

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ IBN KHALDOUN DE TIARET
FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commandes électriques

THÈME

**Modélisation, contrôle et simulation d'un
système (Photovoltaïque /Super capacité)
connecté à un site isolé**

*Préparé par : BOUROKBA Noureddine
DJERBOUB Ahmed*

Devant le Jury :

Nom et prénoms	Grade	Qualité
Tayeb ALLAOUI	Pr	Président
Youcef MIHOUB	MCB	Examineur
Seif eddine Belfedal	MCB	Examineur
Belkacem BELABBAS	MCB	Encadreur
Souad LARIBI	MCB	Co-Encadreur

Promotion : 2019/2020

Remerciement

*À l'issue de cette fin d'étude, nous adressons nos sincères remerciements
premièrement à « Allah » tout puissant qui nous a donné la santé, la patience et
le courage.*

*Nous remercions sincèrement Mr BELABBES Belkacem et Mme Laribi Souad
Pour avoir dirigé et suivi ce travail.*

*On tient à adresser nos plus vifs remerciements à Monsieur ALLAOUI Tayeb, pour
le grand honneur d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.*

*Nos vifs remerciements vont également à Messieurs MIHOUB Youcef et
Belfedal Seifeddine pour avoir accepté d'examiner notre travail et d'être
membres du jury de soutenance.*

*On remercie aussi tous nos enseignants du département de génie électrique.
De grands remerciements aux membres de Laboratoires de Génie Energétique et
Génie Informatique (L2GEGI) pour leurs aides précieuses et pour le temps
qu'ils ont bien voulu nous consacrer.*

*Ont n'exclue pas de ces remerciements toutes les personnes qui ont aidé de près
ou de loin dans la réalisation de ce PFE.*

*Enfin, on remercie tout particulièrement nos parents, pour leur soutien
inconditionnel tout au long de nos longues années d'études.*

On veut également remercier nos familles et nos amis pour leur soutien moral.

*Les discussions, les remarques et les commentaires de nos collègues ont été
sources d'idées et ont contribué au développement et à l'amélioration de cette
étude.*

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I.....	3
Généralité sur le Système Photovoltaïque.....	3
I.1. Introduction.....	4
I.2. Energie photovoltaïque.....	4
I.2.1. Historique de l'énergie photovoltaïque.....	5
I.3. Energie photovoltaïque dans le monde.....	5
I.4. Production d'énergie en Algérie.....	6
I.5. Les différents types de système photovoltaïques.....	7
I.5.1. Systèmes isolés et autonomes.....	7
I.5.2. Le connecté au réseau.....	8
I.6. Avantage et inconvénients de l'énergie photovoltaïques.....	9
I.6.1. Avantage de l'énergie photovoltaïque.....	9
I.6.2. Inconvénients de l'énergie photovoltaïque.....	9
I.7. Système de stockage d'électricité.....	10
I.7.1. Stockage direct.....	10
I.7.2. Stockage indirect.....	11
I.8. Système de contrôle et de surveillance.....	11
I.9. Conclusion.....	12
Chapitre II.....	13
Modélisation et Simulation d'un Système PV.....	13
II.1. Introduction.....	14
II.2. Effet photovoltaïque.....	14
II.3. Cellule photovoltaïque.....	14
II.4. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	15
II.5. Générateur photovoltaïque (GPV).....	16
II.5.1. Caractéristique courant-tension.....	16
II.5.2. Influence de l'ensoleillement.....	17
II.6. Hacheur.....	20
II.6.1. Fonctionnement.....	21
II.6.2. Modèle mathématique équivalent.....	21
II.7. Poursuite du point de puissance maximum.....	22
II.7.1. Principe de l'algorithme de PPM.....	23
II.7.2. Méthode de l'algorithme de la perturbation et l'observation (P&O).....	23

II.8. Résultats de simulation et interprétation.....	24
II.9.Conclusion	25
Chapitre III	27
Système de Stockage	27
III.1. Introduction	28
III.2. Super condensateur.....	28
III.2.1. Classification.....	28
III.2.1.a. Carbone.....	28
III.2.1.b. Electrolyte	29
III.2.1.c. Séparateurs.....	29
III.2.1.d. Collecteurs de courant	29
III.2.2. Principe de super condensateurs.....	29
III.2.2.1. Principe de la charge	30
III.2.2.2. Principe de la décharge.....	31
III.3.Modélisation des super condensateurs	31
III.3.1. Modèle classique RC.....	32
III.3.2. Modèle à deux branches	34
III.3.3. Paramètres du modèle à deux branches.....	35
III.4. Hacheur Buck-Boost	36
III.4.1. Fonctionnement d'un Hacheur Buck-Boost.....	36
III.4.2. Modélisation d'un Hacheur Buck-Boost.....	37
III.4.3. Calcul des grandeurs du Buck-Boost	38
III.9. Conclusion.....	41
Chapitre IV	42
Gestion d'un Système PV / Super capacité	42
IV.1. Introduction	43
IV.2. Convertisseurs CC / CA	43
IV.2.1. Les onduleurs photovoltaïques.....	44
IV.3. Modélisation de onduleur à trois niveaux de type NPC	44
IV.3.1. Structure	44
IV.3.2.Principe de fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux.....	44
IV.4. Stratégie de commande du convertisseur NPC à trois niveaux.....	46
IV.4.1. Contrôle de la tension du bus continu	46
IV.4.2. La dimension de régulateur PI	47
IV.4.3. Contrôle de tension	47
IV.5. Système de gestion d'énergie.....	48
IV.5.1. Stratégies de gestion d'un système PV	48

Sommaire

IV.5.2. Gestion du stockage	49
IV.6. Algorithme de gestion	49
IV.7. Bloc de réglage de V_{dc} et gestion sous Matlab/Simulink	51
IV.8. Présentation de système globale.....	52
IV.9. Résultats de simulation	52
IV.10. Conclusion	58
Conclusion Générale	59
Annexes.....	61
Références bibliographiques	62
Résumé.....	66

Liste des figures

Chapitre I

Figure. I. 1. Capacité totale de production d'énergie solaire dans le monde (en MW) [11]. 6
 Figure. I. 2. Energie produite nette annuelle [13]. 7
 Figure. I. 3. Exemple de la structure d'un système PV autonome. 8
 Figure. I. 4. Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau 9

Chapitre II

Figure. II. 1. Schéma d'une cellule photovoltaïque..... 15
 Figure. II. 2. Caractéristique courant-tension d'un générateur photovoltaïque..... 17
 Figure. II. 3. Caractéristique (I-V) d'un panneau à divers ensoleillements à ($T = 25^{\circ}C$)..... 18
 Figure. II. 4. Caractéristique (P-V) d'un panneau à divers ensoleillements à ($T = 25^{\circ}C$)..... 18
 Figure. II. 5. Courbes (I-V) d'un générateur PV pour différentes températures à $\psi = 1000 W/m^2$ 19
 Figure. II. 6. Courbes (P-V) d'un générateur PV pour différentes températures à $\psi = 1000 W/m^2$ 19
 Figure. II. 7. Courbe de Courant (IPV). 20
 Figure. II. 8. Courbe de Tension VPV 20
 Figure. II. 9. Courbe de Puissance PPV 20
 Figure. II. 10. Schéma électrique d'un hacheur boost..... 21
 Figure. II. 11. Schéma électrique d'un hacheur boost fermé 21
 Figure. II. 12. Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert..... 22
 Figure. II. 13. Hacheur survolteur avec l'algorithme de PPM pour le GPV. 23
 Figure. II. 14. Organigramme d'algorithme PPM-P&O..... 24
 Figure. II. 15. Tension $VGPV$ 24
 Figure. II. 16. Courant ($IGPV$). 25
 Figure. II. 17. Puissance $PGPV$ 25

Chapitre III

Figure. III. 1. Condensateur électrolytique, (a) et super capacité (b). 29
 Figure. III. 2. Principe de développement des super capacités..... 30
 Figure. III. 3. Vue schématique d'un super condensateur..... 31
 Figure. III. 4. Circuit équivalent de la charge d'un super condensateur..... 33
 Figure. III. 5. Circuit équivalent de la décharge d'un super condensateur [35]. 34
 Figure. III. 6. Modèle de super condensateur à deux branches. 35
 Figure. III. 7. Convertisseur BUCK-BOOST 36
 Figure. III. 8. Courbe de Tension de sortie à la hacheur 37
 Figure. III. 9. Courbe de Tension Vsp 39
 Figure. III. 10. L'état de décharge..... 40
 Figure. III. 11. Courbe de Courant (Isp)..... 40
 Figure. III. 12. Courbe de Puissance Psp 41

Chapitre IV

Figure. IV. 1. Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé 43
 Figure. IV.2. Structure d'un onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC..... 44
Figure. IV.3. Réglage de Vdc 46
 Figure. IV. 4. Structure générale du contrôle du convertisseur [44]. 48
 Figure. IV. 5. L'organigramme de gestion d'énergie..... 51
 Figure. IV. 6. Simulation de réglage de Vdc et de gestion 51

Figure. IV. 7. Schéma de simulation de la chaine complète.	52
Figure. IV. 8. Courbe de Puissance	53
Figure. IV. 9. L'état de charge et décharge la super capacité	53
Figure. IV.10. Courant de charge	54
Figure. IV.11. Courbe d'un système PV	54
Figure. IV.12. Courbe de Tension	54
Figure. IV.13. Le courant RMS de charge et PV	55
Figure. IV.14. THD de courant IPV	55
Figure. IV.15. Tension Vdc de Bus Continu.	56
Figure. IV. 16. Courbe de Puissance	56
Figure. IV. 17. Courbe de Courant de charge.....	56
Figure. IV. 18. L'état de charge la super capacité	57
Figure. IV. 19. Courbe de Puissance	57
Figure. IV. 20. Courant de charge	58
Figure. IV. 21. L'état de décharge la super capacité.....	58

Liste des tableaux

Tableau. IV.1. l'état de commutation de l'onduleur à trois niveaux N.P.C.....	46
---	----

Liste des symboles

I_{pv} : Courant photovoltaïque (A).

I_S : Courant de super capacité (A).

N_s : Nombre de modules dans le panneau en série.

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle

P_{pv} : Puissance photovoltaïque.

P_{mpp} : Puissance au point de puissance maximale (W)

α : Rapport cyclique

Liste des abréviations

CA : courant alternatif

CC : courant continu

MPPT : poursuite du point de puissance maximale

PPM : point de puissance maximale

PV : photovoltaïque

P&O : perturbe and observe

SOC : l'état de charge et décharge (state-of-charge en anglais)

SER : Sources d'énergies Renouvelables

SHER : Système Hybride à Énergies Renouvelables

Introduction Générale

Introduction générale

Les sources d'énergies renouvelables ont fait l'objet, au cours des dernières années, d'une attention accrue en tant que solution pour affronter les problèmes causés par l'épuisement des énergies fossiles, pour atténuer les effets des changements climatiques et pour répondre à la croissance globale des besoins énergétiques [1].

L'utilisation des Sources Energies Renouvelables (SER) telles que l'énergie éolienne et l'énergie solaire a été largement étudiée par la communauté scientifique et demeure un secteur permanent d'investissement et de développement pour le milieu industriel [1].

Ces sources nécessitent des approches de gestion et des systèmes de stockage conçus sur mesure pour s'adapter à leurs spécificités géographiques et surtout, pour gérer leur opération de nature intermittente [1].

Une des applications intéressantes de l'énergie renouvelable est l'électrification des régions éloignées, Dans les system autonomes, le moyen de stockage d'énergie présente un point très important et primordial [2].

L'utilisation de SER induit le concept de stockage d'électricité en raison de la disponibilité intermittente de telles ressources. Les sites géographiquement isolés et non raccordés au réseau sont donc alimentés par un système de SER et un système de stockage pour assurer la continuité de la production lorsque l'énergie renouvelable récupérée ne sut pas [2].

Généralement, le système de stockage de type batterie au plomb est connecté avec une SER en raison de son faible coût. Pourtant, un des points le plus critique est la dégradation des batteries ou leur vieillissement prématuré. La durée de vie de la batterie dépend du nombre de son cycle charge/décharge. De plus, une recharge excessive ou une décharge profonde peuvent endommager fortement la batterie. Donc une stratégie d'utilisation adéquate du système des batteries de stockage est indispensable pour le fonctionnement d'un site isolé [2].

Le développement technologique et la maîtrise de fabrication de nouveaux matériaux ont permis la réalisation des systèmes modernes de stockage d'énergie électrique comme les super condensateurs. Grâce à leurs caractéristiques électriques intéressantes et leur nombre de cycles de charge/décharge élevé par rapport aux batteries, ils ont connu une grande évolution au cours de ces dernières années [3].

De part, leur capacité de plusieurs milliers de Farads et leur faible résistance série, ces nouveaux composants sont adaptés pour le stockage d'énergie à forte puissance. Ils peuvent être utilisés de façon complémentaire aux batteries ou aux piles à combustible. Cette injection de

puissance aux systèmes d'énergie électrique continue améliore les sources d'alimentation dans les applications, comme par exemple les applications terrestres et maritimes [3].

Le but de ce mémoire est d'étudier une gestion énergétique d'un système isolé PV / super capacité intégré dans un réseau isolé.

Pour atteindre cet objectif, quatre chapitres sont proposés :

Le premier chapitre présente une description générale de la production et la croissance mondiale et locale (Algérie) de l'énergie renouvelable, Puis une généralité sur la croissance des différentes installations des centrales photovoltaïques raccordées aux réseaux et sur sites isolés. Enfin, nous présentons les différents types des systèmes de stockages d'électricité et le système de contrôle et de surveillance.

Le second chapitre est consacré à une étude descriptive de l'ensemble des composants de Générateur Photovoltaïque(GPV). Après nous avons présenté un type d'algorithme de MPPT pour extraire le maximum d'énergie PV.

Le troisième chapitre présente brièvement la constitution, les caractéristiques et la modélisation d'un système de stockage de type super condensateur. Ainsi on présentera la modélisation et le principe de fonctionnement d'un hacheur de type Buck-Boost qui sera utilisé pour charger et décharger le super condensateur connecté avec une SER de type PV.

Le quatrième chapitre est consacré à l'intégration d'un système PV/super capacité au réseau isolé à travers un onduleur à trois niveaux de type NPC. Puis, nous présentons un algorithme de la gestion énergétique de système étudié pour les différents scénarios possibles. Ensuite, nous présentons les résultats de simulation de système étudié.

Finalement, nous terminerons ce mémoire par une conclusion générale et quelques perspectives de recherche envisagées.

Chapitre I

*Généralité sur le Système
Photovoltaïque*

1.1. Introduction

Les énergies renouvelables désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou reconstituées le plus rapidement qu'elles ne sont consommées, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimitées à l'échelle humaine [4].

L'énergie solaire a joué un rôle important dans le monde et dans les pays en développement en termes d'exploitation, d'utilisation et de diffusion, en particulier dans les zones reculées, en raison de la disponibilité de l'espace et de toutes les ressources, y compris l'Algérie, afin d'assurer la suffisance nationale et la distribution internationale [5].

Nous trouvons différentes installations pour les centrales photovoltaïques et éoliennes connectées aux réseaux et sur des sites isolés.

L'idée est donc de stocker l'énergie pour garantir la satisfaction de la demande à chaque instant mais aussi pour éviter d'éventuelles surtensions en cas de surproduction d'énergie. Aujourd'hui, un large éventail de technologies de stockage d'énergie est utilisé.

Le dimensionnement du stockage de l'énergie pour les systèmes isolés est encore du domaine de la recherche étant donnée sa complexité en termes de modélisation et d'optimisation. Le stockage d'énergie devient actuellement intéressant dans une problématique connectée ou faiblement connectée réseau pour résoudre le problème d'intermittence des énergies renouvelables [6]. et aussi la gestion de l'énergie et la surveillance du système est essentielle pour un système complet et rentable.

Ce chapitre commence par présenter brièvement la production et la croissance mondiale de l'énergie électrique et localement (algérien), ainsi que la croissance des différentes installations des centrales photovoltaïques raccordées aux réseaux et sur sites isolés. Nous avons étudié aussi les différents systèmes de stockage d'électricité et le contrôle et de surveillance système photovoltaïques.

1.2. Energie photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est basée sur l'effet photoélectrique. Celui-ci permet de créer un courant électrique continu à partir d'un rayonnement électromagnétique. Le soleil émettant ce type de rayonnement, cette ressource a donc l'avantage d'être inépuisable et utilisable en tout point d'un territoire.

C'est également une énergie propre puisque que la production énergétique à partir des modules PV n'engendre pas de GES (Gaz à Effet de Serre).

La production est invariablement liée aux conditions climatiques et une surface considérable est nécessaire pour produire de grande quantité d'énergie puisque le rendement des panneaux PV est relativement faible (typiquement entre 10 et 18 %) [7].

1.2.1. Historique de l'énergie photovoltaïque

Quelques dates importantes dans l'énergie photovoltaïque [8] :

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

1954 : Trois chercheurs américains Chapin, Pearson et Prince fabriquent une cellule Photovoltaïque.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % ; les premiers satellites alimentés par de cellules Solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie [8].

1.3. Energie photovoltaïque dans le monde

Les énergies renouvelables, et l'énergie solaire en particulier, constituent un des piliers de la transition énergétique et de la lutte contre le réchauffement climatique

Les énergies renouvelables représentent 25 % de la consommation mondiale d'électricité. Parmi eux on trouve que l'énergie photovoltaïque représente un quart de l'énergie produite.

En 2018, quatre pays possédaient plus des deux tiers du total de la puissance photovoltaïque mondiale installée. La Chine à elle seule concentre 35 % de cette puissance. Viennent ensuite les États-Unis (12 %), le Japon (11 %) et l'Allemagne (9 %) [9].

Le secteur de l'énergie solaire devrait encore croître fortement au cours des années à venir. Afin de couvrir l'ensemble des besoins mondiaux en électricité, il faudrait recouvrir une surface de 100 000 km² de panneaux photovoltaïques, ce qui correspond à l'équivalent de la surface de l'Islande [10].

La figure (I.1) présente la capacité totale de production d'énergie solaire dans le monde. La pollution naturelle a amené le monde à penser la production d'énergie de manière alternative et propre (énergies renouvelables) et à la diffuser dans tous les pays du monde.

Nous constatons ces augmentations de la production photovoltaïques surtout au fil du temps, ce qui stimule leur croissance et double la productivité.

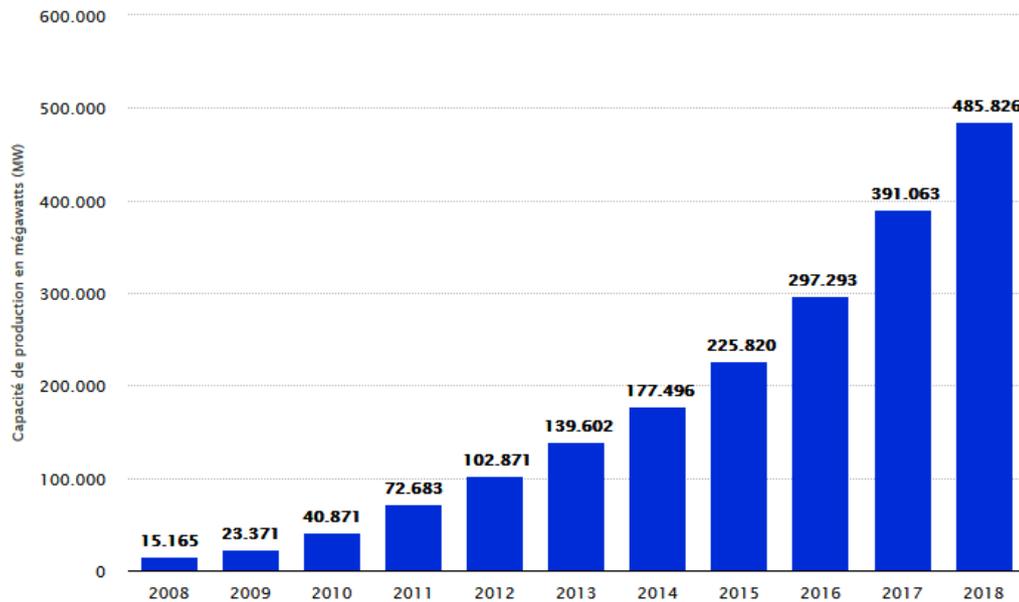


Figure. I. 1. Capacité totale de production d'énergie solaire dans le monde (en MW) [11].

I.4. Production d'énergie en Algérie

Au vu d'un gisement solaire exceptionnel qui enferme l'Algérie. Le développement des énergies renouvelables fait partie des principaux objectifs de la recherche scientifique et du développement technologique en Algérie.

L'Algérie vise à installer une capacité de 22000 MW en énergie renouvelable, en majorité solaire et éolien, à l'horizon 2030, ce qui couvriraient le tiers de la consommation en énergie électrique domestique [12].

Depuis l'adoption du programme national de développement des énergies renouvelables en 2011, il a été recensé la mise en service en 2014 d'une centrale Photovoltaïque (PV) multi technologique pilote de 1,1 MW à Ghardaïa et d'une centrale éolienne de 10 MW à Adrar, qui viennent s'ajouter à la centrale hybride solaire-gaz de 150 MW dont 25 MW en technologie solaire CSP (Concentrateurs solaires de puissance) avec miroirs cylindro-paraboliques à Hassi-R'mel [12].

