la possibilité de mise en œuvre de fonctionnalités permettant d'améliorer le fonctionnement du réseau ou la qualité de la tension,
- Et ce, sans pour autant diminuer l'efficacité du dispositif de découplage des onduleurs.
- Le système de commande doit ainsi assurer les fonctions suivantes :
- Maintenir la tension du bus continu de l'onduleur PV dans ses limites de tolérance lors d'un creux de tension.
- Permettre la participation au maintien de la tension au nœud de raccordement en utilisant un régulateur auto-adaptatif de tension.

Toutes ces fonctions doivent être compatibles avec le respect du plan de tension et tenir compte du fonctionnement normal de la protection de découplage. [11]

III.5.1. Limitation de la tension du bus DC en cas de creux de tension

L'augmentation de la tension du bus continu V_{DC} à une valeur supérieure à la valeur maximale admissible est une des causes de déconnexion des onduleurs PV, et ce de par la protection intégrée à l'onduleur.

La méthode consiste à l'utilisation directe de la caractéristique des panneaux solaires Quand la tension du bus continu augmente, la tension de sortie des modules PV également et la puissance envoyée au réseau diminue du fait que l'on s'éloigne petit à petit du point de Maximum de Puissance ; en conséquence, la tension du bus DC reste dans la limite admissible.

Nous proposerons donc une solution permettant de résoudre ce problème de surtension pour un système PV comprenant un étage DC/ DC.





Figure III .31. Bilan de puissance dans le bus continu

La tension du bus continu V_{DC} est influencée par les variations du courant de sortie du hacheur lequel dépend du MPPT donc des caractéristiques exogènes (T°, ensoleillement..).Cette tension peut aussi augmenter en cas de saturation du courant injecte au réseau (creux de tension ou court-circuit à la sortie de l'onduleur). Dans cette section, on s'intéresse au fonctionnement normal, ou le courant de sortie de l'onduleur reste encore dans sa limite admissible.

En négligeant les pertes internes dans le hacheur et l'onduleur, la puissance instantanée fournie par les panneaux PV est la somme de la puissance instantanée d'entrée dans le condensateur et de la puissance instantanée envoyée au réseau (voir Figure III.31

$$P_{PV}(t) = P_C(t) + Pres(t)$$
(III-36)

En cas court-circuit côté du réseau, la tension du réseau baisse ce qui provoque une baisse de puissance fournie au réseau à la limitation de courant. Pendant ce temps, la puissance fournie par les panneaux PV reste constante. Le déséquilibre entre la puissance d'entrée et la puissance de sortie provoque une augmentation de l'énergie accumulée par le condensateur C. C'est pourquoi la tension aux bornes de condensateur augmente jusqu'a parfois à dépasser la limite admissible en cas de dépassement de la puissance apparente de sortie de l'onduleur. Apres l'élimination de défaut, les puissances s'équilibrent et la tension du bus stabilisée, mais à une valeur plus élevée. Il faut donc ajouter une boucle pour régler cette tension. Le principe de contrôle de la tension du bus continu V_{DC} est de décharger lénergie résiduelle pour diminuer la tension. La formule représente la relation entre la tension du bus continu V_{DC} et l'énergie stockée dans le condensateur est:

$$E = \frac{1}{2} C V_{DC}^2 \qquad (\text{III-37})$$

On veut que V_{DC} ne dépasse pas la valeur V_{0ref}, donc l'énergie stockée est de :

Alors, si la tension V_{DC}>V_{0ref}, il faut décharger une quantité d'énergie :

$$\Delta E = E - E_{\theta} = \frac{1}{2} C (V_{DC}^2 - V_{0ref}^2) \dots (III-39)$$

Ainsi, on augmente la puissance sortie de l'onduleur par une quantité :

$$\Delta P = \frac{\Delta E}{T} = \frac{C}{2T} (V_{DC}^2 - V_{0ref}^2) = K_P (V_{DC}^2 - V_{0ref}^2) \dots (III-40)$$

Ou, T est la durée de décharge du condensateur et $K_P = \frac{C}{2T}$

En résumé, on contrôle le courant de sortie pour maintenir la tension VDC dans les limites acceptables.

- Si V_DC<V_{0ref}, I=I'

- Si V_{DC} > V_{0ref} , I=I'+ ΔI

Dans la simulation en régime normal, on impose V0ref = 500V et on trouve que la tension VDC reste toujours inferieure à cette valeur.

