

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED – NAAMA



INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DÉPARTEMENT DE TECHNOLOGIE

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Énergies Renouvelables

Option : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

Intitulé :

CONTRÔLE ET COMMANDE D'UN SYSTÈME À ÉNERGIES RENOUVELABLES

Présenté par :

- **Mir Tarek Aziz**
- **Belkhir Souad**
- **Aribi Khadidja**

Soutenu le : ... 20/06/2023..... devant le Jury :

<i>M. Sekkal Med Chakib</i>	<i>MAA</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Président</i>
<i>M. Brahimi Mohammed</i>	<i>MCA</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Encadreur</i>
<i>Mdm.Messaoud Fatima Zahra</i>	<i>Dr</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Co-Encadreur</i>
<i>M.Habchi Yassine</i>	<i>MCA</i>	<i>Centre Universitaire Naâma</i>	<i>Examineur</i>

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciement

Avant tout nous remercions Allah tout puissant d'avoir nous donner le courage, la volonté et la patience pour terminer ce travail.

Nous tiens à exprimer toute nos reconnaissance à notre encadreur Mr.Brahimi Mohammed et Co-encadreur Mdm.Messaoud Fatima Zahra pour vos compétence, vos encadrement ont toujours suscité mon profond respect. On vous remercie pour votre accueil et vos conseils. Veuillez trouver ici, l'expression de nos gratitude et de notre grande estime.

Nous tenons à remercier les responsables et tout le personnel du département de Génie électrique pour les facilités qui 'ils nous accordent pour terminer ce travail.

Nous tenons à remercier chaleureusement, tout nous proches et tous ceux qui, de près ou de loin, nous ont apporté leurs sollicitudes pour accomplir ce Travail.

The background of the page is white and decorated with several black graduation caps (mortarboards) scattered across it. Interspersed among the caps are numerous small, golden-yellow confetti pieces and streamers, creating a celebratory atmosphere. The text is centered on the right side of the page.

Dédicace

Je Dédie ce travail de master à :

A ma très chère mère

A mon cher père

Qui ont sacrifié pour moi

A mon cher frère, A mes très chères sœurs pour leur
encouragement

A toute ma famille grande et petite

Une grande dédicace à mon trinôme Khadîdja et
Tarek surtout pour m'avoir poussé à continuer.

A tous mes Amis que j'aime

Pour leur sincère amitié et confiance, et à qui je dois
ma reconnaissance et mon attachement

Tous les enseignants qui m'ont prise en charge du
primaire jusqu'à l'université.

Souad



Dédicace

*Je dédie cet humble travail A mes chers parents ma
mère et mon père Pour leur patience,*

*Leur amour, leur soutien inconditionnel et leurs
encouragements A mes amis et mes camarades A tous
les personnes qui ont cru en moi -ou pas - et qui grâce
à elles je suis arrivé aujourd'hui là.*

*A tous mes professeurs du primaire, collège, lycée
et enseignement supérieur.*

*A mon ami sliman, avec qui je partage cet
événement grandiose.*

Tarek Aziz



Dédicace

*Avec tous mes sentiment de respect, avec l'expérience de ma reconnaissance ,je
dédie ce mémoire et ma joie*

*a celui qui m a fait une femme ,ma source de vie D'Amour et
D'affection ,a mon support qui était toujours a mes cotes pour me soutenir et
M'encourager ,a mon prince*

Papa

*a mon paradis ,a la prunelle de mes yeux ,a la source de ma joie et mon
bonheur ,ma lune et la le fil d espoir qui allumer mon chemin ,ma moitié*

Maman

*a ma grande sœur Naima Waffa qui n'est pas cassée de me conseiller encourage
et soutenir tout au long de mes étude*

a mon frère Moh Fathi pour l'amour qu'il me réservé

a mes frère jimou Asma nour elhouda et Yacine

*a mes adorable Moh ilyase et Louay qui sont toujours
comment procurer la joie et le bonheur pour tout la famille*

a tous les membres de ma grande famille ,mes tantes et mes cousines

a mes encadreurs Mr.brahimi Mohamed et Mdm messaoud .F

*a mon trénon souade et tarek pour son soutien moral sa patience et sa
compréhension tout au long de ce projet*

sans oublier Mon professeur Kidari Karima ,grace a qui atteint ce niveau

Khadija

Table de matière

Liste de Figures

Liste de Tableaux

Liste de Symbole

Introduction Général

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes hybrides à énergies renouvelables