La figure (I.2) présente la production énergétique annuelle issue des centrales PV supposées être installées dans différentes régions d'Algérie. Les sites concernés sont : Alger, Djelfa et

Adrar.

On remarque que la région la plus adaptée à la production photovoltaïque en termes de quantité d'énergie annuelle produite (ANPE) est la région du Sahara (Adrar) et la technologie la plus productible est la technologie des couches minces CdTe (Cadmium telluride) et ce pour tous les sites [13].

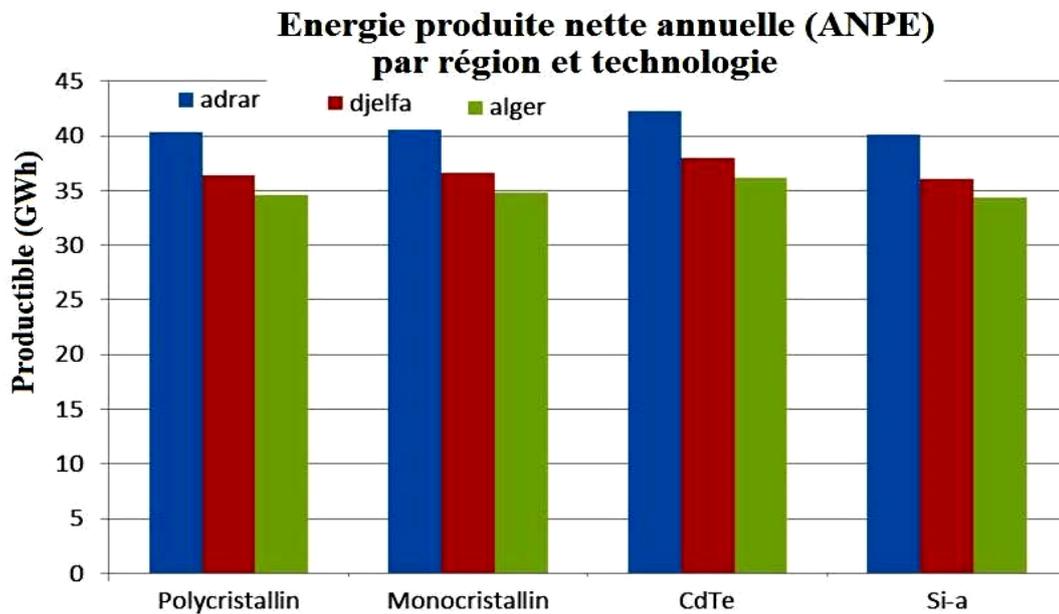


Figure. I. 2. Energie produite nette annuelle [13].

1.5. Les différents types de système photovoltaïques

Les systèmes PV sont classés en deux grandes catégories selon la manière dont l'énergie utilisée [14] :

- Systèmes isolés et autonomes.
- Systèmes raccordés au réseau.

1.5.1. Systèmes isolés et autonomes

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique.

La Figure I.3 qui représente l'exemple d'un système PV autonome. Un système de stockage est associé aux générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de la production.

Ce système de stockage représente une part très importante du coût de l'installation, et ces conditions de fonctionnement sont très contraignantes.

Par conséquent, des systèmes de gestion de l'énergie ont été développés afin d'optimiser la durée de vie du système de stockage et de réduire les coûts de fonctionnement.

La gestion de l'énergie dans les systèmes PV autonomes est encore un thème de recherche très présent dans le domaine du photovoltaïque [15].

En général ces installations comprennent quatre éléments :

- Les panneaux photovoltaïques.
- Système de stockage.
- Convertisseurs statiques.
- Système de contrôle et de surveillance.

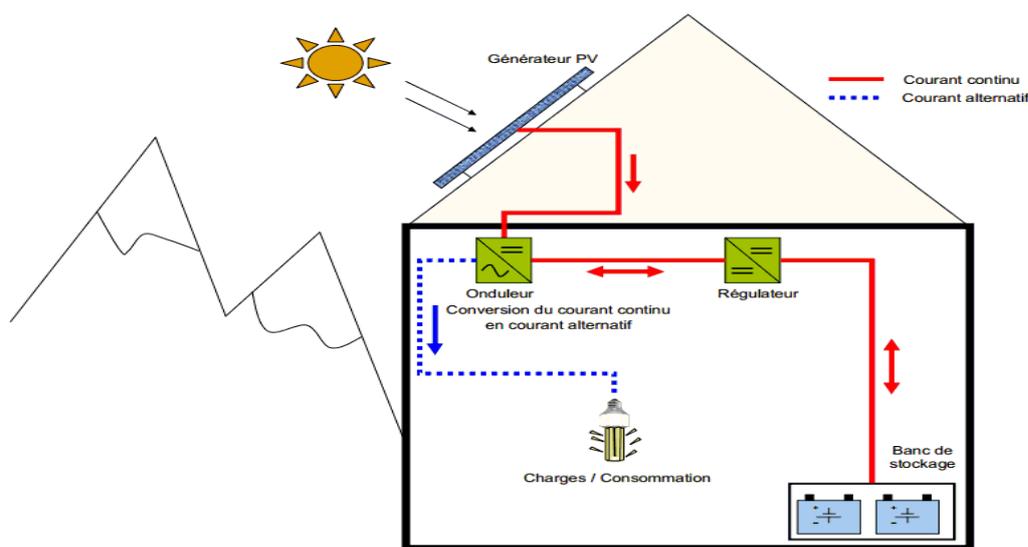


Figure. I. 3. Exemple de la structure d'un système PV autonome.

1.5.2. Le connecté au réseau

La Figure (I.4) représente un système PV connecté au réseau électrique, dont le rôle principal est de contribuer à la production d'électricité d'origine renouvelable sur le réseau.

D'un point de vue de la physique, l'énergie produite par les modules est directement consommée par les charges locales de l'habitat. L'éventuel surplus de production par rapport à la consommation instantanée est injecté sur le réseau, Le réseau est utilisé en appoint à la production PV [14].

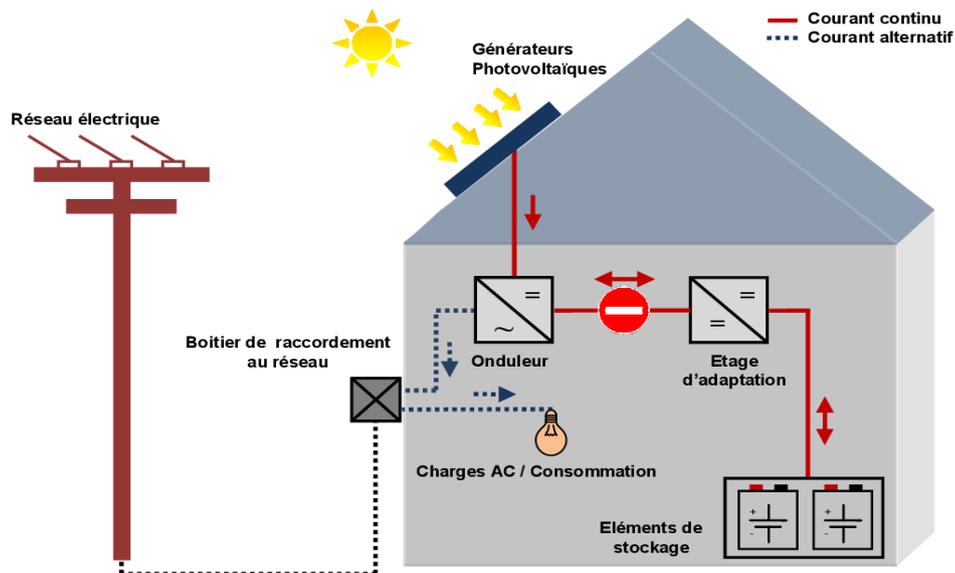


Figure. I. 4. Exemple de la structure d'un système PV connecté au réseau

1.6. Avantage et inconvénients de l'énergie photovoltaïques

L'énergie photovoltaïque a plusieurs avantages, néanmoins elle présente aussi quelques inconvénients, ils seront présentés ci-dessous [16] :

1.6.1. Avantage de l'énergie photovoltaïque

- L'énergie du soleil est la source la plus renouvelable parmi toutes les autres.
- Sur les sites isolés, l'énergie photovoltaïque offre une solution pratique pour obtenir de l'électricité à moindre coût.
- La revente du surplus de production permet d'amortir les investissements voir de générer des revenus.
- L'énergie photovoltaïque est totalement modulable et peut donc répondre à un large éventail de besoins. La taille des installations peut aussi être augmentée par la suite poursuivre les besoins de la charge.
- L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.

1.6.2. Inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- Le coût d'investissement des panneaux photovoltaïques qui reviennent cher.
- La fabrication des panneaux photovoltaïques relève de la haute technologie, demandant énormément de recherche, de développement et donc des investissements coûteux. Ce qui se traduit par un prix d'installation qui, aujourd'hui reste assez cher.

- Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles.
- Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.
- Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps.

1.7. Système de stockage d'électricité

Le stockage de l'électricité peut être réalisé efficacement. Initialement, il doit être transformé en une autre forme d'énergie stockable et être reconverti en cas de besoin.

Il existe de nombreuses techniques possibles de stocker de l'énergie, que l'on retrouve dans pratiquement toutes les formes d'énergie : mécanique, chimique et thermique.

Les technologies de stockage répondant à des critères techniques et économiques spécifiques, qui varient considérablement en fonction des applications et des besoins, seront évidemment de types différents [17].

Il existe différentes technologies de stockage d'énergie électrique, chacune adaptée à leur domaine d'application.

En général, plusieurs critères sont analysés lors de la considération et du choix des technologies du système de stockage pour une application spécifique. Ces critères incluent [17]:

- Durée de vie ;
- Cycle de vie ;
- Puissance et l'énergie ;
- Taux d'autodécharge ;
- Impact sur l'environnement ;
- Efficacité du cycle ;
- Coût en capital ;
- Durée de stockage ;
- Maturité technique.

1.7.1. Stockage direct

Ce sont des techniques qui permettent de stocker directement l'énergie sous forme électrique. Il s'agit des : condensateurs, super condensateurs et inductances supraconductrices.

Ces techniques de stockage sont considérées comme des sources de puissance à cause de leur grande puissance spécifique et de leur faible densité. Il s'agit de [18] :

- Les condensateurs
- Super condensateur
- Inductances supraconductrices

1.7.2. Stockage indirect

Pour stocker l'énergie de façon significative et l'utiliser sur de longues périodes, il est nécessaire de la transformer d'abord en une autre forme d'énergie intermédiaire et stockable (potentielle, cinétique, chimique ou thermique). Il s'agit de [18]:

- A. Accumulateurs électrochimiques
 - Accumulateurs au lithium-ion (Li-ion)
 - Accumulateurs au plomb-acide (Pb-ac)
 - Accumulateurs au nickel cadmium (Ni-Cd)
- B. Stockage sous forme d'hydrogène
- C. Stockage hydraulique
- D. Stockage à air comprimé (CAES)
- E. Volant d'inertie
- F. Stockage sous forme thermique

1.8. Système de contrôle et de surveillance

Un système photovoltaïque comme tout processus industriel, peut être soumis au cours de son fonctionnement à différents défauts et anomalies, conduisant à une baisse de performance du système.

Pour faire de la maintenance préventive et entretenir les installations photovoltaïques à temps, il faut avoir un système qui permet de mesurer, enregistrer et transférer les données, et être capable de traiter les données mesurées et détecter une panne sur une installation photovoltaïque quelconque, c'est ce qu'on appelle un système de surveillance (monitoring) [19].

La gestion de l'énergie consiste les caractéristiques des sous-ensembles suivants : le panneau solaire approprié, le super condensateur approprié, les systèmes d'adaptation de l'énergie à placer entre les étages de production, de stockage et de consommation ainsi que trouver le système permettant l'équilibre entre la puissance fournie et la puissance consommée aussi de réguler le processus de charge/décharge du stockage d'autre part par des algorithmes [20].

I.9. Conclusion

Nous avons vu dans ce chapitre que l'ampleur de l'importance de l'énergie photovoltaïque pour le monde et les pays en développement en termes de réduction de la pollution et du réchauffement climatique et nous trouvons dans cette énergie beaucoup d'équipement, y compris le stockage et son rôle majeur en l'absence de soleil et cela fait partie des choses nécessaires dans les zones isolées.

La gestion de l'énergie joue un rôle important dans ce système en termes de rentabilité, d'efficacité de production et de bon fonctionnement du système.

Dans le chapitre suivant on va étudier la modélisation et simulation d'un système photovoltaïque.

Chapitre II

Modélisation et Simulation
d'un Système PV

II.1. Introduction

L'énergie Photovoltaïque (PV) provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. La tension générée peut varier en fonction des données météorologiques (température, éclairement) [21].

Certains algorithmes recherchent le point optimal de fonctionnement nommé PPM (Point de Puissance Maximale) correspondant à une tension et un courant de panneau PV optimaux (nommés respectivement V_{OPT} et I_{OPT} (tension correspondant au point de puissance maximale)) pour lesquels la puissance maximale dépend d'un certain nombre de paramètres météorologiques, tel que le niveau d'irradiation solaire et la température. Un hacheur élévateur de tension (DC/DC) est contrôlé par l'algorithme de PPM afin d'extraire une puissance maximale du panneau photovoltaïque [21].

Ce chapitre commence par présenter brièvement l'effet photovoltaïque et modélisation de cellule photovoltaïque ainsi que les hacheurs, Surtout la modélisation de l'hacheur élévateur de tension (Boost). Ensuite, nous avons étudié l'algorithme de PPM utilisé dans notre étude de projet de fine étude. Enfin, nous présentons les résultats de simulation d'un générateur PV associé à un hacheur élévateur de tension qui sera contrôlé par un algorithme de PPM.

II.2. Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés p (positif) et n (négatif), dénommé comme jonction p-n (ou n-p) est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire [22].

II.3. Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est assimilable à une diode photosensible, elle est basée sur le phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière.

La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que la température et du vieillissement de la cellule [23].

Une cellule photovoltaïque est constituée de [23] :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation

extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.

- D'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

II.4. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Un schéma équivalent plus complet d'une cellule solaire photovoltaïque (modèle à une diode) est illustré dans la figure (II.1). Il complète le schéma précédent en introduisant deux résistances R_{SH} et R_S qui modélisent les défauts de la cellule [20].

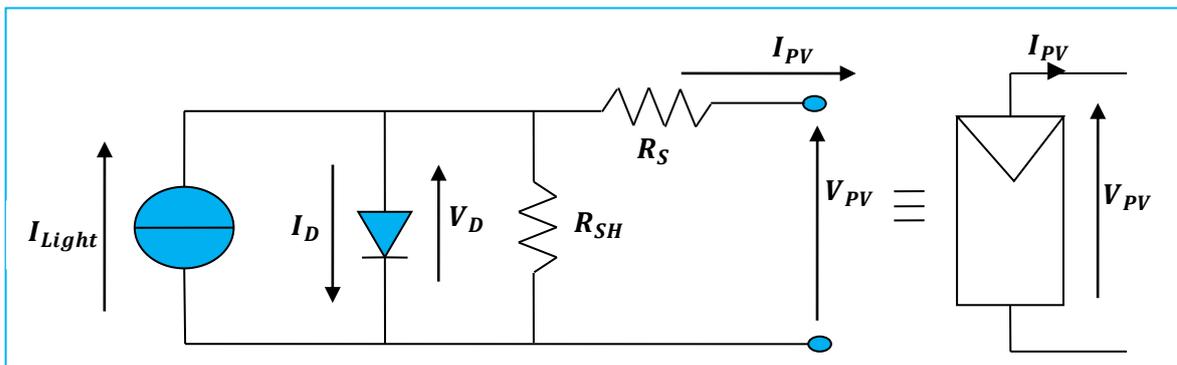


Figure. II. 1. Schéma d'une cellule photovoltaïque.

En notant :

I_D : Courant inverse de diode.

I_0 : Courant de saturation de diode, dépendant de la température.

I_{Light} : Photo courant, dépendant de l'intensité de l'irradiation.

R_{SH} : Résistance en parallèle, représentant l'admittance parallèle du générateur de courant.

R_S : Résistance en série, modélisant les pertes ohmiques du matériau et des contacts.

V_{PV} : Tension aux bornes de la cellule.

I_{PV} : Courant fourni par la cellule.

Le fonctionnement du circuit en générateur peut ainsi être formalisé par un système d'équations résultant des lois de Kirchhoff :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (II. 1)$$

$$I_{PV} = I_{Light} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{PV} + (I_{PV} \cdot R_S)}{V_r} \right) - 1 \right] - \frac{V_{PV} + (I_{PV} \cdot R_S)}{R_{SH}} \quad (\text{II. 2})$$

Avec :

$$V_r = \frac{m \cdot k \cdot T}{q} \quad (\text{II. 3})$$

Où :

m : Indice du matériau (compris entre 1 et 2 selon de la technologie).

k : Constante de Boltzmann.

T : Température en Kelvin.

q : Charge de l'électron.

Une cellule photovoltaïque (PV) va ainsi produire de l'énergie de manière proportionnelle à l'intensité lumineuse qu'elle reçoit. La température est également un facteur influant sur les caractéristiques d'une cellule photovoltaïque [20].

II.5. Générateur photovoltaïque (GPV)

Un module photovoltaïque est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que : la puissance, le courant de court-circuit I_{CC} ou la tension en circuit ouvert V_{CO} .

L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un GPV. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmentera. La plupart des panneaux PV commerciaux sont constitués par des sous-réseaux de cellules connectés en série. Chacun de ces sous-réseaux est lui-même constitué d'un groupe de cellules PV connectés en série [25].

II.5.1. Caractéristique courant-tension

La caractéristique courant-tension illustrée dans la figure (II.2) décrit le comportement du GPV sous l'influence des conditions météorologiques spécifiques (niveau d'éclairement $\psi = 1000 \text{ W/m}^2$ et température ambiante $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$).

La courbe caractéristiques courant-tension (I-V) du module photovoltaïque passe par trois points importants qui sont :

- Le courant de court-circuit I_{CC} en point C.
- La tension de circuit ouvert V_{CO} en point S.

➤ La puissance maximale P_{max} en point M.

Il est difficile de donner un caractère source de courant ou de tension à un GPV sur toute l'étendue de la caractéristique courant-tension. Par conséquent, le GPV est considéré comme une source de puissance avec un point P_{max} où la puissance se trouve maximale.

Il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée. Il est important dénoter que certains régulateurs solaires réalisent une adaptation d'impédance afin qu'à chaque instant on se trouve proche de ce point P_{max} [25].

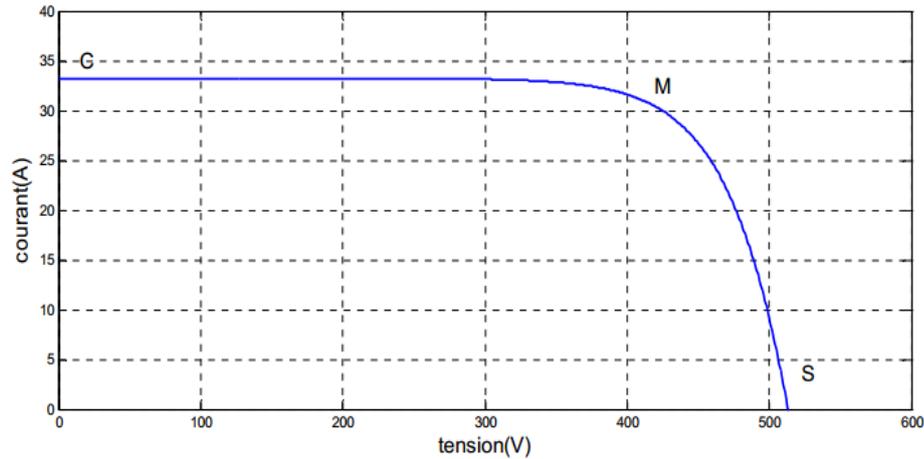


Figure. II. 2. Caractéristique courant-tension d'un générateur photovoltaïque.

II.5.2. Influence de l'ensoleillement

Une baisse de l'ensoleillement provoque une diminution de la création de paires électron-trou avec un courant changé à l'obscurité. Le courant du panneau solaire étant égal à la soustraction de la photo courant et du courant de diode à l'obscurité, il y'a une baisse du courant solaire I_{cc} proportionnelle à la variation de l'ensoleillement accompagnée d'une très légère diminution de la tension V_{co} et donc un décalage du point P_{max} du panneau solaire vers les puissances inférieures.

Les figures (II.3) et (II.4) représentent les caractéristiques (P-V) et (I-V) respectivement d'un GPV pour une température constante ($T = 25^{\circ}C$) et un ensoleillement variable [25].