III.5.3. Commande de la tension du bus continu en régime de défaut

Dans la section précédente V.1.2, on a vu le réglage de la tension V_{DC} lorsque le courant de sortie de l'onduleur reste dans les limites admissibles. Maintenant, on va voir ce qui se passe quand ce courant dépasse cette limite. On rappelle que dans la Figure V.2, la puissance instantanée en sortie du hacheur est la somme de la puissance instantanée en entrée dans le condensateur et la puissance instantanée en entrée dans l' onduleur de tension.

$$P_{DC}(t) = P_C(t) + P_{ond}(t) \dots (III-41)$$

$$P_{ond} = I_{ond} \cdot V_{res}$$
 (III-42)

Quand V_{res} diminue, I_{ond} augmente. Jusqu'' a une valeur quelconque, I_{ond} doit être limite, alors Pond<P_{DC}, l' énergie est accumulée dans le condensateur. C' est pourquoi la tension V_{DC} augmente toujours et dépasse la limite admissible Vseuil. En effet, Vseuil est le seuil de déclenchement de la protection interne, donc le système PV est déconnecte du réseau. A partir de cette analyse, on peut conclure que pour limiter la tension V_{DC} , il est nécessaire de limiter la puissance P_{DC} , c'est-à-dire limiter le courant du hacheur. En plus, P_{DC} est presque proportionnelle avec PPV ($P_{DC}=P_{PV}$) si on néglige les pertes dans le hacheur), alors il faut diminuer PPV. Une solution très simple est de diminuer le courant IL en multipliant le courant référence I_{Lref} avec un coefficient k, 0 < k < 1 ce qui de fait dégrade le MPPT.

Figure IV.14 Schéma de principe de la commande du hacheur pour limiter la tension du bus



Figure III.32 : Schéma de principe de la commande du hacheur pour limiter la tension du bus continu

En résumé, on contrôle le courant I_L du hacheur pour maintenir la tension V_{DC} dans une limite acceptable.

 $I'_{Lref} = k.I_{Lref}$

Ou

I'Lref : le courant de référence pour commander le hacheur

ILref: le courant de référence généré par l'algorithme MPPT

k: coefficient qui dépend de la tension V_{DC}

- $_$ Si V_{DC} < V_{seuil}, k=1
- $Si V_{DC} > V_{seuil}, k=f(V_{DC}), 0 < k < 1$

III.5.4. Comportement de l'onduleur avec la commande tension du bus continu face au court-circuit

Dans la section suivante, la simulation est effectuée avec $V_{seuil} = 1,2 \times V_{0ref} = 600V$.

La boucle supplémentaire proposée s'appelle nouvelle

commande pour la distingué de l'ancienne commande.

La différence entre la commande ancienne et la nouvelle commande est la suivante :

- La commande ancienne limite la tension V_{DC} en laissant constante la puissance PV

- La nouvelle commande limite la surtension V_{DC} en diminuant la puissance PV.

Les simulations sont effectuées dans le cas d'un court-circuit phase-neutre, avec la commande ancienne et la nouvelle commande.

Dans la Figure III.33, le court-circuit a lieu entre 0,4s et 0,55s. Avec la commande ancienne, la puissance du panneau PV injectée dans le hacheur reste constante, c'est pourquoi la tension V_{DC} augmente jusqu' à 1500V après 150ms (en réalité, cette surtension provoquera un déclenchement du système PV).



Figure III.34 : Puissance du panneau PV



Figure III.36 : Puissance sortie de l'onduleur

Avec la nouvelle commande, la puissance du panneau PV diminue pour maintenir V_{DC} inférieure à 600 V (Figure III.34) et la tension V_{PV} augmente (Figure III.35) en respectant la caractéristique du PV. Apres 150 ms, le défaut est éliminé, le MPPT continue à chercher le point de puissance maximale et pendant 0,15 s, le système PV continue à produire de l'énergie sans aucune déconnexion. La Figure III.36 présente la puissance sortie de l'onduleur.

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents composants du système de Photovoltaïque à partir des modèles les plus validés et les mieux reconnus pour leur bonne efficacité. Cette modélisation est une étape essentielle qui nous a permis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi les paramètres constituants et par ailleurs, bien estimer l'influence de chaque composant sur le comportement d'un système PV raccordé au réseau. De ce travail il a était retenu que le procédé de commande MPPT associée à la méthode P&O, approprie au système GPV est une partie intégrante du domaine photovoltaïque. Les modèles mathématiques ainsi présenter vont nos servir, dans le chapitre 4. pour la modélisation de tous le système raccordé au réseau.