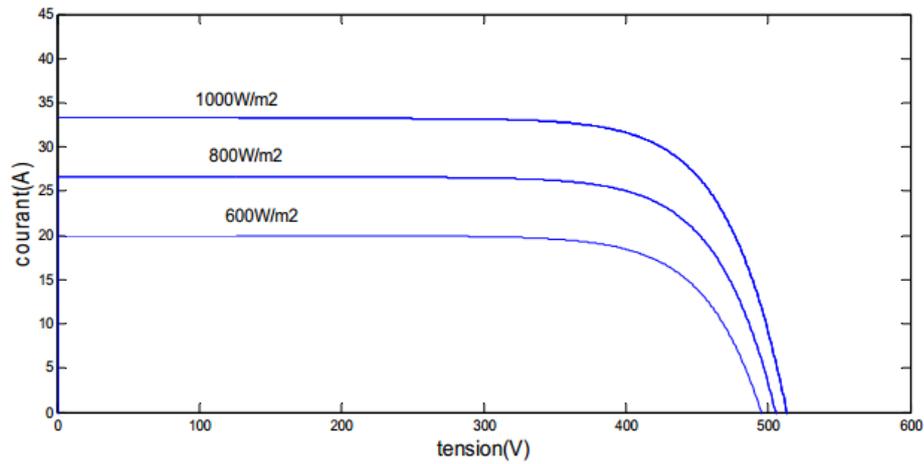


Figure. II. 3. Caractéristique (I-V) d'un panneau à divers ensoleillements à ($T = 25^{\circ}\text{C}$).

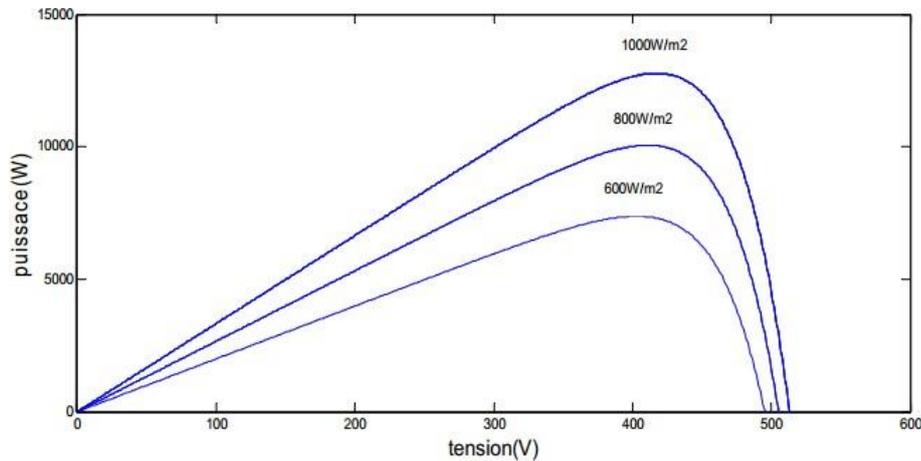


Figure. II. 4. Caractéristique (P-V) d'un panneau à divers ensoleillements à ($T = 25^{\circ}\text{C}$).

Il est clair que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste quasiment identique même à faible éclairage.

Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule (P_{max}) est pratiquement proportionnelle à l'éclairage ;
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension ;
- Influence de la température sur les courbes (I-V) et (P-V).

Les figures(II.5) et (II.6) présentent respectivement des courbes (I-V) et (P-V) pour différentes températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constante. Nous remarquons que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente. On en déduit donc que le panneau peut fournir une tension correcte, même à faible éclairage, par conséquent la puissance extractible diminue [25].

Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera

impérativement prise en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au-dessus de 25 °C. Enfin, il est important de noter que, lorsque l'éclairement est plus faible que 100 W/m^2 la tension du panneau varie à son tour. Elle baisse avec l'éclairement (variation logarithmique).

Seules les photopiles au silicium amorphe permettent un fonctionnement dans ces conditions, grâce à une tension encore assez élevée. C'est pour cette raison que le silicium amorphe peut être utilisé sous éclairage artificiel, contrairement au silicium cristallin. Ceci va beaucoup contribuer dans notre choix de cellules [25].

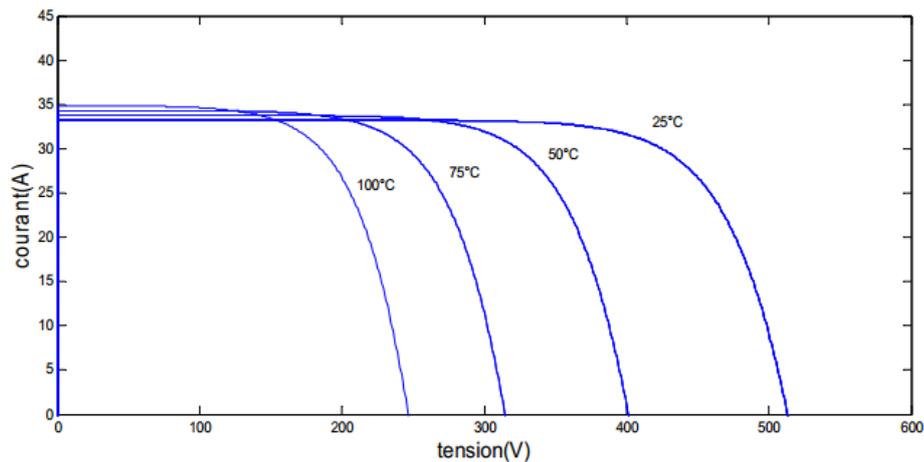


Figure. II. 5. Courbes (I-V) d'un générateur PV pour différentes températures à $\psi = 1000 \text{ W/m}^2$.

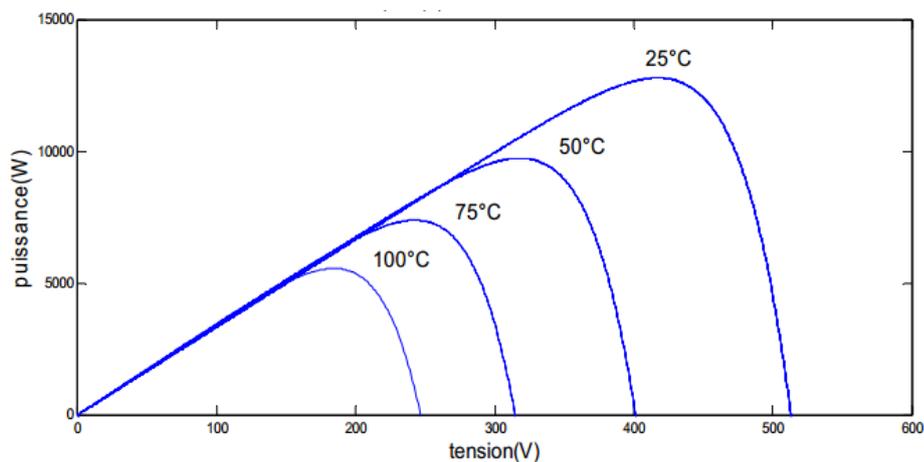


Figure. II. 6. Courbes (P-V) d'un générateur PV pour différentes températures à $\psi = 1000 \text{ W/m}^2$.

Nous présentons les résultats de simulation dans la sortie panneaux photovoltaïques avant le hacheur le courant et tension et puissance avec logiciel MATLAB / Sim Power System pour un éclairement solaire $G = 1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$ et une température $T = 293 \text{ [K]}$.

Les figures II.7, II.8 et II.9 présentent le courant, la tension et la puissance de sortie de PV. On remarque que la puissance atteint sa valeur optimale est égale le produit entre la tension et le courant générées par le PV.

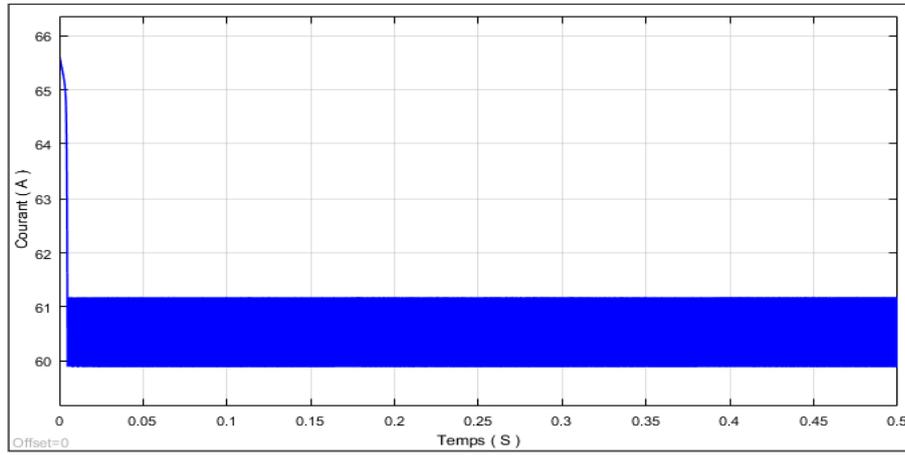


Figure. II. 7. Courbe de Courant(I_{PV}).

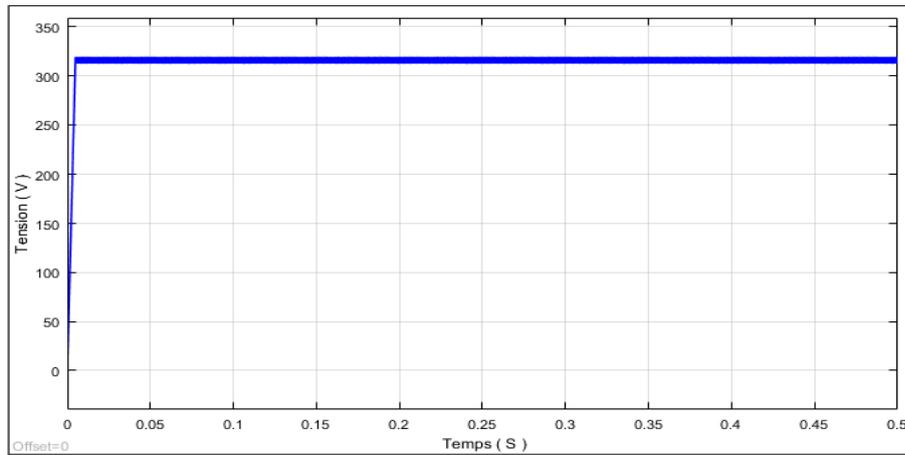


Figure. II. 8. Courbe de Tension(V_{PV}).

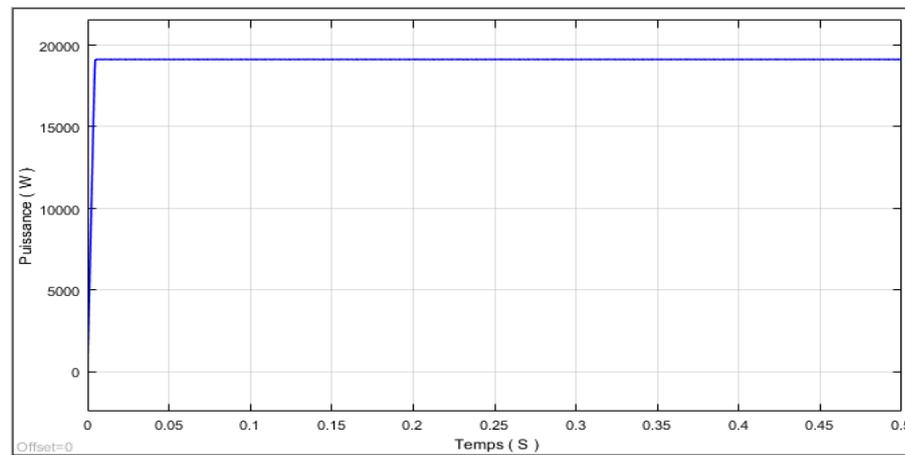


Figure. II. 9. Courbe de Puissance(P_{PV}).

II.6. Hacheur

Un hacheur de type élévateur de tension permet de régler le transfert d'énergie d'une source continue vers la charge avec une tension élevée et un rendement élevé.

La figure (II.10) présente le schéma électrique d'un hacheur élévateur de tension (Boost). Il est constitué d'une source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une

source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [26].

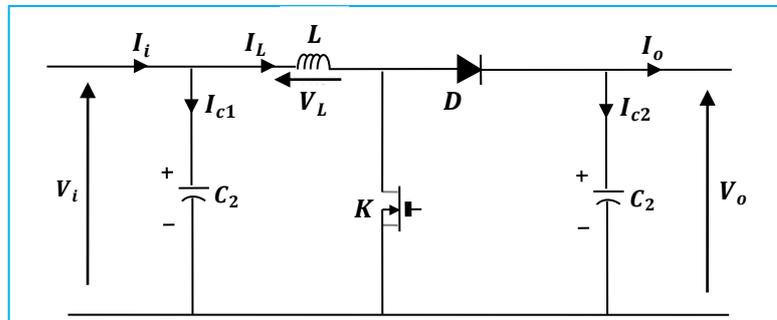


Figure. II. 10. Schéma électrique d'un hacheur boost.

II.6.1. Fonctionnement

Quand l'interrupteur K est fermé pendant la durée αT_e le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes d'interrupteur K est nulle. Pendant le temps $t \in [\alpha T_e, T_e]$, l'interrupteur s'ouvre et l'énergie emmagasinée dans l'inductance commande la circulation du courant dans la diode de roue libre D .

On a alors :

$$V_K = V_o \tag{II.4}$$

En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à [26] :

$$V_o(1 - \alpha) = V_i \tag{II.5}$$

II.6.2. Modèle mathématique équivalent

Afin de pouvoir synthétiser les fonctions du hacheur survolteur à l'état d'équilibre, il est nécessaire de présenter les schémas équivalents du circuit à chaque position de l'interrupteur K .

La figure (II.11) présente le circuit équivalent du boost, lorsque interrupteur K est fermé c.-à-d entre $[0, \alpha T_e]$ [26].

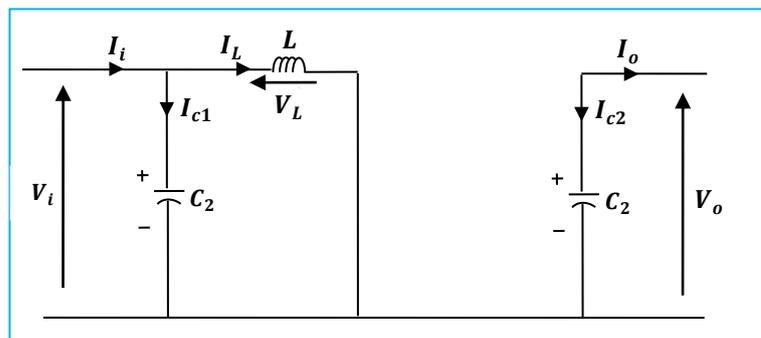


Figure. II. 11. Schéma électrique d'un hacheur boost fermé

Comme pour le circuit Buck, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (II.6)$$

$$I_{c1}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \quad (II.7)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (II.8)$$

À l'état ouvert de l'interrupteur K , le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est présenté dans la figure (II.12)

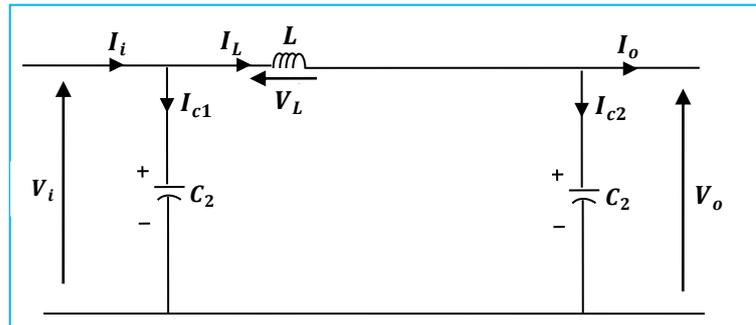


Figure. II. 12 . Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.

$$I_{c1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (II.9)$$

$$I_{c1}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_L(t) - I_o \quad (II.10)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_o(t) \quad , \quad (II.11)$$

II.7. Poursuite du point de puissance maximum

L'efficacité de conversion d'énergie du module PV (module PV : l'association des plusieurs cellule PV en série et en parallèle) est plutôt faible et varie en fonction de l'éclairement et la température.

Le contrôle du suivi du point de puissance maximale d'un module PV est un problème compliqué. Par conséquent, pour surmonter ces problèmes et obtenir une efficacité maximale, le système PV nécessite une application d'un algorithme de PPM pour le but d'extraire une puissance optimale pour différentes conditions de fonctionnement.

Pour atténuer ces problèmes, diverses stratégies de contrôle de suivi de la puissance optimale étaient déjà discutées dans la littérature pour l'obtention d'une meilleure efficacité de conversion énergétique pour toutes les données météorologiques, telles que l'algorithme Perturbe et Observe (P & O) [27], conductance incrémentale [27] sont les plus couramment utilisées dans les algorithmes du PPM.

Dans ce projet de fin d'étude, nous avons choisi l'algorithme PPM à base de l'algorithme Perturbe et Observe (P & O).

La figure (II.13) montre la configuration de circuit de base d'un hacheur survolteur de tension avec un algorithme de PPM.

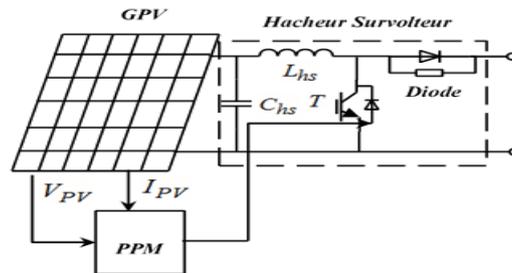


Figure. II. 13. Hacheur survolteur avec l'algorithme de PPM pour le GPV.

II.7.1. Principe de l'algorithme de PPM

L'algorithme de PPM est un organe fonctionnel du système PV et permet de chercher le point de fonctionnement optimal du générateur PV dans des conditions météorologiques et de charge stable. Que ce soit une commande analogique ou digitale, le principe de régulation est basé sur la variation automatique du rapport cyclique D à la valeur adéquate de manière à maximiser la puissance à la sortie du panneau PV [28].

II.7.2. Méthode de l'algorithme de la perturbation et l'observation (P&O)

C'est l'algorithme de poursuite du PPM le plus utilisé (figure II.14). Comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système à travers l'augmentation ou la diminution de V_{ref} ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC/DC, puis par l'observation des effets de ces perturbations sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle $P(k)$ du panneau est supérieure à la valeur précédente $P(k - 1)$ alors on garde la même direction de perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent [29].

Avec cet algorithme la tension de fonctionnement V est perturbée à chaque cycle du PPM. Dès que le PPM sera atteint, V oscillera autour de la tension idéale V_{pm} de fonctionnement. Ceci cause une perte de puissance qui dépend de la largeur du pas d'une perturbation simple.

La valeur pour la largeur idéale du pas ΔD dépend du système, elle doit être déterminée expérimentalement.

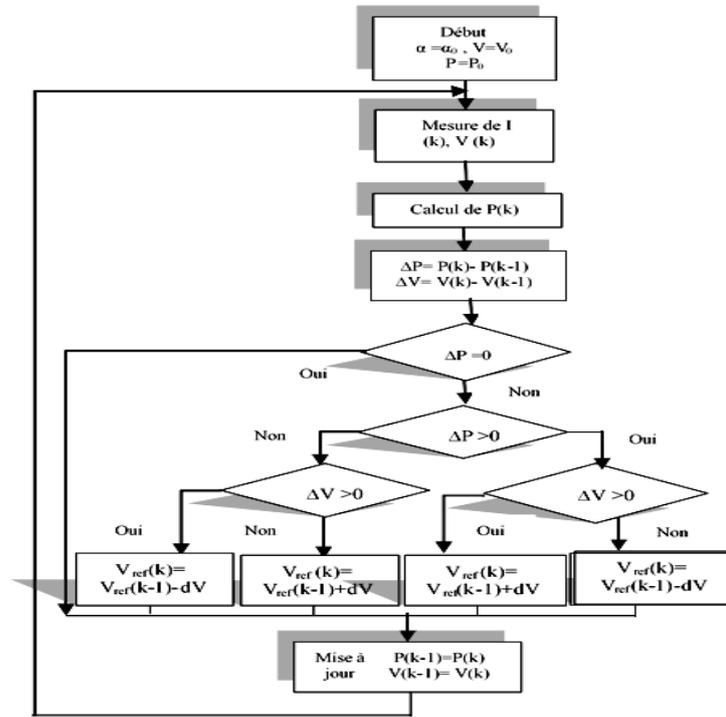


Figure. II. 14. Organigramme d’algorithme PPM-P&O.

II.8. Résultats de simulation et interprétation

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation d’un GPV connecté à une charge à travers un hacheur élévateur de tension contrôlé par l’algorithme de PPM basé sur P&O évalué à l’aide du logiciel MATLAB / SimPowerSystem pour un éclairage solaire $G = 1000 [W/m^2]$ et une température $T = 293 [K]$. Les paramètres de système proposés sont répertoriés dans l’annexe A.

La figure (II.15) montre l’allure de la tension d’entrée et de la sortie de l’hacheur élévateur de tension. On constate clairement que la tension de sortie est supérieure par rapport à la tension d’entrée qui signifié le bon fonctionnement de l’hacheur.

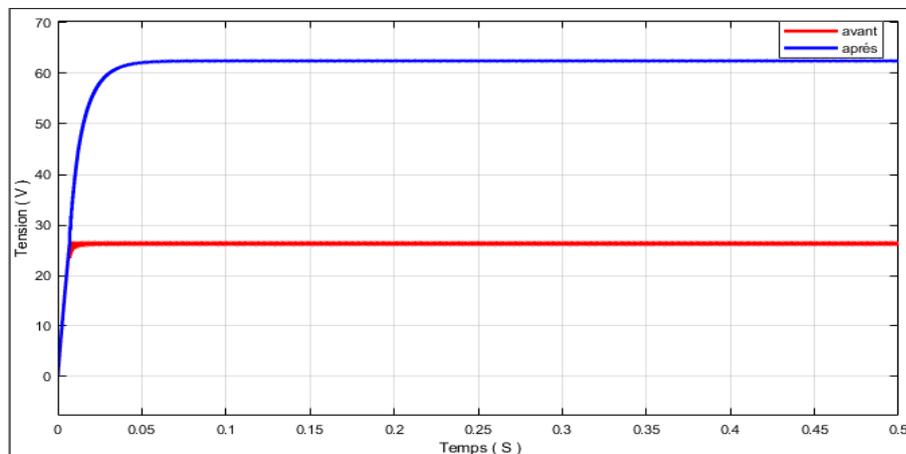


Figure. II. 15. Tension(V_{GPV}).

La figure (II.16) montre l'allure du courant en entrée et à la sortie de l'hacheur élévateur de tension. On constate clairement que le courant de sortie est inférieur par rapport au courant d'entrée qui signifie le bon fonctionnement de l'hacheur.

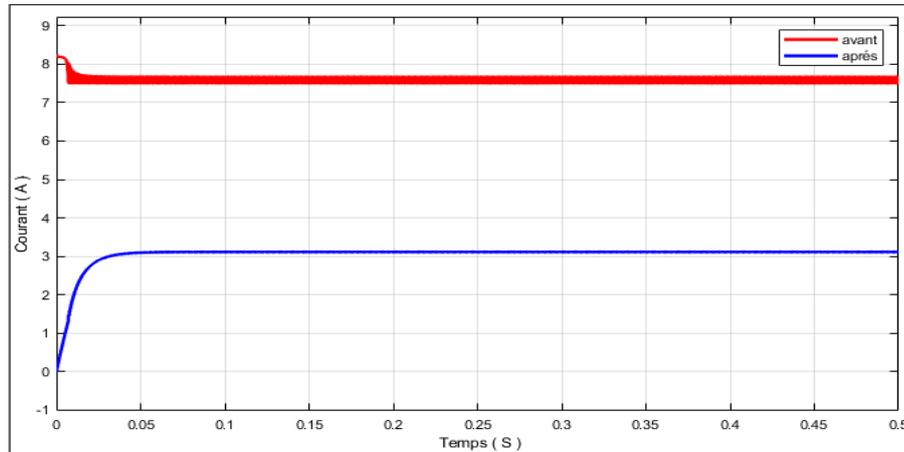


Figure. II. 16. Courant(I_{GPV}).

La figure (II.17) montre l'allure de la puissance optimale générée pour des données météorologiques nominales. On remarque que la puissance abouti sa valeur crête qui parmi de signifier le bon fonctionnement de l'algorithme de PPM basé sur P&O pour le but d'extraire le maximum d'énergie PV.

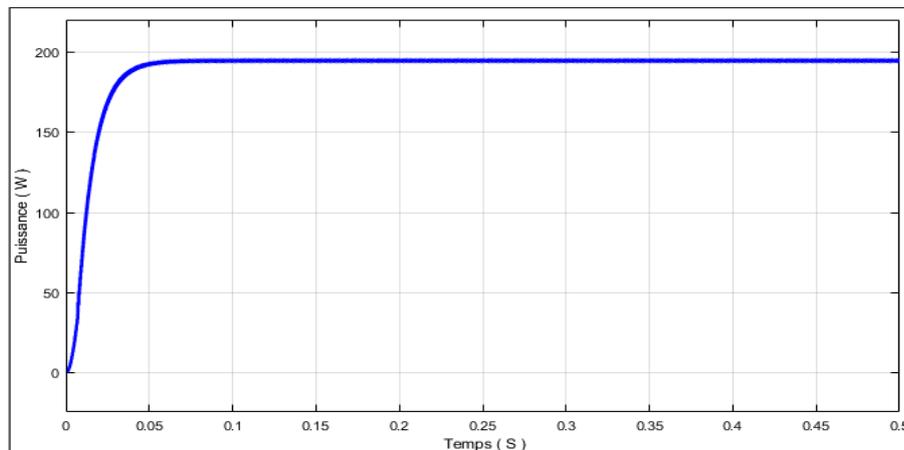


Figure. II. 17. Puissance(P_{GPV}).

II.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié un système PV constituant d'un GPV associé avec un hacheur élévateur de tension contrôlé par un algorithme de type P&O pour le but d'extraire le maximum d'énergie PV pour les différentes données météorologiques. Les résultats de simulation montrent le bon fonctionnement du système étudié.

Dans le troisième chapitre, un système de stockage d'énergie de type super condensateur sera étudié.

Chapitre III
Systeme de Stockage

III.1. Introduction

Les super condensateurs bénéficient relativement d'une grande capacité de stockage, d'une faible résistance série, d'une forte densité de puissance, d'une bonne stabilité en température et d'une forte cyclabilité [30]. Ces bonnes caractéristiques font qu'aujourd'hui ces systèmes de stockage sont utilisés dans différentes applications.

Ce chapitre permet de présenter brièvement la constitution d'un système de stockage de type de super condensateur. Puis sa caractéristique. Ensuite, la modélisation de super condensateur. Enfin, on présente la modélisation et le principe de fonctionnement d'un hacheur de type Buck-Boost qui sera utilisé pour charger et décharger le super condensateur connecté avec une source d'énergie renouvelable de type PV.

III.2. Super condensateur

Sous l'impulsion des besoins du marché des véhicules électriques, il a été développé dans les années 1990 un nouveau type de condensateur à très haute énergie volumique : les condensateurs double couche ou super condensateurs qui se caractérisent par une faible tension de service (*environ 2,5 V*) et une très forte capacité (plusieurs farads à quelques milliers de farads). Ils sont capables de fournir des courants élevés sur de petites durées (millisecondes, secondes, ou éventuellement minutes) [31].

III.2.1. Classification

La nature du matériau utilisé pour les électrodes permet de classer les super condensateurs en deux familles [31] :

- Super condensateurs électrostatiques
- Super condensateurs électrochimiques

III.2.1.a. Carbone

Le charbon actif est un composé carboné (de l'ordre de 80% de carbone) de grande surface spécifique (typiquement $2000 \text{ m}^2/\text{g}$). Le produit final se présente généralement sous forme de poudre ou de granulés. Dans le SC, on utilise le caractère polarisable de l'électrode en carbone et la surface physique du charbon. Un gramme de charbon peut conduire à des capacités de quelques dizaines de Farad et à des énergies de quelques Wh/kg . Par ailleurs la puissance varie entre quelques centaines et quelques milliers de W/kg selon leur conductivité.

Les électrodes en charbon actif sont plus utilisées dans le SC en raison de la surface spécifique importante du charbon actif et de son prix compétitif [32].

III.2.1.b. Electrolyte

Dans un super condensateur, l'électrolyte est obtenu par une combinaison d'un solvant permettant la dissolution d'un sel. Ce sel dissout fait apparaître des molécules positives (cations) et des molécules chargées négativement (anions). Ce sont ces molécules chargées électriquement qui vont permettre la formation de la double couche à l'interface électrode-électrolyte [32].

III.2.1.c. Séparateurs

Il évite le contact électrique entre les deux électrodes du super condensateur tout en permettant une bonne circulation des charges de l'électrolyte (anion-cation) [32].

III.2.1.d. Collecteurs de courant

Ils doivent être d'épaisseurs minimales afin de limiter le plus possible leur contribution à la densité d'énergie et la densité de puissance [32].

III.2.2. Principe de super condensateurs

Avec des capacités atteignant des milliers de farads, les super capacités ont révolutionné les applications. La différence fondamentale avec la technologie électrolytique des condensateurs réside dans l'absence apparente de couche diélectrique (Figure III.1) [33].

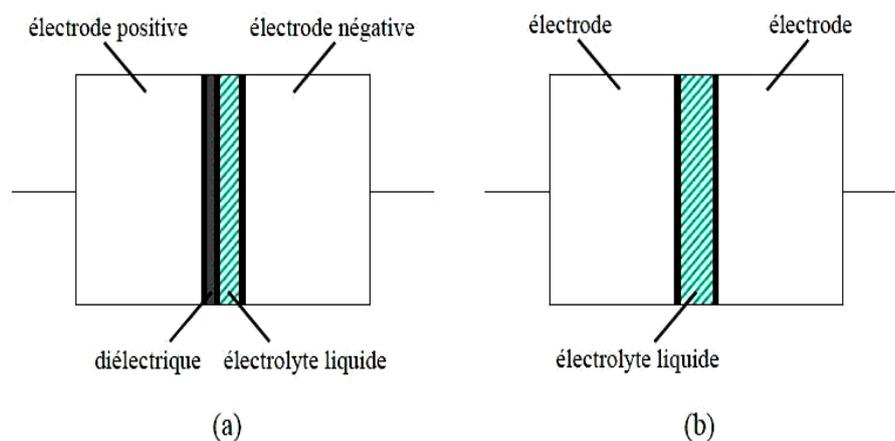


Figure. III. 1. Condensateur électrolytique, (a) et super capacité (b).

En effet, le principe de base des super capacités repose sur les propriétés capacitatives de l'interface entre conducteur électronique solide et conducteur ionique liquide [33].

Le stockage d'énergie s'effectue par distribution des ions de l'électrolyte au voisinage de la surface de chaque électrode sous l'influence de la tension électrostatique appliquée. Il se crée ainsi aux interfaces une zone de charge d'espace appelée couche double électrique, d'épaisseur limitée à quelques nanomètres. La fonction diélectrique est assurée quant à elle par les molécules du solvant de l'électrolyte [33].

Une super capacité peuvent être schématisées par deux capacités représentatives des charges stockées, connectées en séries par le biais d'une résistance associée à l'électrolyte (Figure (III.2)).

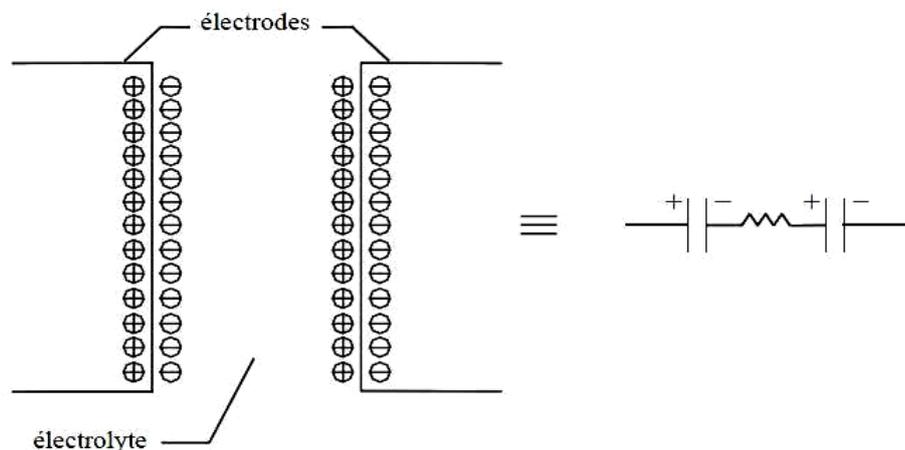


Figure. III. 2. Principe de développement des super capacités.

Les matériaux d'électrodes poreux à très grande surface spécifique comme le charbon (> 1000 m²/g) permettent d'accroître l'énergie spécifique et la capacité volumique de super capacités sans accroître le volume total.

Le principe de stockage d'énergie électrostatique par couche double électrique confère aux super capacités deux caractéristiques importantes : leur réversibilité en tension et leur faible tenue en tension (quelques volts), cette dernière caractéristique rend inévitable leur mise en série pour différentes applications [33].

III.2.2.1. Principe de la charge

Habituellement, les super condensateurs sont chargés à courant constant bien que cela ne soit en rien obligatoire. Cela fait croître la tension aux bornes de façon linéaire si la capacité C est constante [20].

$$I = C \frac{dV}{dt} \quad (\text{III. 1})$$

$$V(t) = \frac{I}{C} \cdot t + V(0) \quad (\text{III. 2})$$

Les super condensateurs sont chargés par l'Autolab, modèle PGSTAT 30, à courant constant à (300 mA). Le courant de charge est approximativement égal au courant de court-circuit du panneau solaire choisi pour alimenter la charge de (150 mW). La fin de la charge est atteinte lorsque la tension passe au-dessus de sa tension nominale (donnée par le fabricant) [20].

III.2.2.2. Principe de la décharge

Les deux super condensateurs sont déchargés à courant constant à (-55 mA). Le courant de décharge doit être plus grand que celui des accumulateurs à cause du convertisseur qui sera nécessaire en sortie du super condensateur pour maintenir la tension constante aux bornes de la charge, ce qui signifie qu'une partie de l'énergie sera dissipée par ce convertisseur.

Le test des super condensateurs aux différentes températures est plus simple que celui des accumulateurs car ils sont moins sensibles à la température que ces derniers [20].

III.3. Modélisation des super condensateurs

La modélisation des super condensateurs doit nous permettre de déterminer le nombre de super condensateurs nécessaires pour notre application. Un super condensateur se compose, Schématiquement, de deux électrodes poreuses imprégnées d'électrolyte, connectées chacune à un collecteur métallique, et séparées l'une de l'autre par une membrane isolante poreuse (pour assurer la conduction ionique) (figure III.3) [20].

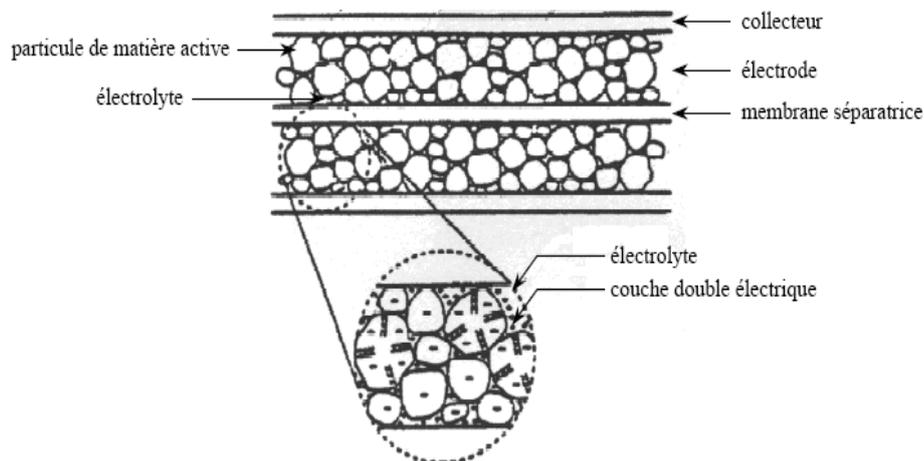


Figure. III. 3. Vue schématique d'un super condensateur.

La double couche électrique peut être modélisée, non pas par une unique capacité non linéaire éventuellement résistive, mais par un réseau complexe de capacités non-linéaires, interconnectées entre elles par des résistances d'accès aux pores [20].

III.3.1. Modèle classique RC

Le modèle le plus simple est celui proposé en général par le constructeur, il s'agit d'un circuit RC en série. R_S représente la résistance série équivalente traduisant les pertes par effet Joule dans le super condensateur et C la capacité principale du super condensateur. Dans ce modèle on ne tient compte ni de l'influence de la tension de charge sur la capacité du composant ni du phénomène de redistribution des charges internes dans le super condensateur [34].

La résistance série est déterminée à partir de la variation de la tension au début de la charge ou de décharge suite à une application d'un courant de charge/décharge constant :

$$R_S = \frac{V_R}{I} \quad (\text{III. 3})$$

Dans ce type de modèle, l'évolution de la tension de décharge de la cellule suite à un courant constant a une représentation linéaire. Ainsi, le comportement du super condensateur est assimilé à celui d'un condensateur classique (capacité constante en fonction de la tension) [34].

Le rendement principal à prendre en compte, est le rendement de cyclage d'une cellule. Nous définissons ce rendement de cyclage de la façon suivante [34] :

$$\Gamma_{cyclage} = \frac{E_S}{E_i} \quad (\text{III. 4})$$

Avec :

- E_i : énergie délivrée par la source pour charger les super capacités [J]
- E_S : énergie déstockée par les super condensateurs et utilisable par la charge [J]

Nous rappelons que l'énergie stockée dans le super condensateur est égale à :

$$E_{\text{Stoké}} = \frac{1}{2} C V_f^2 \quad (\text{III. 5})$$

Avec : V_f tension finale aux bornes du super condensateur [V]

Pour le calcul du rendement de cyclage, nous avons calculé E_i et E_S grâce à un modèle simplifié du super condensateur. Il s'agit d'un modèle équivalent de type RC classique (Figure III.4), avec une résistance R_S modélisant les pertes ohmiques des connections et R_p permettant de tenir compte des pertes dans le super condensateur [35].

Nous calculons l'énergie fournie par la source pour charger le super condensateur à courant constant à partir de la Figure (III.4)

$$E_i = \int_0^{T_c} U \cdot I dt \quad (\text{III. 6})$$

Avec :

- T_c temps final de charge [s]
- U tensions de la source [V]
- I courant constant de charge [A]

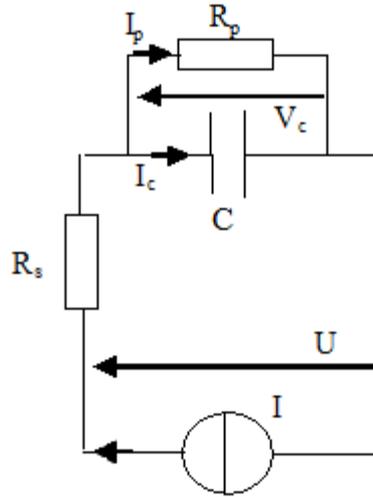


Figure. III. 4. Circuit équivalent de la charge d'un super condensateur.

$$I = I_p + I_c = \frac{V_c}{R_p} + C \frac{dV_c}{dt} \quad (\text{III. 7})$$

La résolution de l'équation (III. 7) permet de déterminer V_c [35] :

$$V_c = R_p \cdot I \cdot \left[1 - e^{-T_c/R_p \cdot C} \right] \quad (\text{III. 8})$$

$$V_c(T_c) = V_f = R_p \cdot I \left[1 - e^{-T_c/R_p \cdot C} \right] \text{ d'où } T_c = R_p \cdot C \cdot \ln \left[\frac{R_p I}{R_p I - V_f} \right] \quad (\text{III. 9})$$

Avec:

- ✓ V_f Tension finale de charge du super condensateur [V].
- ✓ T_c Temps final de charge [s].

D'où,

$$E_i = \int_0^{T_c} U \cdot I dt = \int_0^{T_c} (R_s \cdot I + V_c) I \cdot dt = \int_0^{T_c} \left(R_s \cdot I + R_p \cdot I - R_p \cdot C \frac{V_c}{dt} \right) I \cdot dt \quad (\text{III. 10})$$

$$E_i = (R_s + R_p) \cdot I^2 \cdot T_c - R_p \cdot C \cdot I (V_c(T_c) - V_c(0)) \quad (\text{III. 11})$$

$$E_i = (R_s + R_p) \cdot I^2 \cdot T_c - R_p \cdot C \cdot I V_f \quad (\text{III. 12})$$

Nous calculons maintenant l'énergie récupérée par la charge E_s à partir de la Figure (III.5) [35] :

$$E_s = \int_0^{T_d} U \cdot I dt \quad (\text{III. 13})$$

Avec :

- ✓ T_d Temps final de décharge [s].
- ✓ U Tensions de la charge [V].

✓ I Courant constant de décharge [A].

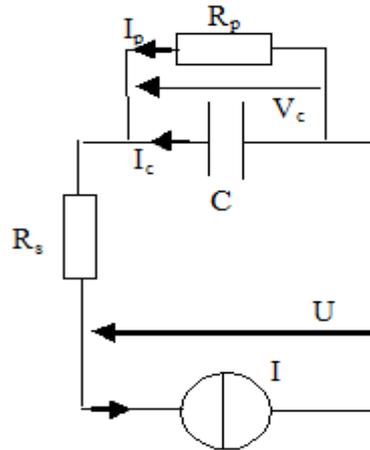


Figure. III. 5. Circuit équivalent de la décharge d'un super condensateur [35].

$$I = I_p + I_c = -\frac{V_c}{R_p} - C \frac{dV_c}{dt} \quad (\text{III. 14})$$

La résolution de l'équation (III-14) permet de déterminer V_c [35] :

$$V_c = R_p \cdot I \cdot \left[e^{(-t/R_p \cdot C)} - 1 \right] + V_f \cdot e^{(-t/R_p \cdot C)} \quad (\text{III. 15})$$

D'où :

$$V_c(T_d) = V_f = R_p \cdot I \left[e^{(-T_d/R_p \cdot C)} - 1 \right] + V_f \cdot e^{(-T_d/R_p \cdot C)} \quad \text{et} \quad T_d = R_p \cdot C \ln \left[\frac{R_p \cdot I + V_f}{R_p \cdot I} \right] \quad (\text{III. 16})$$

D'où,

$$E_s = \int_0^{T_d} U \cdot I dt = \int_0^{T_d} (-R_s \cdot I + V_c) I \cdot dt = \int_0^{T_d} \left(-R_s \cdot I - R_p \cdot I - R_p \cdot C \frac{dV_c}{dt} \right) I \cdot dt \quad (\text{III. 17})$$

$$E_s = -(R_s + R_p) \cdot I^2 \cdot T_d - R_p \cdot C \cdot I \cdot V_c(0) \quad (\text{III. 18})$$

$$E_s = -(R_s + R_p) \cdot I \cdot T_d + R_p \cdot C \cdot I \cdot V_f \quad (\text{III. 19})$$

Le rendement de cyclage vaut donc :

$$\Gamma_{\text{cyclage}} = \frac{E_s}{E_i} = \frac{-(R_s + R_p) \cdot I^2 \cdot T_d + R_p \cdot C \cdot I \cdot V_f}{(R_s + R_p) \cdot I^2 \cdot T_d - R_p \cdot C \cdot I \cdot V_f} \quad (\text{III. 20})$$

III.3.2. Modèle à deux branches

Un modèle simplifié permet de décrire d'une manière fidèle le comportement électrique d'un super condensateur. Ce modèle, établi par les Canadiens Bonert et Zubieta [Zubieta et Bonert

1998] est composé de deux branches dont la capacité est non linéaire et varie en fonction de la tension à ses bornes (Figure III.6) [31].