Dans cette partie, nous avons présenté une méthode efficace pour éviter la déconnexion des systèmes PV causée par la surtension du bus continu en cas de court-circuit. La solution proposée consiste à limiter la puissance d'entrée du condensateur, ce qui permet de limiter la tension du bus continu. Pour réaliser cette fonction dans le système de contrôle numérique de l'onduleur PV, on ajoute seulement quelques instructions de commande, sans qu'il soit nécessaire de modifier le matériel physique.

Chapitre IV

Simulation d'un Système PV Connecté au Réseau

IV.1. Centrale photovoltaïque de 400 kW connectée au réseau

C'est un modèle moyen d'un petit parc photovoltaïque d'une puissance installé de (400 kW) connecté à un réseau de 25 kV à l'aide d'un convertisseur à deux étages. Le parc photovoltaïque se compose de quatre générateurs photovoltaïques fournissant chacun un maximum de **100 kW** sous un rayonnement solaire de 1 000 W/m². Un seul générateur photovoltaïque se compose de 64 chaînes liées en parallèles où chaque chaîne à 5 modules SunPower SPR-315E connectés en série.

Chaque générateur photovoltaïque est connecté à un convertisseur DC/DC (modèle moyen). Les sorties des convertisseurs boost sont connectées à un bus DC commun de 500 V. Chaque boost est contrôlé par des trackers de point de puissance maximale (MPPT) individuels. Les MPPT utilisent la technique "Perturb and Observe" pour faire varier la tension aux bornes du générateur PV afin d'obtenir la puissance maximale possible.



Figure IV.1 : Générateur GPV de 100 kW + Hacheur

Un convertisseur de tension triphasé (VSC) convertit les 500 v CC en 260 v CA et maintient le facteur de puissance unitaire. Un transformateur de couplage triphasé 400 kVA 260V/25kV est utilisé pour raccorder le convertisseur au réseau. Le modèle de réseau se compose de départs de distribution typiques de 25 kV et d'un système de transport équivalent à 120 kV.

Dans le modèle moyen, les convertisseurs boost et VSC sont représentés par des sources de tension équivalentes générant la tension alternative moyennée sur un cycle de la fréquence de commutation. Un tel modèle ne représente pas les harmoniques,
mais la dynamique résultant de l'interaction du système de contrôle et du système d'alimentation est préservée. Ce modèle permet d'utiliser des pas de temps beaucoup plus grands (50 us), résultant en une simulation beaucoup plus rapide.



Caractéristique	Symbole	Valeur
Tension à circuit ouvert	V _{co}	64,6 v
Tension au point MPP	V _{MPP}	54,7 v
Puissance Max	P _{MAX}	315,072 W
Courant de court circuit	l _{sc}	6,14 A
Courant au point MPP	Impp	5,76 A
Nbre de Cellule par module	N _{cell}	96
Photo-Courant	l _{ph}	6,1461 A
Courant de saturation de la diode	lo	6,504 3e-i2
Coéficient d'idéalité	А	0,9507
Resistance serie	R _s	0,43042 Ω
Résistance parallèle	R _p	430,0559 Ω

85

IV.1.1. Résultats de simulation



Les systèmes PV se comportent comme une source intermittente, leur puissance dépend de la température: la Figure IV.3.a. montre cette caractéristique. Dans le cas du système PV raccordé au réseau, on travaille au point de puissance maximale MPP aux fins de maximisation du rendement. Mais ce MPP varie toujours en fonction de la température. On doit donc mettre en œuvre un algorithme permettant de suivre ce point en temps réel, il s'agit de l'algorithme MPPT





Les systèmes PV se comportent comme une source intermittente, leur puissance dépend de l'éclairement : la Figure IV.3.b. montre cette caractéristique. Dans le cas du système PV raccordé au réseau, on travaille au point de puissance maximale MPP aux fins de maximisation du rendement. Mais ce MPP varie toujours en fonction de l'irradiation. On doit donc mettre en œuvre un algorithme permettant de suivre ce point en temps réel, il s'agit de l'algorithme MPPT

Figure IV.3.b : Caracteristiques (I-V) et (P-V) en fonction de l'ensoleillement



Figure IV.4.a : Allure du Courant du GPV avec variation la température et ensoleillement constant

Il très remarquable sur la figure IV.4.a. que le courant du générateur photovoltaïque est quasi invariable par rapport à la variation de la température des cellules ce qui confirme le résultat enregistré de la caractéristique (I-V) présentée sur la figure IV.3.a.