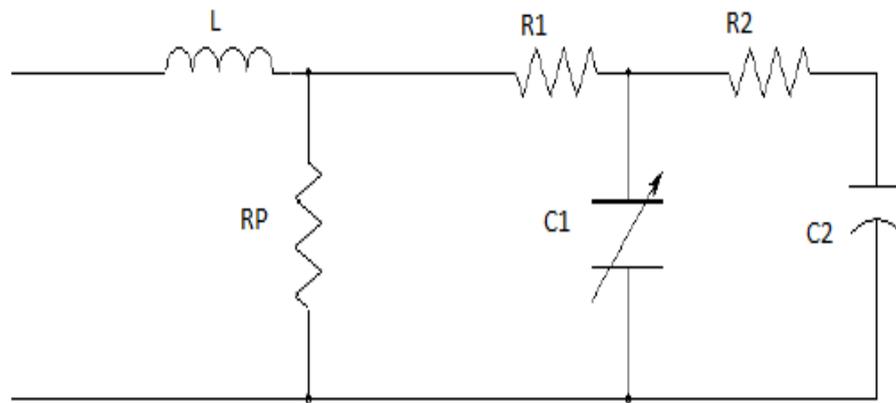


Figure. III. 6. Modèle de super condensateur à deux branches.

La branche dite rapide R_1C_1 intervient dans le régime transitoire et la branche lente R_2C_2 traduit les constantes de temps plus importantes. Dans cette étude qui s'intéresse uniquement aux phénomènes dynamiques du super condensateur, on peut négliger cette branche lente car elle représente le phénomène de redistribution des charges au sein de la cellule. R_1 est la résistance série du super condensateur, C_1 sa capacité et R_p la résistance de fuite. Pour tenir compte des phénomènes physiques à l'interface des matériaux du super condensateur, C_1 est composée d'une capacité constante C_0 et d'une capacité variable en fonction de la tension entre ses bornes [31]. Nous avons :

$$C_1 = C_0 + C_v = C_0 + kV_1 \quad \text{II. 21)}$$

k est une constante et V_1 est la tension aux bornes de C_1 . Précisons qu'en régime transitoire, la résistance de fuite R_p est négligée.

Le modèle utilisé dans ce projet de fin d'étude est basé sur le modèle à deux branches, nous avons trouvé qu'un simple circuit équivalent RC ne suffit pas à caractériser le comportement des super condensateurs compte tenu de phénomènes qui comptent beaucoup dans leur comportement tels que la non-linéarité de la capacité de la double couche, la redistribution de charge, etc. Nous avons donc besoin d'un modèle complet, qui prend en compte les différents phénomènes particuliers des super condensateurs avec simplicité [3].

III.3.3. Paramètres du modèle à deux branches

La procédure d'identification des paramètres du modèle à deux branches d'un super condensateur repose sur l'analyse de la variation de la tension aux bornes du super condensateur. Durant la phase de charge, ce sont les paramètres de la branche principale qui sont identifiés. Lorsque la charge est terminée, la redistribution interne de l'énergie aux bornes du composant

permet de déterminer les paramètres de la branche lente. Cette procédure est viable dans l'hypothèse où les constantes de temps sont éloignées ($R_2C_2 \gg R_1C_1$) et cela, pour éviter que la branche lente n'influence le cycle de charge. Ces paramètres sont déterminés expérimentalement à partir de la charge et de la décharge des super condensateurs à courant constant [31].

III.4. Hacheur Buck-Boost

Convertisseur Buck-Boost est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif. La source d'entrée est de type tension continue (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie continue de type source de tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive) C'est un convertisseur qui peut donner à sa sortie une tension supérieur ou inférieur à celle de l'entrée suivant la valeur du rapport cyclique qui appelle Convertisseur abaisseur-élevateur Buck-Boost [36].

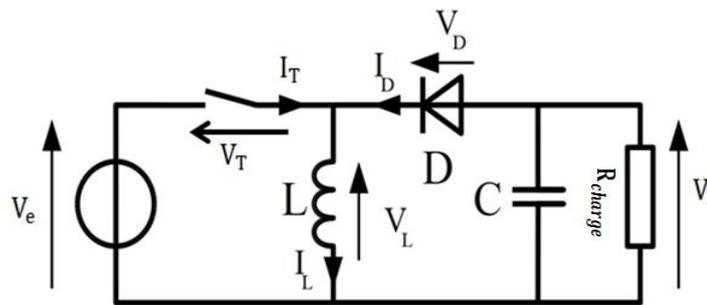


Figure. III. 7. Convertisseur BUCK-BOOST

III.4.1. Fonctionnement d'un Hacheur Buck-Boost

On distingue deux modes de fonctionnement du convertisseur qui dépendent de la conduction du courant dans la bobine :

- Un mode de conduction continue où le courant ne s'annule jamais.
- Un mode de conduction discontinue où le courant s'annule périodiquement.

Dans notre application, nous allons utiliser le 1^{er} mode. Désormais, toutes les relations qui vont être utilisées données ne sont valables que pour le mode de conduction continu. Les formes d'onde du hacheur Buck-Boost, pour le mode de conduction continue [37].

La figure (III.8) montre l'allure de la tension à la sortie de hacheur (buck boost). On constate clairement que la tension a la sortie de hacheur est élevée c.-à-d. le hacheur fonctionne à l'état décharge pour alimenter la charge et le courant s'annule. Un mode de conduction discontinue.

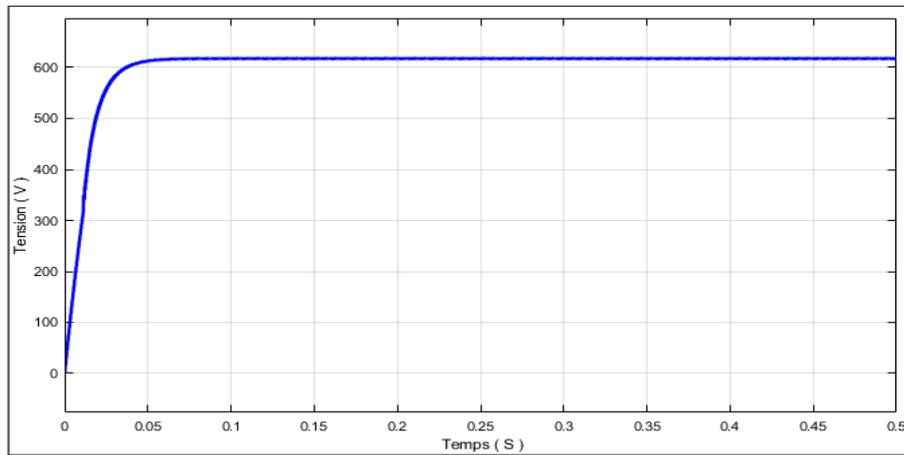


Figure. III. 8. Courbe de Tension de sortie du hacheur

III.4.2. Modélisation d'un Hacheur Buck-Boost

Lors de la première phase du cycle de fonctionnement, de 0 à αT (α est le rapport cyclique du signal de commande et T est sa période), l'interrupteur commandé est fermé, la diode est ouverte et la bobine stocke l'énergie fournie par le générateur d'entrée. On aura [37] :

$$V_L = V_e = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{III. 22})$$

$$\text{Avec } i_T = i_L \quad (\text{III. 23})$$

$$\text{Et } i_s = 0$$

$$(\text{III. 24})$$

D'où :

$$i_L = \frac{V_e}{L} t + i_{L_max} = \frac{V_e}{L} \alpha T + i_{L_min} \quad (\text{III. 25})$$

Lors de la seconde phase du cycle de fonctionnement, de αT à T , l'interrupteur commandé est ouvert et la diode devient passante, la bobine restitue alors son énergie à la charge. On aura [37] :

$$V_L = -V_e = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{III. 26})$$

Avec

$$i_T = 0 \quad (\text{III. 27})$$

$$\text{Et } i_s = i_L \quad (\text{III. 28})$$

D'où :

$$i_L = \frac{-V_e}{L} (t - \alpha T) + i_{L_max} \Rightarrow i_{L_min} = \frac{V_s}{L} (1 - \alpha) T + i_{L_max} \quad (\text{III. 29})$$

On note que le sens de la tension et du courant de sortie est inversé.

III.4.3. Calcul des grandeurs du Buck-Boost

En mode de conduction continue on peut calculer les grandeurs suivantes [37] :

Tension moyenne de sortie

On sait que la tension moyenne aux bornes de l'inductance est toujours nulle donc on a, en conduction continue la valeur moyenne de tension de sortie :

$$V_e \alpha T = V_s (1 - \alpha) T \quad (\text{III. 30})$$

$$V_s = \frac{\alpha V_e}{(1 - \alpha)} \quad (\text{III. 31})$$

Suivant la valeur de α , la tension moyenne de sortie peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée, d'où le nom de hacheur survolteur-dévolteur parfois donné à ce montage.

Courant moyen de sortie

On a $I_d = I_s$ car le courant moyen dans la capacité est toujours nul. D'où :

$$I_s = (1 - \alpha) i_L \quad (\text{III. 32})$$

De plus, connaissant la tension moyenne de sortie et la résistance de la charge, on en déduit facilement I_s , ce qui permet de connaître I_L [37].

Ondulation du courant dans la bobine

L'ondulation crête à crête du courant dans la bobine :

$$\Delta i_L = i_{L_max} - i_{L_min} \quad (\text{III. 33})$$

En remplaçant (III.25) et (III.29) dans (III.33) On aura:

$$\Delta i_L = \frac{V_e}{L} \alpha T + i_{L_min} - \frac{V_s}{L} (1 - \alpha) T i_{L_max} \quad (\text{III. 34})$$

$$\Delta i_L = \frac{V_s (1 - \alpha)}{L.f} = \frac{V_e}{L.f} \quad (\text{III. 35})$$

Cette ondulation permet de dimensionner l'inductance L pour assurer le mode de conduction continue.

Ondulation de la tension de sortie

Un autre condensateur C_s est nécessaire pour filtrer la tension de sortie. Il obéit aux règles de dimensionnement classiques en électronique de puissance. La variation de charge ΔQ dans ce condensateur durant une période de commutation est l'aire du rectangle dans la première phase de 0 à αT . Elle est donnée par [37] :

$$\Delta_Q = \alpha T . I_s \quad (\text{III. 36})$$

La relation charge-tension est donnée par :

$$\Delta_Q = C_s . \Delta V_s \quad (\text{III. 37})$$

En combinant les deux équations (III.36) et (III.37), on aura :

$$\alpha T . I_s = C_s . \Delta V_s \Rightarrow C_s = \frac{\alpha T . I_s}{\Delta V_s} \quad (\text{III. 38})$$

D'autre part on a :

$$C_s = \frac{V_s}{R_{\text{charge}}} \quad (\text{III. 39})$$

En remplaçant (III.38) dans (III.39) on trouve :

$$C_s = \frac{\alpha V_s}{f . \Delta V_s . R_{\text{charge}}} \quad (\text{III. 40})$$

III. Ondulation de la tension d'entrée:

Dans les applications photovoltaïques, il est obligatoire d'ajouter un condensateur de grande valeur à l'entrée du convertisseur DC-DC pour protéger le générateur photovoltaïque des oscillations en haute fréquence, engendrées par la commutation du convertisseur. Le dimensionnement de ce condensateur peut être effectué comme suit [37] :

Les figures (III.9) et (III.10) montrent les allures de la tension et l'état de charge d'un super condensateur avec un hacheur Buck-Boost. On constate clairement que la tension de super condensateur est diminuée donc le hacheur fonctionnement à l'état décharge on (80%).

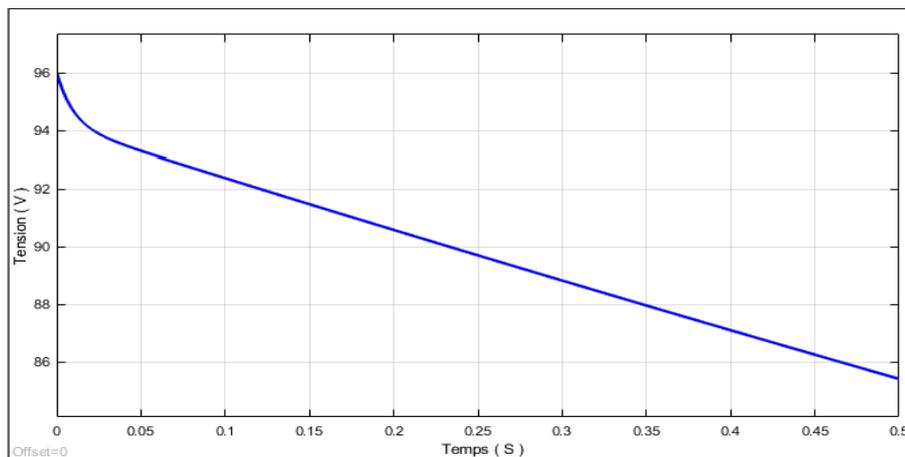


Figure. III. 9. Courbe de Tension(V_{sp}).

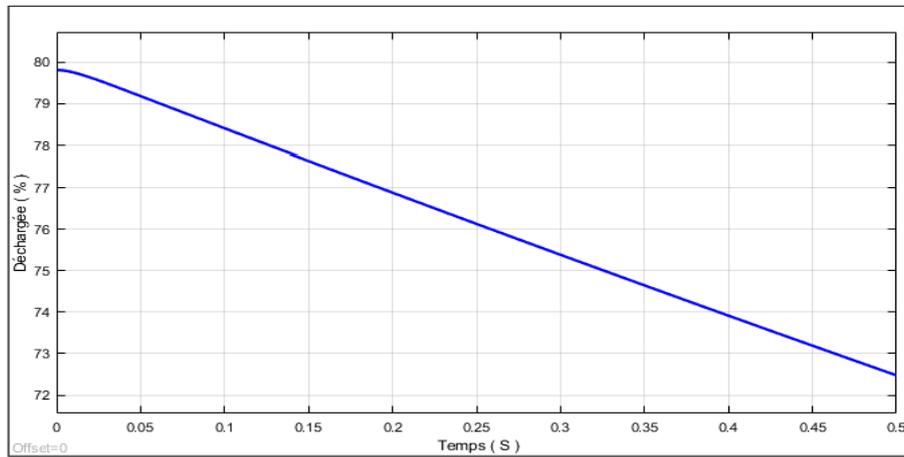


Figure. III. 10. L'état de décharge

La figure (III.11) montre l'allure de courant d'un super condensateur avec un hacheur Buck-Boost. On observe que le courant de super condensateur à l'état décharge est très supérieur amplitude.

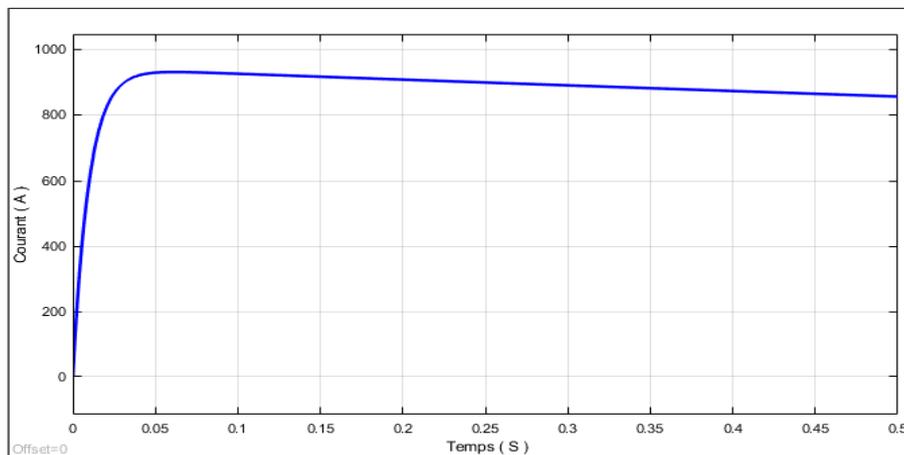


Figure. III. 11. Courbe de Courant(I_{sp}).

La figure (III.12) montre l'allure de puissance d'un super condensateur avec un hacheur Buck -Boost. On observe que la puissance de super condensateur abouti sa valeur crête qui parmi de signifier le bon fonctionnement de super condensateur pour son utilisation lors de l'absence de la puissance PV dans le cas des faibles éclaircements.

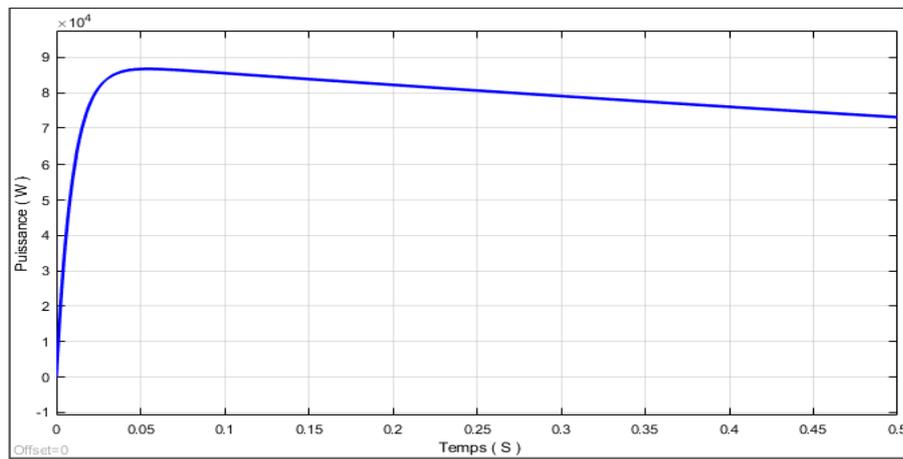


Figure. III. 12. Courbe de Puissance(P_{sp}).

De l'équation (III.37) on a :

$$\Delta_Q = C_e \cdot \Delta V_e \quad (\text{III. 41})$$

On calcule l'aire de la forme du courant dans l'intervalle $[0 \alpha T]$ (Fig. III.13) qui représente la quantité de charge Δ_Q .

$$\Delta_Q = \frac{\alpha V_e}{R_{\text{charge}} \cdot f} \quad (\text{III. 42})$$

En combinant les équations (III.41) et (III.42) on trouvera :

$$\Delta_Q = \frac{\alpha V_e}{\Delta V_e \cdot R_{\text{charge}} \cdot f} \quad (\text{III. 43})$$

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié un système de stockage d'énergie de type super condensateur avec un hacheur de type Buck-Boost.

Dans le quatrième chapitre, nous étudions la gestion énergétique d'un système PV connecté avec un système de stockage à travers un hacheur de type Buck-Boost connecté au réseau isolé (autonome).

Chapitre IV
Gestion d'un Système PV /
Super capacité

IV.1. Introduction

La stratégie de gestion est primordiale pour les Sources d'Énergies Renouvelables (SER) connecté au réseau autonome. Cette gestion décide quelles charges sont connectées et comment charger et décharger le système de stockage connecté avec la SER de type PV [38].

La stratégie de gestion d'énergie qui sera développée dans le cadre de ce projet de recherche doit permettre au système PV / Super capacité connecté au réseau autonome de s'adapter aux variations météorologiques et de la charge. Elle doit garantir la stabilité du système en tout instant [38].

On commence ce chapitre par une brève présentation d'un onduleur, Puis, on présente sa modélisation et son principe de fonctionnement. Ensuite, on montre un algorithme de la gestion de l'énergie proposée. Enfin, nous présentons les résultats de simulation de la gestion d'un système PV / Super capacité connecté au réseau autonome.

IV.2. Convertisseurs CC / CA

Un convertisseur (DC/AC) est un convertisseur statique qui permet la transformation de l'énergie de type continue, en une énergie alternative. La forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale), c'est que le taux d'harmonique soit très faible, et ça dépend essentiellement à la technique de commande utilisée [39].

Les convertisseurs (DC/AC) se distinguent principalement par la nature de l'étage continu et par le nombre de phases de la source alternative. Si l'étage continu est vu comme étant une source de courant, les convertisseurs continu-alternatif associés sont des onduleurs de courant. Si l'étage continu est vu comme étant une source de tension, les convertisseurs continu-alternatif associés sont des onduleurs de tension [39].

Le plus souvent, on utilise deux ou trois phases. Ces convertisseurs (DC/AC) sont des convertisseurs directs, ils ne sont composés que d'interrupteurs semi-conducteurs, et la nature de la source continue impose la nature de la source alternative [39].

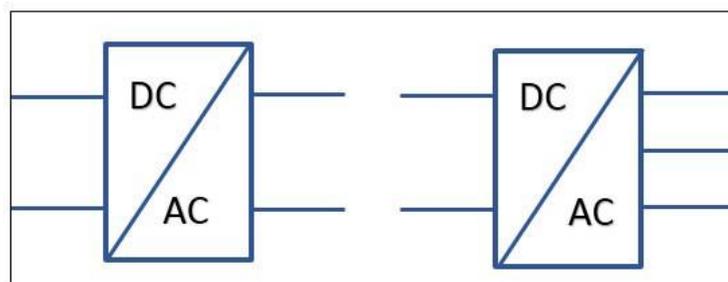


Figure. IV. 1. Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé

IV.2.1. Les onduleurs photovoltaïques

Un onduleur est un composant électronique qui permet de transformer l'électricité Continue provenant d'un module photovoltaïque en électricité alternative pouvant être transmise au réseau électrique. Il est constitué d'un pont qui permet de transformer l'électricité continue en électricité alternative et d'un transformateur qui permet d'imposer une fréquence prédéfinie (50 Hz ou 60 Hz) [40].

IV.3. Modélisation de onduleur à trois niveaux de type NPC

IV.3.1. Structure

L'idée de base de l'onduleur NPC est l'obtention d'une tension de sortie à trois niveaux par la superposition de deux interrupteurs élémentaires alimenté chacun par une source de tension continue distincte [41].

La figure (IV.2) représente la structure topologique d'un onduleur triphasé à trois niveaux. Elle est composée de trois bras monophasés. A partir de la source principale de tension continu, et à l'aide d'un diviseur de tension capacitif formé par les condensateurs de filtrage C_1 et C_2 de même capacité, on obtient deux sources secondaires de tension continue délivrant chacune une demi tension ($E/2$) Cette structure crée alors un point neutre (o) entre les deux condensateurs, ces derniers sont identiques de manières à éviter le déséquilibre de charge ($C_1=C_2$ c'est-à-dire $U_{C1} = U_{C2}$). [41].

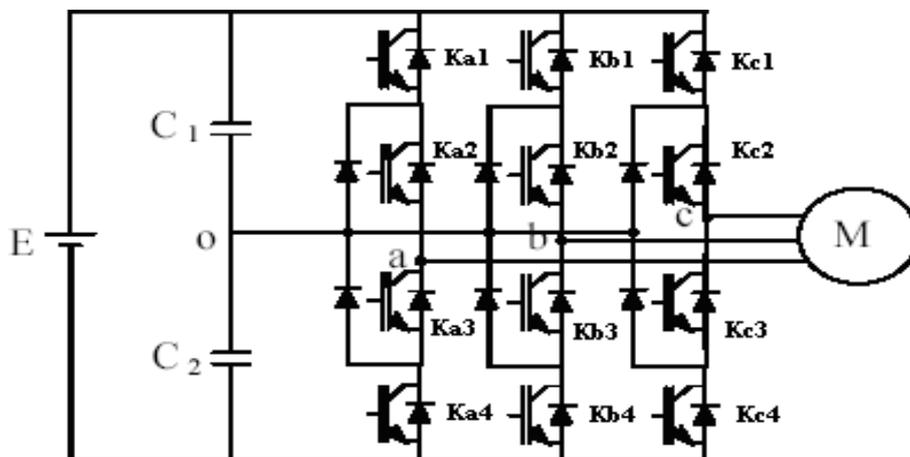


Figure. IV.2. Structure d'un onduleur triphasé à trois niveaux de type NPC

IV.3.2. Principe de fonctionnement d'un bras de l'onduleur à trois niveaux

Il faut déterminer les valeurs que peut prendre la tension simple V_{ao} entre la borne (a) de la charge et le point neutre 0. Cette tension est entièrement définie par l'état (0 ou 1) des quatre interrupteurs K_{a1} , K_{a2} , K_{a3} et K_{a4} du bras.

Sur les $2^4 = 16$ configurations possibles, seules trois configurations sont mises en oeuvre. Toutes les autres séquences ne sont pas fonctionnelles et sont donc à éviter. En effet, elles provoquent soit des courts-circuits des sources de tension continue, soit elles provoquent la déconnexion de la charge [42].

L'onduleur à trois niveaux étant symétrique, l'étude peut se limiter au fonctionnement d'un seul bras, (où on distingue trois configurations possibles).

On donne ci-dessous le tableau récapitulatif tableau (IV.1) représente la tension de sortie V_{ao} d'un onduleur NPC à trois niveaux en fonction de l'état des interrupteurs, la tension aux bornes des interrupteurs de puissance n'excède jamais la moitié du bus d'entrée [42].

A la différence de l'onduleur à deux niveaux, chaque demi-bras de l'onduleur à trois niveaux utilisés non pas un interrupteur bidirectionnel mais deux, ce qui permet d'effectuer une commande décalée [40].

Chaque interrupteur K_{ij} supposé idéal introduit une fonction de connexion F_{ij} .

Avec [42] :

$i = a, b, c$: Indicateur du bras.

$j = 1, 2, 3, 4$: Numéro de l'interrupteur du bras i .

Cette fonction vaut « 1 » si l'interrupteur est fermé, et « 0 » dans le cas contraire.

$$F_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{si } K_{ij} \text{ est fermé} \\ 0 & \text{si } K_{ij} \text{ est ouvert} \end{cases}$$

Ainsi les fonctions de connexions des interrupteurs du bras i sont liées par les relations suivantes :

$$F_{i1} = 1 - F_{i3} \quad (\text{IV. 1})$$

$$F_{i2} = 1 - F_{i4} \quad (\text{IV. 2})$$

On définit la fonction de connexion du demi-bras qu'on notera F_i^Z avec $Z = h$ pour le demi bras du haut et $Z = b$ pour le demi bras du bas [41].

Pour un bras i , les fonctions de connexions des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexions des interrupteurs comme suit [41] :

$$F_i^h = F_{i1} \cdot F_{i2} \quad (\text{IV. 3})$$

$$F_i^b = F_{i3} \cdot F_{i4} \quad (\text{IV. 4})$$

F_i^h : est associé au demi-bras du haut.

F_i^b : est associé au demi-bras du bas

Les différentes tensions composées de l'onduleur triphasé à trois niveaux s'expriment à l'aide des fonctions des demi-bras comme suit [41] :

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} F_a^h \\ F_b^h \\ F_c^h \end{bmatrix} U_{C1} - \begin{bmatrix} F_a^b \\ F_b^b \\ F_c^b \end{bmatrix} U_{C2} \right\} \quad (IV.5)$$

Les tensions simples de sortie s'écrivent :

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (IV.6)$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_a^h - F_a^b \\ F_b^h - F_b^b \\ F_c^h - F_c^b \end{bmatrix} \frac{E}{2} \quad (IV.7)$$

Les états de commutation sont résumés sur le tableau suivant [41] :

Tableau. IV. 1. L'état de commutation de l'onduleur à trois niveaux N.P.C.

Etat des interrupteurs				Tension de sortie V
K_{a1}	K_{a2}	K_{a3}	K_{a4}	
1	1	0	0	$E/2$
0	1	1	0	0
0	0	1	1	$-E/2$

IV.4. Stratégie de commande du convertisseur NPC à trois niveaux

IV.4.1. Contrôle de la tension du bus continu

Les deux condensateurs ($C_1 = C_2 = C$) en série sont équivalents à un condensateur ($C/2$) traversé par un courant virtuel i_c , côté redresseur, la tension aux bornes du condensateur équivalent est obtenue par l'intégration de ce courant [43].

$$U_{s1}(t) = \frac{2}{C} \int i_c dt + U_{s1}(t_0) \quad (IV.8)$$

Le réglage du bus continu est alors composé d'une boucle de régulation, permettant de maintenir une tension constante du bus continu, avec un correcteur Proportionnel Intégral et générant la référence du courant à injecter dans le condensateur ($i_{c,ref}$) [43].

Le schéma de régulateur PI pour régler de tension V_{dc} est représenté sur la figure suivante :

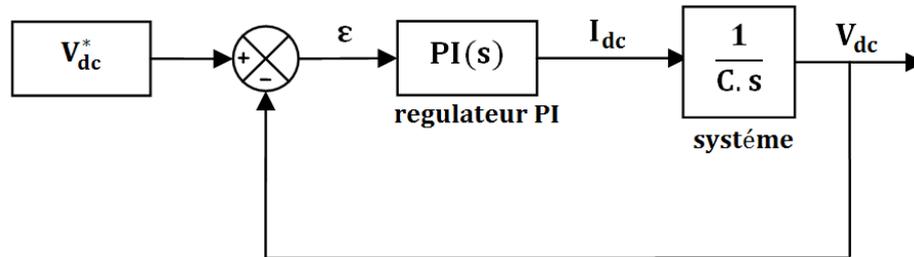


Figure. IV.3. Réglage de Vdc.

IV.4.2. La dimension de régulateur PI

Fonction de transfert en boucle fermé est :

$$F_{BF}(s) = \frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{F_{BO}(s)}{1-F_{BO}(s)} \quad (IV. 9)$$

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{\frac{K_p.s+K_i}{C.s^2}}{1-\frac{K_p.s+K_i}{C.s^2}} = \frac{\frac{K_p.s+K_i}{C}}{s^2+\frac{K_p.s+K_i}{C}} \quad (IV. 10)$$

L'équation caractéristique de deuxième ordre écrire comme suivant :

$$\frac{V_{dc}}{V_{dc}^*} = \frac{\frac{K_p.s+\omega_n^2}{C}}{s^2+2\xi\omega_n.s+\omega_n^2} \quad (IV. 11)$$

Avec :

$$\omega_n^2 = \frac{K_i}{C} \quad (IV. 12)$$

$$2\xi\omega_n = \frac{K_p}{C} \quad (IV. 13)$$

IV.4.3. Contrôle de tension

L'onduleur est modélisé comme un onduleur de source de tension commandé en tension. L'objectif de contrôle d'un onduleur est de réguler la magnitude de la tension côté charge [44].

La transformation de Park permet de ramener ce système triphasé équilibré à un système diphasé (dq) dont les axes sont en quadrature. Cette transformation appliquée aux tensions du la charge:

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (IV. 14)$$

La transformation de Park d'alimentation triphasé :

$$\begin{bmatrix} V_{d.ref} \\ V_{q.ref} \\ V_{o.ref} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{a.ref} \\ V_{b.ref} \\ V_{c.ref} \end{bmatrix} \quad (IV. 15)$$

Tout en comparant le signal de référence de tension modifié avec les composantes de tension dq réelles $V_d V_q$ du côté d'entrée. Le signal de tension modifié est un nouveau signal de tension après soustraction de tension d'entrée du signal de référence de tension [44].

$$\begin{cases} V_d = \left[K_p + \frac{K_i}{s} \right] (V_{d.ref} - V_d) \\ V_q = \left[K_p + \frac{K_i}{s} \right] (V_{q.ref} - V_q) \end{cases} \quad (IV. 16)$$

Les tensions $V_a V_b V_c$ au sortie de régulateur PI on applique La transformation de Park inverse :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} \quad (\text{IV. 17})$$

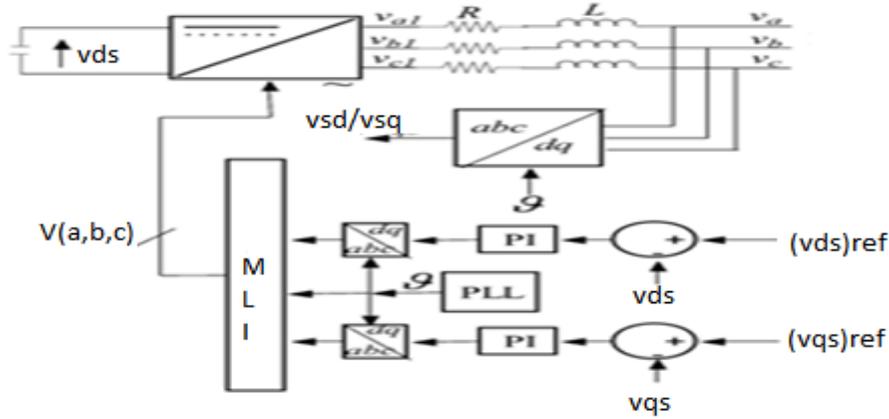


Figure. IV. 4. Structure générale du contrôle du convertisseur [44].

IV.5. Système de gestion d'énergie

Le système de gestion d'énergie est un système qui permet de sécuriser l'utilisation d'un module de stockage d'énergie en assurant la surveillance et/ou le contrôle des éléments individuels qui le constituent. Ce système possède différentes appellations. L'appellation la plus répandue sur le marché concerne les batteries, on parle alors de BMS (Battery Management System). Dans ce qui suit, nous nous proposons d'utiliser pour le système de gestion d'énergie des super condensateurs l'abréviation SCM pour (Super Capacitor Manager) [30].

IV.5.1. Stratégies de gestion d'un système PV

La stratégie de fonctionnement est un algorithme qui permet au système de supervision d'un SER de décider combien et quels générateurs il faut mettre en marche, quelles charges sont connectées et comment utiliser le stockage, si disponible. Il existe différentes stratégies de gestion pour les systèmes PV / Super capacité connecté au réseau autonome d'énergie [38]. Le fonctionnement d'un système hybride d'énergie dépend des paramètres suivant [38]:

- ✓ Le profil de charge : les variations diurnes, les variations saisonnières.
- ✓ Les caractéristiques des ressources renouvelables : les valeurs moyennes, la fréquence des événements, les valeurs extrêmes, les variations diurnes et saisonnières.
- ✓ La configuration du système : le nombre et les types de composants (les sources d'énergie renouvelable, les sources classiques, les charges contrôlables, les types de stockage, les convertisseurs de puissance).

- ✓ Les normes de qualité de l'énergie : les exigences en ce qui concerne les variations de la fréquence et de la tension.

IV.5.2. Gestion du stockage

Il existe deux types de stratégies de stockage à savoir [38]:

La stratégie de stockage à court terme, qui permet de filtrer les fluctuations des énergies renouvelables et/ou de la charge.

La stratégie de stockage à long terme, qui est utilisée pour alimenter la charge sur une période de temps plus longue [38].

Les super condensateurs sont utilisés dans des applications nécessitant beaucoup de stockage compact cycles plutôt que long terme charge rapide / décharge d'énergie : dans les voitures, les autobus, les trains, les grues et les ascenseurs, où ils sont utilisés pour le freinage par récupération, le stockage d'énergie à court terme ou en mode rafale livraison de puissance. Des unités plus petites sont utilisées comme sauvegarde de la mémoire à la mémoire statique à accès aléatoire (SRAM) [45].

IV.6. Algorithme de gestion

L'algorithme de gestion qui est présenté sur la figure (IV.5) a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants d'une part mais aussi de réguler le processus de charge/décharge du stockage (stop charge et décharge), pour préserver les propriétés physico-chimiques des super-capacités et de prolonger leur durée de vie. L'algorithme de gestion quand peut appeler aussi algorithme de supervision est basé sur deux scénarios [16] :

- ✓ Alimentation du consommateur et du stockage par les panneaux photovoltaïques si l'énergie photovoltaïque est suffisante [16].
- ✓ Alimentation du consommateur uniquement par le stockage si énergie photovoltaïque est absente [16].

La gestion d'énergie entre les différents composants de notre système est assurée par une technique de gestion à base de règles déterministes. Elle est conçue en tenant compte de tous les scénarios de fonctionnement de ce système étudié. L'organigramme de la figure (IV.5) donne le principe de fonctionnement de la stratégie de gestion de l'énergie de notre système [46].

On a initialisé d'abord les paramètres des différents sous-systèmes et les données climatiques (température, éclairement). Ensuite, on a estimé la puissance totale P_p produite par la source principale (PV) et la demande de la charge P_c évaluée à chaque instant et la puissance de super capacité P_s et surtout l'état de charge de la batterie SOC.

$$P_s = P_p - P_c \quad (IV.18)$$

Dans la seconde étape, l'algorithme vérifie si la puissance utilisée est supérieure à celle produite. S'il y a un surplus de consommation il faut faire la décision d'injecter ce surplus dans la super capacité ou la charge, est-ce seulement en vérifiant l'état de charge de la super capacité.

Dans le cas où il y a un manque d'énergie la décision est prise d'utiliser le contenu de super capacité, ceci en vérifiant l'état de charge de super capacité.

- ❖ $P_s = 0$ Lorsque la puissance de PV égale la puissance de charge ici tout l'énergie de PV Consommer avec la charge donc la super capacité dans l'état stable (no charge et décharge)
- ❖ $P_s < 0$ Lorsque le super capacité fournit de l'énergie (mode décharge). Dans les périodes où les PV ne peuvent pas générer une puissance nécessaire dans la charge, le super capacité se décharge pour maintenir la tension dans tous les nœuds dans l'intervalle autorisé. (Prend en compte $SOC < 20\%$ arrêt automatique de déchargement de super capacité).
- ❖ $P_s > 0$ Lorsque l'accumulateur reçoit de l'énergie (mode charge). Dans la période où les panneaux photovoltaïques produisent de l'énergie supérieure à la capacité de consommation, ils sont répartis entre consommation et recharger le super capacité. (Prend en compte $SOC > 80\%$ arrêt automatique de chargement de super capacité).

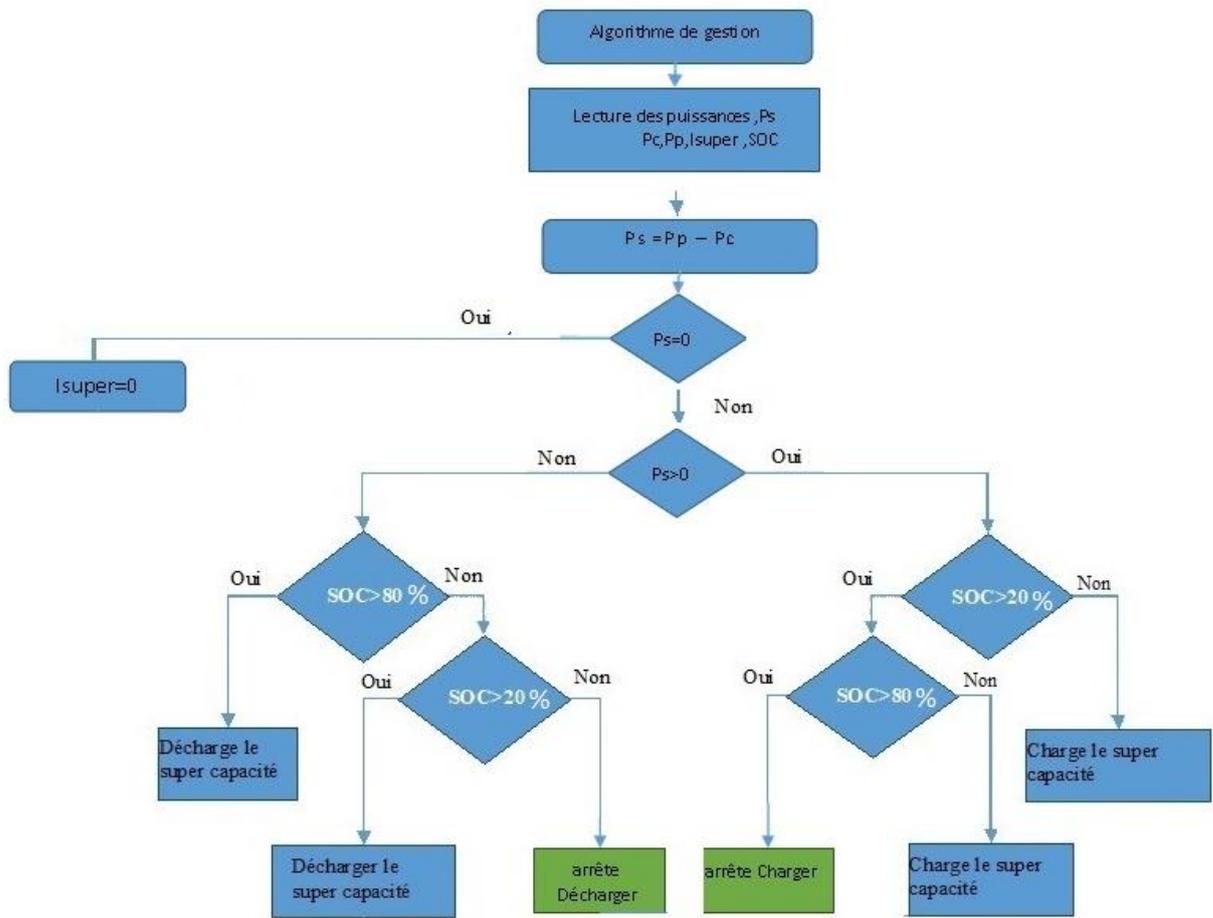


Figure. IV. 5. L'organigramme de gestion d'énergie

IV.7. Bloc de réglage de V_{dc} et gestion sous Matlab/Simulink

En suivant l'organigramme précédent, nous avons réalisé un bloc de gestion et réglage de V_{dc} en Simulink à partir de celui-ci en utilisant des portes logiques

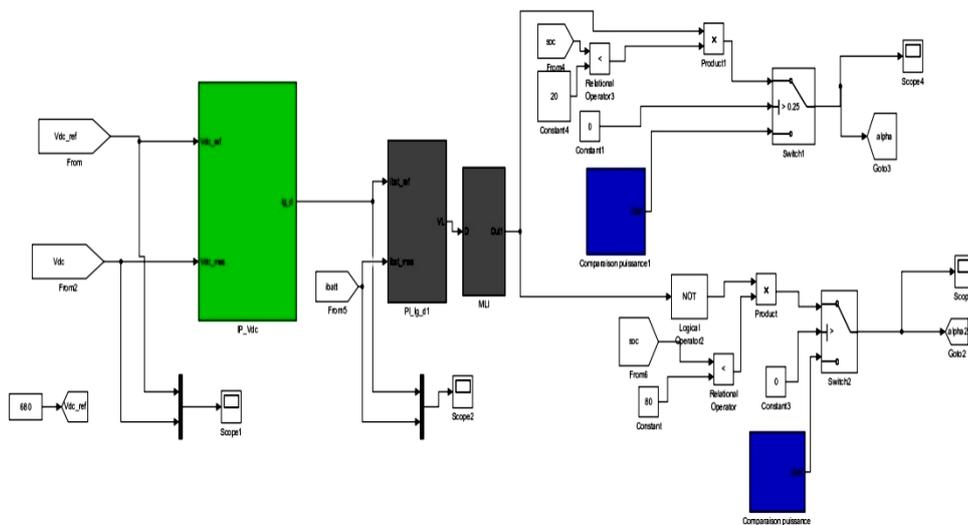


Figure. IV. 6. Simulation de réglage de V_{dc} et de gestion

IV.8. Présentation de système globale

Pour construire un système photovoltaïque isolé intégré et homogène, on va raccorder sous-systèmes à savoir le GPV pour un éclairement solaire $G = 1000 [W/m^2]$ et une température $T = 293 [K]$ avec un hacheur (Boost) et l'onduleur converti continu de alternatif commandé par la technique de commande de système tension et la fréquence et le système de stockage avec le super capacité ainsi qu' un hacheur buck-boost et avec un système de gestion énergétique et étudiez les positions de charge et de décharge ,cette chaine va intégrer dans un charge électrique variable .le schéma général est représenté sur la figure (IV.7).