Figure IV.4.b : Allure de la tension du GPV avec variation température et ensoleillement constant

D'après le résultat enregistré sur la figure IV.4.b. il est à retenir que la tension du générateur photovoltaïque est très sensible à la variation de la température. Ce résultat est en totale conformité avec le résultat précédent présenté sur la figure IV.3.a.



Figure IV.5.a : Allure du Courant du GPV avec variation de l'ensoleillement et température constante

Déjà mesuré sur l'enregistrement présenté à la figure IV.3.b. le courant du module GPV à l'instant t=1s chute instantanément sous l'effet de la dégradation du niveau de l'éclairement de 1000kW/m^2 (max) jusqu'à 500 kW/m². A l'instant t=2s le courant augmente suite à la montée de l'éclairement.



Figure IV.5.b : Allure de la tension du GPV avec variation de l'ensoleillement et température constante

La figure IV.5.b montre bien l'efficacité du contrôleur MPPT qui grâce a l'algorithme de la méthode P&O il parvient à ramener et maintenir avec précision le point de fonctionnement sur les point max de la caractéristique (P-V) de la figure précédente IV.3.b. En résultat, la tension du module avec une faible oscillation est quasi invariable à la variation de l'ensoleillement.



De sa nature la tension du GPV est variable aux variations de la température. Les faibles fluctuations à t=1s et t=2s montre bien l'intervention de l'interface de conversion statique (Hacheur Boost) commande par sa qui appropriée parvient à maintenir un niveau de tension fixe dans le bus continu





la différence de Α la température l'ensoleillement est un phénomène très rapide dans ces variations. La figure IV.6.b. fait apparaitre la réponse rapide de la commande adaptée de la MPPT face à une baisse de tension du Bus continue, très importante et très rapide, a l'instant à t=1s moment de dégradation du niveau la de l'ensoleillement





Figure IV.7.a : Allure du courant réseau avec variation température

Il se confirme davantage du résultat d'enregistrement des courant de phases présenté sur la figure IV.7.a. que même du côté réseau le courant de phase dans sa forme sinusoidale est quasi invariable avec la variation de la température.



Figure IV.7.b : Allure du courant réseau avec variation de d'ensoleillement

L'enregistrement de mesure du courant de phase aprés l'onduleur montre comme présenté sur la figure IV.7.b. que l'amplitude du courant du réseau est très proportionnelle à la variation de l'ensoleillement sur les panneaux solaires.



Figure IV.8.a : Allure de la puissance injectée dans le réseau avec la variation de la température

L'influence de la température sur le rendement des panneaux photovoltaïques, discutée dans les chapitres plus haut, explique bien l'allure du graphe d'enregistrement de la mesure de la puissance présentée sur la figure IV.8.a. L'élévation de la température implique une baisse de la puissance photovoltaïque produite. Donc le point de puissance maximale se déplace pour rejoindre le nouveau point maximum correspondant à cette température.



Figure IV.8.b : Allure de la puissance injectée dans le réseau avec la variation de d'ensoleillement

La figure IV.8.b. Montre clairement que la puissance active que peut fournir le système photovoltaïque au réseau dépend du niveau d'ensoleillement du faite de la dépendance du courant



Figure IV.9.a : Allure de la tension réseau avec variation de la température



Figure IV.9.b : Allure tension réseau avec variation de d'ensoleillement

Les figures IV.9.a et b. montrent bien que l'interface de la conversion statique qui relie le GPV au réseau ramène le système PV à avoir une tension constante quelle que soit les conditions météorologiques.

VI.2.Conclusion

Les résultats que nous avons enregistré de cette simulation nous on permet de bien observer la réponse du système photovoltaïque raccordé au réseau à des différentes situations imposées par la variation des paramètres climatique (température et ensoleillement) Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation et le contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau de distribution électrique. Un tel dispositif est amené à connaître une émergence importante liée essentiellement à une volonté de plus en plus affichée de diversification et de décentralisation des moyens de production d'électricité et ce, conformément aux nouvelles exigences mondiales en termes d'énergie verte.