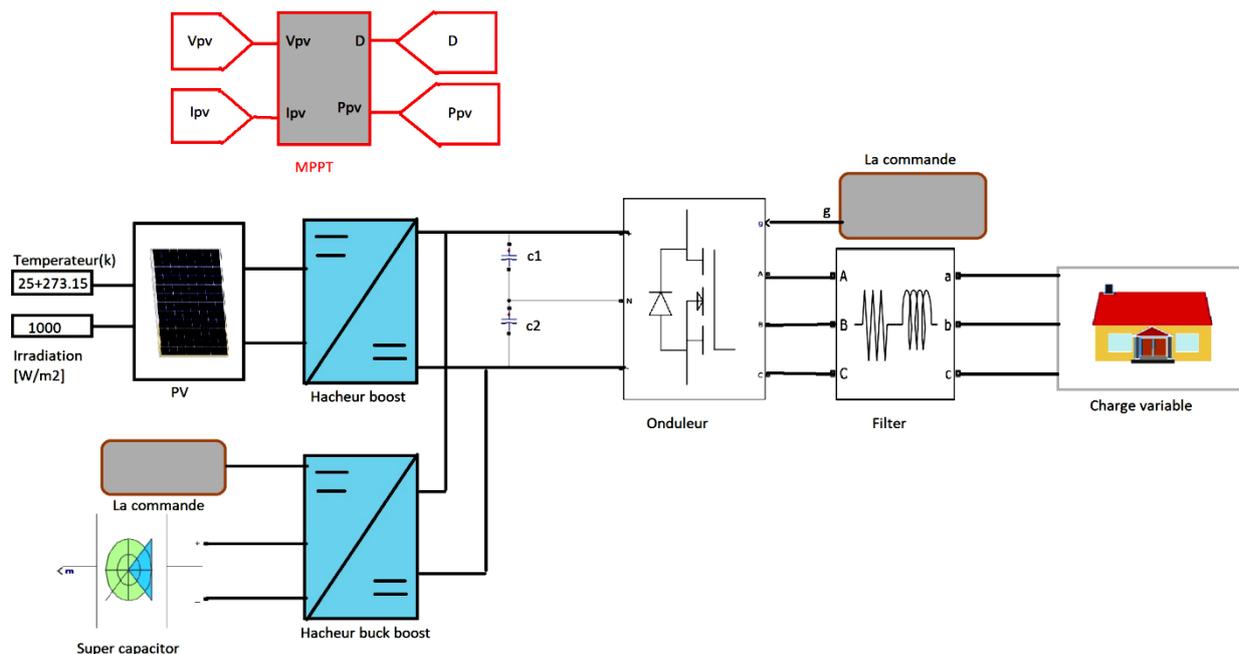


Figure. IV. 7. Schéma de simulation de la chaîne complète.

IV.9. Résultats de simulation

- **Charge variable**

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation d'un l'état de charge et décharge la super capacité contrôlée par l'organigramme pour une charge variable évalué à l'aide du logiciel MATLAB / SimPowerSystem pour un éclairement solaire $G = 1000 [W/m^2]$ et une température $T = 293 [K]$. Les paramètres de système proposés sont répertoriés dans l'annexe A et l'annexe B.

Les figures (IV.8) (IV.9) présentent respectivement les allures des puissances et l'état de charge de système de stockage.

Entre $t = [0 \ 2] s$: La puissance demandée par la charge est inférieure à la puissance générée par le système PV. Dans ce cas, le système de stockage consomme la différence de puissance (mode de charge).

Entre $t = [2\ 3]$ s : La puissance demandée par la charge est supérieure à la puissance générée par le système PV. Dans ce cas, le système de stockage fournit la puissance à la charge (mode de décharge) pour le but d'assurer la stabilité énergétique.

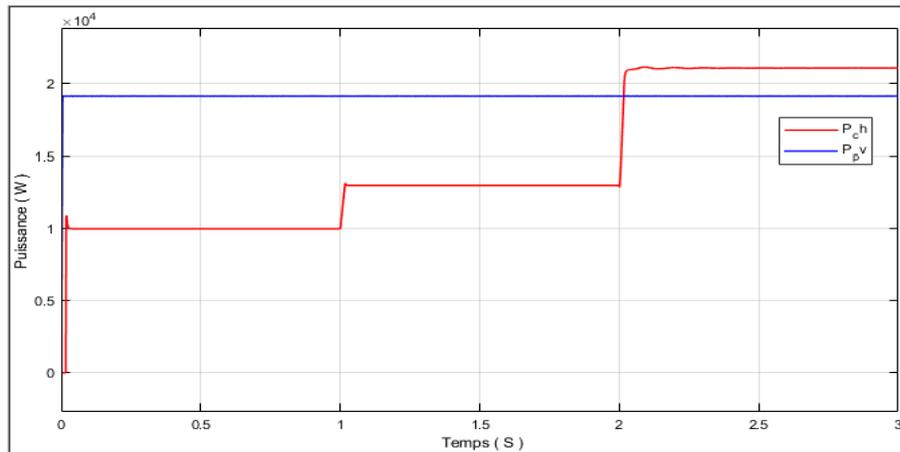


Figure. IV. 8. Courbe de Puissance

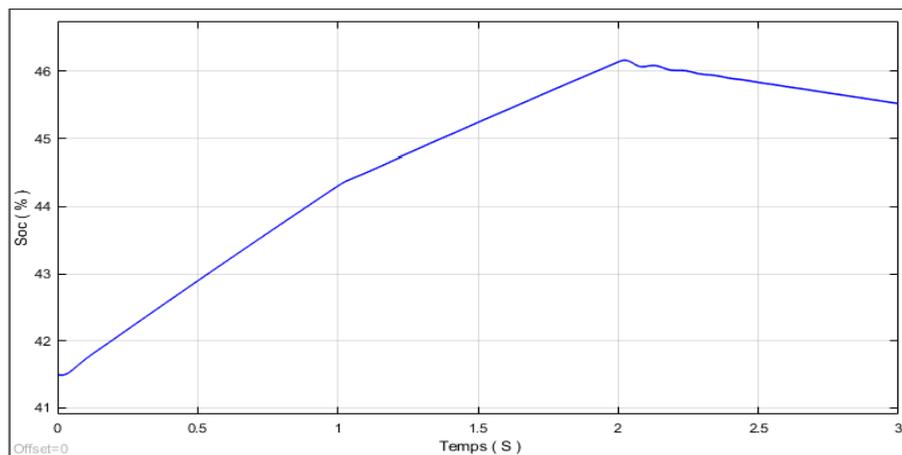


Figure. IV. 9. L'état de charge et décharge la super capacité

Les figures (IV.10) et (IV.11) montrent les formes d'ondes de courant de charge et de système PV respectivement. On remarque que les formes d'ondes ont des formes sinusoïdales et de fréquence constante de valeur de 50 Hz.

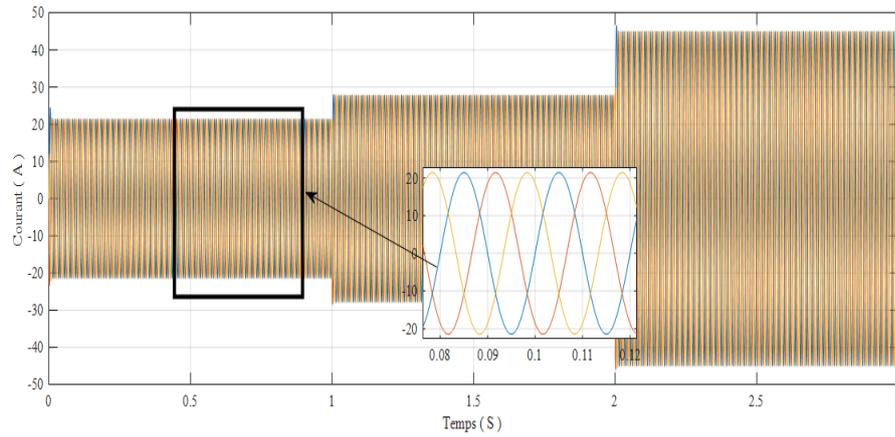


Figure. IV.10. Courant de charge

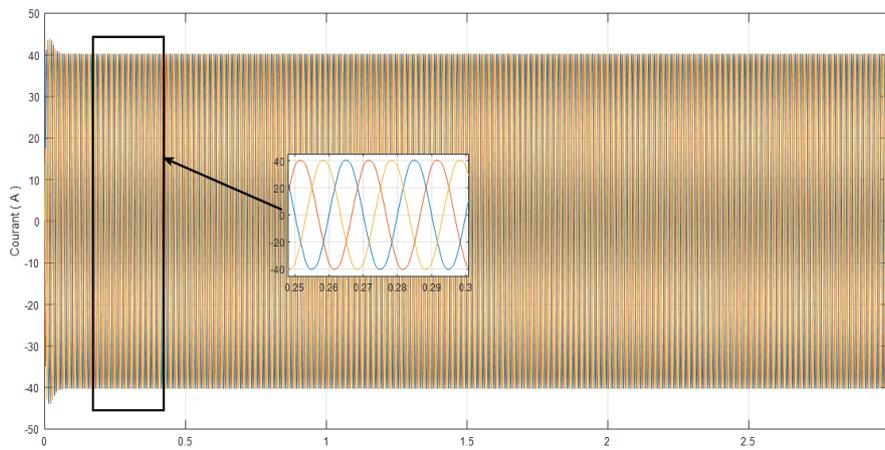


Figure. IV.11. Courbe d'un système PV.

La figure (IV.12) montre l'allure de la tension au sorite de l'onduleur à trois niveaux triphasés. On remarque que la tension est stable pour une charge variable par valeur maximale de tension 311V.

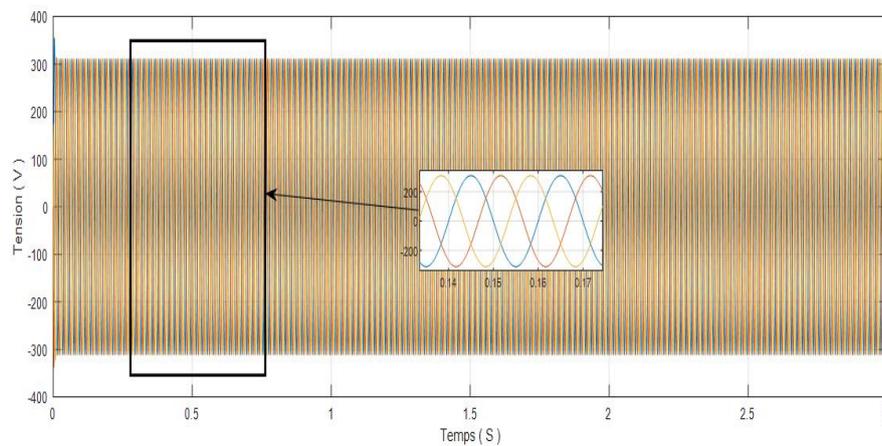


Figure. IV.12. Courbe de Tension

La figure (IV.13) montre l'allure du courant de RMS de PV et de charge. On remarque que le courant généré par le système PV reste constant tant qu'il fonctionne avec des données météorologiques nominales. Mais le RMS de la charge varie avec la variation de charge.

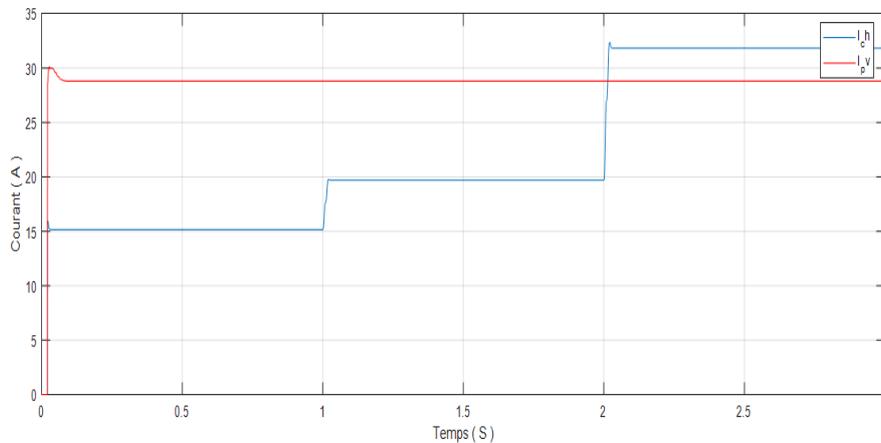


Figure. IV.13. Le courant RMS de charge et PV

La figure (IV.14) montre le THD du courant généré par le système PV. Après l'analyse fréquentielle sur le courant du PV. On constate que le THD a une valeur de $3\% < 5.5\%$ qui implique la bonne qualité d'énergie produite par le système PV.

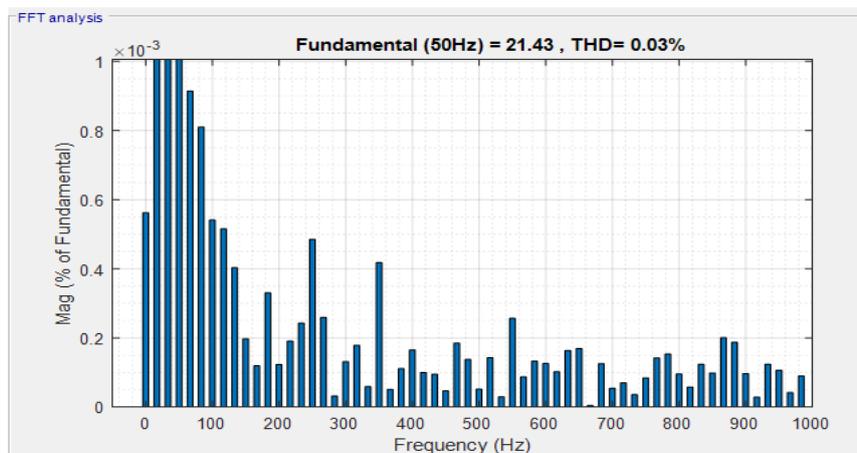


Figure. IV.14. THD de courant I_{PV}

La figure (IV.15) montre l'allure de la tension du bus continu V_{dc} . On constate que cette tension suit sa référence avec succès et elle reste constante avec la variation de charge.

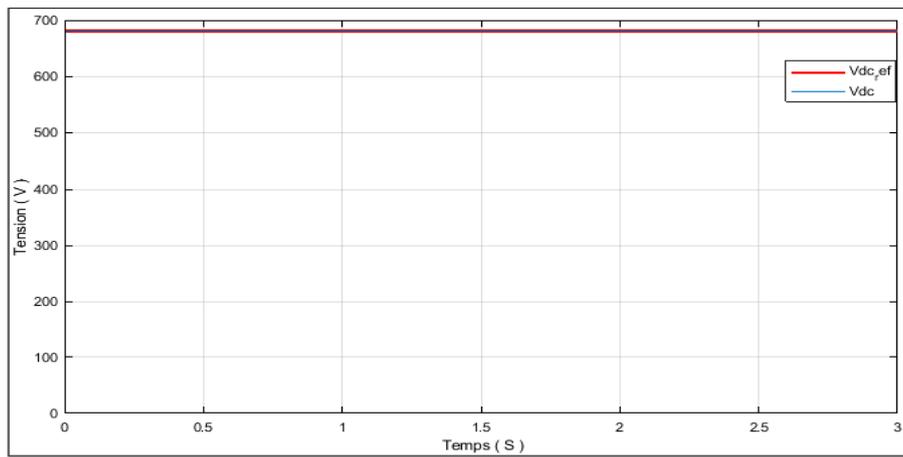


Figure. IV.15. Tension V_{dc} de Bus Continu.

- Charge fixe et pour un éclairement solaire $G = 800 [W/m^2]$

La figure (IV.16) montre les allures de la puissance de charge et de PV. On constate que la puissance de PV est supérieure à celle demandée par la charge.

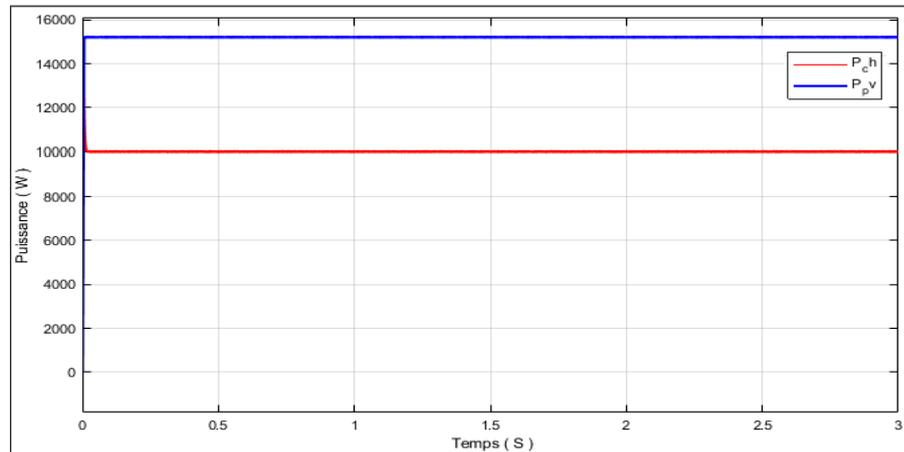


Figure. IV. 16. Courbe de Puissance

La figure (IV.17) montre l'allure du courant de charge fixe. On constate que le courant est constant pour un charge fixe 10kw.

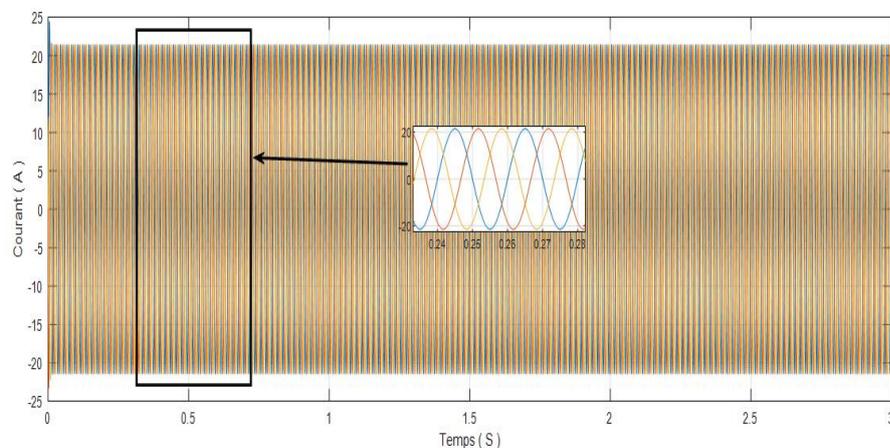


Figure. IV. 17. Courbe de Courant de charge

La figure (IV.18) montre l'allure de l'état charge de super capacité. Tant que la puissance de PV est supérieure à celle de la charge. Dans ce cas le système de stockage consomme de l'énergie à partir de PV et le convertisseur fonction comme abaisseur de tension.