Nous avons étudié le générateur photovoltaïque et son comportement ainsi que ses caractéristiques principales en fonction de la température et du niveau d'ensoleillement.

Cette étude nous a permis d'estimer l'impact de la connexion des générateurs PV au réseau de distribution électrique d'une manière précise dans différentes conditions météorologiques (niveau d'ensoleillement et température).

La recherche bibliographique qui nous aidé à élaborer cet ouvrage, nous a mis en face d'une diversité de technologies et une multitude de solutions en termes d'intégration des GPV aux réseaux électriques ; nous avons opté pour l'étude des modèles à performances maximales qui sont conçus avec des éléments tout aussi performants dans une architecture efficace.

Pour le générateur photovoltaïque, nous avons choisi le modèle a une diode (Modèle 1-D), et pour la conversion statique DC/AC, nous avons opté pour les hacheurs parallèles (Boost) et les onduleurs triphasés.

En ce qui concerne la partie commande, de part et d'autre du DC Bus, nous avons choisi la méthode P&O (Perturbe & Observe), l'algorithme le plus employé dans la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) pour optimiser et contrôler la puissance du côté hacheur et la PLL du côté onduleur afin de commander et synchroniser les tensions au point de raccordement avec le réseau.

Les résultats de la simulation justifient le choix pour le MPPT/P&O en tant que méthode efficace facilitant la connexion du système PV au réseau au profit d'une meilleure intégration des systèmes photovoltaïques à la production électrique.

Références Bibliographiques

- [1]: BOUHAFS Roumaissa, KANOUN Imen, << Analyse et étude technico-économique d'un système pompage (GPV-GD) autonome.>>, Master, Université BADJI Mokhtar/Aannaba, 2019.
- [2] : FERDJANI Souleyman, MAATALLAH Omar ,< < Etude et Réalisation d'un Hacheur Boost Commandé par le μC ARDUINO en vue d'Implémenter des Commandes MPPT
 >>,Master Université Ahmed Draia /Adrar, 2019.
- [3] : MEZIANI Zahra << Modélisation de Modules Photovoltaïques >>, Magister Université de Batna, 2012.
- [4] : Saad MOTAHHIR, Abdelaziz EL GHZIZAL, Aziz DEROUICH << Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM >>,2^{ième} édition du Congrès International de Génie Industriel et Management des Systèmes/ CIGIMS 2015, EST de Fès - 21, 22 et 23 mai 2015.
- [5] : BELGHITRI Houda << Modélisation, Simulation Et Optimisation D'un Système Hybride Eolien-Photovoltaïque>>, Magister, Université Abou-Bakr Belkaid /Tlemcen, 2010.
- [6] : LUDMIL Stoyanov <<Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables>>, Doctorat, Université Technique de Sofia, 2011.
- [7]: Van-Linh Nguyen << Couplage des systèmes photovoltaïques et des véhicules électriques au réseau : problèmes et solutions >>, Doctorat, Université de Grenoble/France, 2014.
- [8] : GAMNI Abdelkader <<Etude et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique (étude de cas réseau d'Adrar) >>, Master, Université d'Adrar, 2012.
- [9]: OUABDELKADER Katia, MERSEL Houria << Modélisation et Contrôle d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau >>, Master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2015.
- [10] : BELHADJ Mohammed << Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome >>, Magister, Universitaire De Bechar 2008.
- [11] : Thi Minh Chau LE <<Couplage onduleurs photovoltaïques et réseau, aspects contrôle / commande et rejet de perturbations>>, Doctorat, Université De Grenoble, 2012