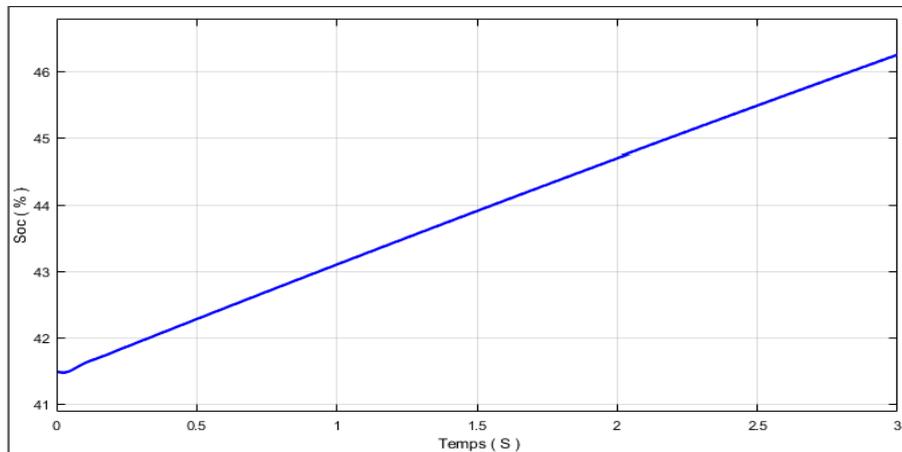


Figure. IV. 18. L'état de charge la super capacité

Charge fixe et pour un éclairement solaire $G = 500 [W/m^2]$

La figure (IV.19) montre les allures de la puissance de charge et de PV. On constate que la puissance de charge est supérieure à celle de PV.

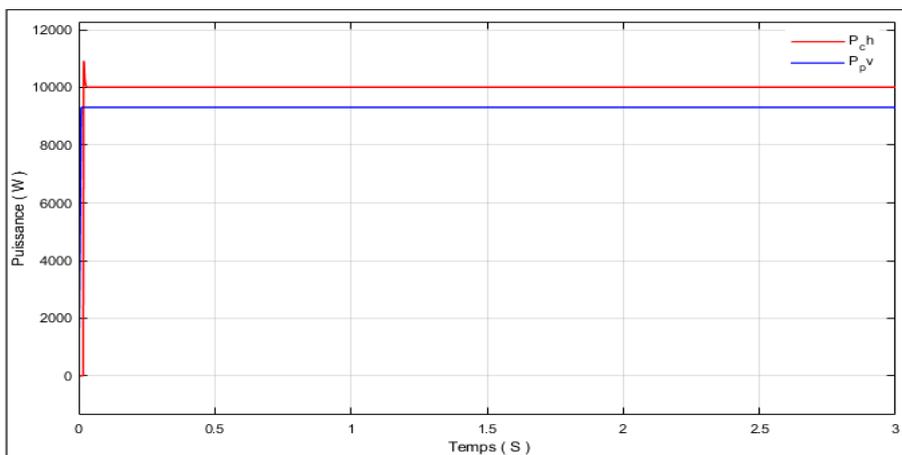


Figure. IV. 19. Courbe de Puissance

La figure (IV.20) montre l'allure du courant de charge fixe. On constate que le courant constant pour un charge fixe 10kw.

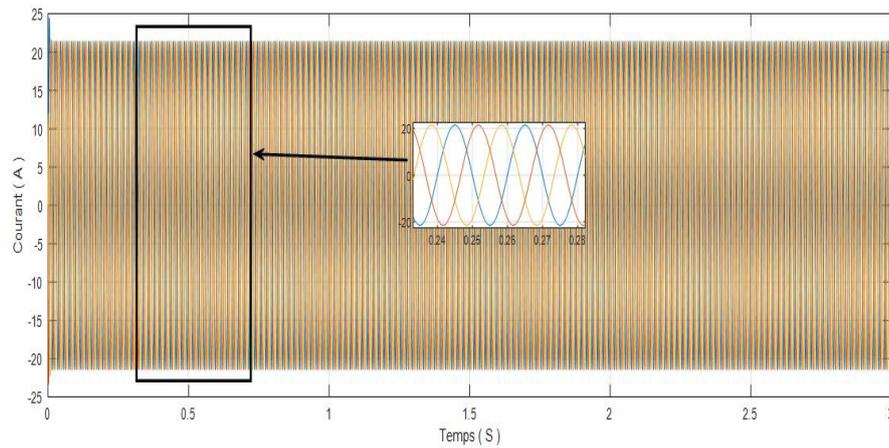


Figure. IV. 20. Courant de charge

La figure (IV.21) montre l'allure de l'état charge de super capacité. Tant que la puissance de charge est supérieure à celle de PV. Dans ce cas le système de stockage fourni de l'énergie à la charge et le convertisseur fonctionne comme élévateur de tension.

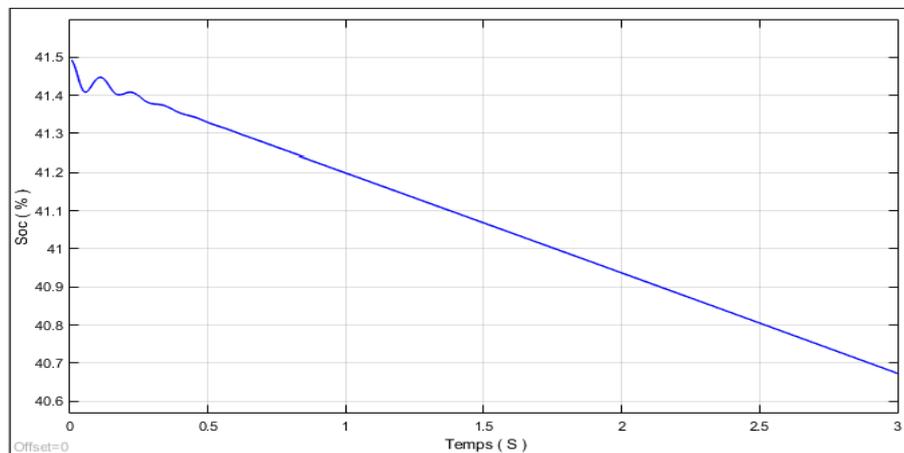


Figure. IV. 21. L'état de décharge la super capacité

IV.10. Conclusion

On a étudié dans ce chapitre la gestion énergétique d'un système PV / Super capacité connecté au réseau isolé. Les résultats de simulation de cette étude ont montré la bonne qualité de l'énergie PV produite et le bon fonctionnement d'un système de stockage suivant la variation de charge.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est d'étudier la gestion d'un système PV connecté dans un site isolé avec un système de stockage de type de super capacité.

Dans le premier chapitre, nous avons exposé comment l'énergie renouvelable a aidé le monde et les pays en développement pour réduire la pollution, les différents systèmes de stockage et la gestion énergétique.

Nous avons abordé brièvement dans le deuxième chapitre le système photovoltaïque et ses applications. On a vu ensuite les composants d'un générateur photovoltaïque tout en mettant en évidence leurs avantages et inconvénients. Ainsi que, nous avons présenté une modélisation d'une cellule solaire, puis nous avons effectué une étude sur l'étage d'adaptation. Elles ont été donc établies en vue d'un hacheur boost en intégrant l'algorithme de MPPT, d'où on distingue l'intérêt de ce dispositif.

Dans le troisième chapitre, nous avons exposé notre attention a été focalisée plus particulièrement au système de stockage par les super condensateurs, notamment que ce type de technologie est largement utilisée comme un système de stockage dans plusieurs domaines. Ainsi que le super capacité et la modélisation avec Modèle classique RC et Modèle à deux branches et comparaison entre efficace entre les deux, aussi la Fonctionnement et modélisation hacheur Buck-Boost pour utiliser pour charger et décharger l'énergie.

Le quatrième et le dernier chapitre a été réservé à l'intégration d'un système isole PV /super capacité raccordé au charge variable et nous avons présenté un algorithme de gestion qui a pour rôle de gérer l'énergie produite par le générateur photovoltaïque. Le comportement du notre système a été analysé par des simulations MATLAB/SIMULINK.

Nous pouvons conclure que les résultats de simulation concordent avec la gestion proposée.

En perspective, nous souhaitons étudier d'autres méthodes MPPT tel que la méthode logique floue avec d'autres modèles mathématiques du panneau photovoltaïque. Application d'autres techniques de commandes basées sur l'intelligence artificielle (les réseaux de neurones, neuro-flou et les algorithmes génétiques) et l'utilisation d'autres types de technologie de stockage.

Annexes**ANNEXE A :**

Paramètres de panneau photovoltaïque sont :

Résistance en série : $R_s = 0.221$

Résistance en parallèle : $R_p = 415.405$

Nombre des panneaux en parallèles : $N_{pp} = 8$

Nombre des panneaux en séries : $N_{ss} = 12$

Le photo-courant généré : $I_{pv} = 61 \text{ A}$

Courant maximal : ; $I_{mp} = 61.7 \text{ A}$

Tension maximale : $V_{mp} = 311 \text{ V}$

L'ensoleillement nominal : $G = 1000 \text{ [W/m}^2\text{]}$

La température de la jonction dans les conditions nominales : $T = 293 \text{ [K]}$

ANNEXE B :

1) Paramètre d'un hacheur boost :

Capacité : $C_h = 10 - 3 \text{ F}$

Inductance : $L_h = 11.10 - 6 \text{ H}$

2) Paramètre d'un hacheur buck-boost :

Inductance : $L = 50.10 - 4 \text{ H}$

Caractéristiques de la batterie super condensateur choisie sous Matlab/Simulink :

Capacité de batterie=50 F

Résistance de Batterie : $R=0.0021 \text{ } \Omega$

Tension de batterie : $V_{bat}=120 \text{ V}$

Nombre des capacités en sérié : $N_s=6$

Nombre des capacités en parallèles : $N_p=10$

Voltage initial=50 V

Références bibliographiques

- [1]. M. H. CANO, « système de gestion de l'énergie base sur l'incertitude pour un système hybride a sources d'énergie renouvelable autonome avec production d'hydrogène », thèse doctorat, université du Québec a Trois-Rivières 2017.
- [2]. Minh Huynh Quang, « Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isole », Thèse Doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne 2013.
- [3]. DIAB Yasser, « ÉTUDE ET MODELISATION DES SUPERCONDENSATEURS : APPLICATIONS AUX SYSTEMES DE PUISSANCE », Thèse Doctorat, Université de Damas, Syrie 2009.
- [4]. <https://youmatter.world/fr/definition/energies-renouvelables-definition/> , Site internet, consulté le 05/07/2020
- [5]. N.Benalouache, « L'énergie solaire pour la production d'électricité au Maghreb : transition énergétique et jeux d'échelles », Thèse Doctorat , Université de Sfax Tunisie, 2017.
- [6]. Jérémy.D, Bruno. J, Lionel. Sé, Corinne. A « Dimensionnement multi-objectif d'une association batterie – super condensateur pour une application photovoltaïque » article, May 2016, Toulouse, France. hal-01316502
- [7]. CHRISTOPHE DARRAS, « Modélisation de systèmes hybrides Photovoltaïque / Hydrogène : Applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H) » thèse doctorat, Université Pascal Paoli, 2010. Français.
- [8]. Boukhelifa Hamza, « Dimensionnement technique d'une installation photovoltaïque De 300kw », mémoire de master, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, juin 2017
- [9]. <https://blog.lendopolis.com/energies-renouvelables/panorama-energie-solaire-monde/> Site internet, consulté le 10/07/2020
- [10]. <https://www.enerplan.asso.fr/energie-solaire-avantages-transition-energetique> Site internet, consulté le 12/07/2020
- [11]. <https://fr.statista.com/statistiques/828787/capacite-production-energie-solaire-mondiale/> Site internet, consulté le 16/07/2020
- [12]. Revues de Presse « Les énergies renouvelables en Algérie: Etats des lieux et perspectives »,journal ,https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/ber35_24_28.pdf,Site internet ,consulté le 18/07/2020
- [13]. A.O. Benelkadi, A. Kaabeche et Y. Bakelli ,« Etude de faisabilité technico économique des centrales photovoltaïques en Algérie » article, Université M'Hamed Bougara, Boumerdes, Algérie le 10 Juin 2018
- [14]. YANN RIFFONNEAU, « GESTION DES FLUX ENERGETIQUES DANS UN

- SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE AVEC STOCKAGE CONNECTE AU RESEAU » thèse doctorat, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2009. Français.
- [15]. Patrick HOUEE, « Une installation photovoltaïque en site isolé » RESSOURCES POUR LES STI2D, technologie 175, SEPTEMBRE- OCTOBRE 2011
- [16]. BOUDEHOUCHE.M. D, OUENNOUGHIM, « GESTION D'UN SYSTÈME PHOTOVOLTAÏQUE AVEC STOCKAGE », Mémoires de Master, UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA DE BEJAÏA,2015-2016
- [17]. MARTIN TAÏKI VAÏTCHEMÉ, « MODELISATION ET SIMULATION D'UN SYSTÈME DE STOCKAGE INTÉGRÉ DANS UN MICRO-RÉSEAU AUTONOME SOLAIRE-ÉOLIEN » UNIVERSITÉ DU QUÉBEC EN ABITIBI TÉMISCAMINGUE Juin 2019
- [18]. Eric Korsaga (1), Zacharie Koalaga , « Comparaison et détermination des dispositifs de stockage appropriés pour un système photovoltaïque autonome en zone sahélienne » article, Université Clermont Auvergne, 2018,HAL Id: hal-01713810
- [19]. <https://www.researchgate.net/publication/268382381> , Site internet, consulté le 26/07/2020
- [20]. Dariga meekhun « Réalisation d'un système de conversion et de gestion de l'énergie d'un système photovoltaïque pour l'alimentation des réseaux de capteurs sans fil autonomes pour l'application aéronautique » Thèse Doctorat de l'université de Toulouse, 2010. Français.
- [21]. Alain Bilbao Learreta, « Réalisation de Commandes MPPT Numériques »,Rapport de stage, Université Rovira Virgili on 2006
- [22]. LE PHOTOVOLTAÏQUE – MODULE 3 – FONCTIONNEMENT ET TECHNOLOGIES, document Environnement.Brussels,NOVEMBRE 2010
- [23]. Halouane Assia, « Modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module Photovoltaïque », mémoire de master, l'université de boumerdes.2017.
- [24]. <https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/photovoltaique/comment-fonctionne-le-panneau-solaire-photovoltaique/fonctionnement-cellule-photovoltaique/>,Site internet,consulté le 29/07/2020
- [25]. MEFLAH AISSA « Modélisation et commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque » Thème de Magister, UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEN 2012
- [26]. OUABDELKADER Katia, MERSEL Houria,« Modélisation et Contrôle d'un Système Photovoltaïque Connecté au Réseau », mémoire de master , , UNIVERSITE de abderrahmane mira de bejaia,2014/2015
- [27]. B. BELABBAS, 'Gestion des Flux Energétiques d'un Système de Production d'Energie de Sources Renouvelables avec Stockage en Vue de la Conception des Réseaux Electriques Intelligents "Smart GRID"', Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique. Alger, Alger,

- [28]. Bendjamâa Ibrahim « Modélisation et commande d'un système De stockage photovoltaïque », mémoire de magister, UNIVERSITE ABOU-BAKR BELKAID – TLEMCEN,2011-2012
- [29]. MAHAMMEDI Abdellatif, « Etude et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque », mémoire de magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF1,15/12/2014
- [30]. Seïma Shili, « Contrôle des circuits d'équilibrage des systèmes de stockage d'énergie (supercondensateurs) en vue d'estimer et d'améliorer leur durée de vie », Thèse de Doctorat, Université de Lyon, 2016
- [31]. M. A. Camara ; « Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par super condensateurs », Thèse de Doctorat, Université Paris-Est, 2011.
- [32]. N. Maherzi, « Etude, conception et réalisation d'un convertisseur d'énergie DC/DC associé à des super condensateurs », Energie électrique 2010, HAL Id: dumas-00551837, LYON.
- [33]. A.T. SINGO, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse de Doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy-I ,3 février 2010
- [34]. Guven ALCICEK, « Contribution à l'étude du vieillissement et à l'intégration des super condensateurs dans une chaîne de propulsion électrique (CPE) haute tension pour des applications véhicule électrique », Thèse de Doctorat, L'UNIVERSITE DE TECHNOLOGIE DE BELFORT MONTBELIARD le 08 Décembre 2014.
- [35]. Rémi SAISSET, « Contribution à l'étude systémique de dispositifs énergétiques à composants électrochimiques », Thèse de Doctorat, l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, TOULOUSE le 2 Avril 2004
- [36]. Lasgaa Habib Chaouki, « Commande d'un convertisseur DC-DC dans les applications de pile à combustible », mémoire de master, Université Mohamed Khider de Biskra le 2018.
- [37]. BENDAHOU Djamel, BOUROUIS El-Abbes, « Commande MPPT pour les systèmes photovoltaïques en utilisant l'optimisation par essaim de particules », Mémoires de Master,Université SAAD DAHLAB de BLIDA,2013
- [38]. ABDOUL KARIM TRAORÉ, « GESTION D'UN SYSTÈME AUTONOME HYBRIDE PHOTOVOLTAÏQUE ÉOLIEN POUR APPLICATIONS AGRICOLES », mémoire de master, Université VERSITÉ DU QUÉBEC, JUILLET 2016.
- [39]. HAMDANI Abderrahmane, KACEM Brahim, « Etude et Simulation de Connection d'une Centrale Photovoltaïque au Réseau Electrique Triphasé », Mémoires de Master,Université Ahmed Draïa Adrar,2018
- [40]. LARONDE. Rémi, « Fiabilité et durabilité d'un système complexe dédié aux énergies renouvelables-Application à un système photovoltaïque ». Thèse de Doctorat, L'Université d'Angers, 2011

- [41]. BRIGHEN Haroun, HALAIMIA Safouane, « Etude et analyse de la commande des onduleurs Multi-niveaux par MLI sinusoïdale », Mémoires de Master, UNIVERSITE LARBI TEBSSI TEBESSA,2015-2016
- [42]. Houria Ben Zemammouch « Application de la MLI Vectorielle aux Onduleurs Multi niveaux à base de GTO et d'IGBT », Mémoire de Magister, Université Badji Mokhtar Annaba.2010
- [43]. O. BOUHALI, « CONTRIBUTION DES CONVERTISSEURS MULTINIVEAUX AU RACCORDEMENT DE LA PRODUCTION D'ORIGINE EOLIENNE SUR UN RESEAU ELECTRIQUE », Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille, 2007.
- [44]. Nishad Mendis,« Management of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage and Synchronous Condenser for Isolated Operation of PMSG Based Variable-Speed Wind Turbine Generating Systems »,article, IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID, VOL. 5, NO. 2, MARCH 2014
- [45]. <https://fr.qwe.wiki/wiki/Supercapacitor> , Site internet, consulté le 03/09/2020
- [46]. Bati E.B et Prosper Gbaha et Kamenan Blaise Koua, Magloire Paul Ekoun Koffi, « Dimensionnement et Gestion de l'Energie au Sein d'un Système Hybride de Production d'Energie », article, Laboratoire de Mécanique et Sciences des Matériaux, Yamoussoukro, Côte d'Ivoire,2018

Résumé

Ce travail traite une étude sur la gestion énergétique d'un système PV/super capacité connecté au réseau isolé à travers un onduleur à trois niveaux à structure NPC pour le but d'améliorer la qualité d'énergie PV. Afin d'extraire le maximum d'énergie PV, un algorithme de MPPT de type P&O est appliqué pour extraire la puissance optimale pour des données météorologiques variables. La gestion énergétique est utilisée pour ce système pour assurer la stabilité énergétique entre le système PV connecté à super capacité et la charge demandée. Ce système a été étudié à l'aide de logiciel MATLAB /SimPower System. Les résultats de simulation montrent l'efficacité de la gestion énergétique proposée et la bonne qualité d'énergie produite par le système PV.

Mots clés : Gestion énergétique ; PV ; Super capacité ; Réseau isolé ; Onduleur à trois niveaux ; MPPT.

ملخص

في هذا العمل نعالج دراسة حول إدارة الطاقة لنظام الكهروضوئية / السعة الفائقة المتصل بالشبكة المعزولة من خلال عاكس بغرض تحسين جودة الطاقة الكهروضوئية. من أجل استخراج الحد الأقصى من الطاقة NPC ثلاثي المستويات بهيكل لاستخراج الطاقة المثلى لبيانات الطقس المتغيرة. تستخدم إدارة P&O من نوع MPPT الكهروضوئية، يتم تطبيق خوارزمية الطاقة لهذا النظام لضمان استقرار الطاقة بين النظام الكهروضوئي المتصل بسعة فائقة والحمل المطلوب. تمت دراسة هذا تظهر نتائج المحاكاة كفاءة إدارة الطاقة المقترحة والجودة. MATLAB / SimPower System النظام باستخدام برنامج الجيدة للطاقة التي ينتجها النظام الكهروضوئي.

الكلمات المفتاحية

إدارة الطاقة؛ الطاقة الكهروضوئية؛ السعة الفائقة؛ شبكة معزولة؛ العاكس ثلاثة مستويات؛ تتبع نقطة الاستطاعة العظمى

Abstract.

This work deals with a study on the energy management of a PV / supercapacitor system connected to the isolated grid through a three-level inverter with NPC structure for the purpose of improving the quality of PV energy. In order to extract maximum PV energy, a P&O type MPPT algorithm is applied to extract the optimum power for varying weather data. Energy management is used for this system to ensure energy stability between the connected PV system at supercapacitor and the requested load. This system has been studied using MATLAB / SimPower System software. The simulation results show the efficiency of the proposed energy management and the good quality of energy produced by the PV system.

Keywords: Energy management; PV; Supercapacitor; Isolated grid; three-level inverter; MPPT.