- [12] : Mirza Mursalin Iqbal, Md. Kafiul Islam << Design And Simulation Of A PV System With Battery Storage Using Bidirectional DC-DC Converter Using Matlab Simulink>>, Article University of Asia Pacific/Independent University, Bangladesh, 2017.
- [13] : Laurence Serra, <<Barrières à l'implantation de projets d'énergie renouvelable dans les communautés hors réseau des régions Nordiques Canadiennes>>, Mémoire de Magister, Université Sherbrooke, Canada, 2011.
- **داحي محمد** <<الطاقات المتجددة كخيار إستراتيجي في ظل المسؤولية عن حماية البيئة" دراسة حالة الجزائر>> : [14] مداحي محمد <<الطاقات المنف، 2012.
- **أبو بكر الجندى** << دراسة مستقبل الطاقة الشمسية في مصر >>، مطبعة الجهاز المركزي للتعبئة العامة :[15] و الإحصاء 2015.
- [16] : https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/biomasse
- [17] : BIDI Manel<<Conception d'une centrale photovoltaïque pour recharge de voitures>>, Université de Msila.2019.
- [18] : BENCHEMSA Issam, << Optimisation de l'utilisation de l'énergie thermique pour le Chauffage domestique >>, Université Badji Mokhtar Annaba, 2017.
- [19] : https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energies-marines
- [20]: https://www.univ-sba.dz/ft/images/Polycopie/POLYCOPIE-BENAMARA.pdf
- [21]: KELKOUL Bahia, << Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation >>, Magister, Université Abou-Bekr Belkaid –Tlemcen, 2011.
- [22] : ABBAD Imane << Simulation de l'effet des paramètres climatiques (température, poussière et éclairement) sur le rendement d'une cellule solaire. >> Master, Université Larbi Ben M'Hidi / Oum El Bouaghi, 2019
- [23] : TAHIR Raouf, DEHOUCHE El Aziz, << Commande en puissance d'une centrale hydroélectrique >> Master, Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 2015
- [24] : CABAL Cédric, << Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [25] : BENSACI Wafa, "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT >>, mémoire de Master en Génie Electrique, Université Kasdi Merbah Ouargla, (2011).

- [26]: MILOUDI Lélia, << Etude et simulation de la poursuite de la trajectoire du soleil Par un panneau solaire photovoltaïque >>, Magister, Université Mohammed BOUGARA Boumerdes, 2012.
- [27] : ZERROUKI Zolikha, BEREKSI Reguig Rym, << Dimensionnement d'un système Photovoltaïque autonome >>, Master, Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, 2017.
- [28]: https://lenergie-solaire.net/qu-est-ce-que-energie-solaire/l-energie-solaire-passive
- [29] : HADJ BELKACEMI Mohammed, << Modélisation et étude expérimentation d'un capteur solaire non vitré et perforé >>, Mémoire de Magister, Université Abou-Bekr Belkaid-Tlemcen, 2011.
- [30] : ABDALLAH Jelali, <<Interconnexion d'un système photovoltaïque sur le réseau électrique">>, Magister, Université du Québec à Trois-Rivières, Canada, 2012.
- [31] : Brochure d'information << Le marché solaire PV en Algérie >> FR-Ren-03.Pdf
- [32] : SADI Mohammed El Amine, HAMLAT Zohra, << L'impact des énergies renouvelables sur les réseaux électriques Ouest Algérien 220 KV>>, Master, Université de Tahar Moulay de Saida, 2014.
- [33] : Antonio Luque and Steven Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, John Wiley & Sons Ltd, 2003
- [34] : ZAIRI Soufiane, BOUBIADA Slimane << Etude et Dimensionnement d'un centrale Photovoltaïque >>, Master, Université Mohamed Khider de Biskra, 2020
- [35] : C.Delerome « Revue internationale d'héliotechnique », 1997.
- [36] : K.Helali << modélisation d'une cellule photovoltaïque : étude comparative >> Mémoire de magistère, Tizi-ouzou, 2012.
- [37] : https://www.quelleenergie.fr/economies-energie/panneaux-solaires photovoltaïques/monocristallin
- [**38**] : https://www.choisir.com/energie/articles/137788/comparatif-entre-panneaux-solaires-monocristallins-et-polycristallins.
- [39] : www.flexyourte.com
- [40] : AOUFI Saliha, << Modélisation et commande d'un système de pompage Photovoltaïque >>, Magister, Université Ferhat Abbas-Sétif 1-,28/09/2014.
- [41]: Energie-solaire-photovoltaïque-PDF

- [42] : FELLAH Nadia, SIDIBE Oumar<< Intitulé du sujet Etude et dimensionnement de l'installation photovoltaïque du DECANAT de la faculté ST>>Master, Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2019.
- [43] : https://www.solaris-store.com/content/39-installer-un-regulateur
- [44]: http://www.solaire-guide.fr/onduleurs-photovoltaiques/
- [45] : Mémoire sur la Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance Énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie http://bu.univ-chlef.dz/doc_num.php?explnum_id=445
- [46].: https://www.vattenfall.fr/le-mag-energie/electricite/toutes-les-techniques-pourproduirede-l-electricite
- [47] : Chapitre_2_Systèmes_photovoltaïques-partie1.PDF