I.1	Introduction-----	1
I.2	Définition d'énergies renouvelables -----	1
I.3	Description des différentes sources utilisables -----	1
I.3.1	L'énergie solaire-----	1
I.3.2	Les énergies éoliennes-----	9
I.3.3	Energie hydraulique-----	13
I.3.4	Énergie marine-----	13
I.3.5	L'énergie thermique des mers -----	13
I.3.6	Energie éolienne offshore : -----	14
I.3.7	Energie marémotrice-----	14
I.3.8	Energie hydrolienne-----	14
I.3.9	Energie de la biomasse -----	15
I.4	Définition de l'hybridation -----	16
I.5	Les types de bus commun -----	17
I.5.1	Le couplage DC -----	17
I.5.2	Le couplage AC -----	17
	Le couplage AC/DC-----	18
I.6	Batteries de stockage -----	18

I.6.1	Différents types de batteries -----	19
I.6.2	Le principe de fonctionnement d'une batterie -----	20
I.6.3	Comparaison des caractéristiques des batteries électrochimiques :-----	21
I.7	Pile à combustible -----	21
I.7.1	Principe de fonctionnement d'une pile à combustible -----	21
I.7.2	Différents types de piles à combustible -----	22
I.7.3	Pile à combustible de type à membrane échangeuse de protons (PEMFC)-----	23
I.8	Conclusion -----	23

Chapitre II : Modélisation des différents composants du système hybride

II.1	Introduction -----	26
II.2	Modélisation du générateur PV -----	26
II.2.1	Modèle d'une cellule photovoltaïque -----	26
II.2.2	Paramètres d'une cellule photovoltaïque -----	27
II.2.3	Simulation d'une cellule photovoltaïque -----	28
II.2.4	Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque -----	29
II.2.5	Modèle du module photovoltaïque -----	30
II.2.6	Caractéristique de champ PV -----	33
II.3	Modélisation de le hacheur Boost -----	35
II.3.1	Fonctionnement -----	35
II.3.2	Modèle mathématique -----	36
II.3.3	Simulation d'hacheur -----	37
II.4	Commande MPPT de l'hacheur élévateur -----	40
II.4.1	Principe de la MPPT -----	40
II.5	Modélisation de la batterie -----	41
II.6	Conclusion -----	44

Chapitre III : Simulation du système hybride

III.1	Introduction -----	47
III.2	Estimation de la consommation journalière-----	47
III.3	Simulation du GPV -----	48
III.3.1	Les paramètres des sources -----	48
III.3.2	Simulation du générateur PV alimentant une charge résistive : -----	49
III.4	Méthode classique de commande MPPT -----	56
III.4.1	Méthode par l'incrémentation de la conductibilité (IncCond)-----	56
III.4.2	La technique Perturbation & Observation (P&O)-----	57
III.4.3	Simulation les deux Méthode de commande MPPT -----	59
III.5	Simulation de Batterie-----	60
III.5.1	Schéma et Résultats de simulation : -----	60
III.6	Simulation du Générateur Photovoltaïque et Batterie :-----	62
III.7	Conclusion -----	67

Conclision Général

Bibliographie

Liste de Figures

Chapitre I : Etat de l'art des systèmes hybrides à énergies renouvelables

Figure I. 1	: Spectres Solaires	3
Figure I. 2	: cellule PV ; panneau PV et champ PV.....	4
Figure I. 3	: Types d'éoliennes à axe horizontal.....	10
Figure I. 4	: Schéma de principe du rotor de Savonius.....	11
Figure I. 5	: Schéma du rotor de Darrieus.....	11
Figure I. 6	: Les constituants d'une éolienne	12
Figure I. 7	: Schéma d'une chaine de conversion d'énergie éolienne.....	12
Figure I. 8	: Bilan de cycle biomasse.....	15

Figure I. 9 : Architecture d'un système hybride à bus continu.	17
Figure I. 10 : Architecture d'un système hybride à bus alternatif (AC).	18
Figure I. 11 : Configuration du système hybride à bus mixte (AC/DC).	18
Figure I. 12 : mécanisme de charge et décharge dans les batteries lithium-ion.	20
Figure I. 13 : Fonctionnement de principe d'une pile à combustible	22

Chapitre II : Modélisation des différents composants du système hybride

Figure II. 1 : Modèle électrique d'une cellule PV	26
Figure II. 2 : Simulation d'une cellule photovoltaïque.....	29
Figure II. 3 : Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule PV.	29
Figure II. 4 : Caractéristique I-V d'un module PV selon l'irradiation à TC = 25°C.....	30
Figure II. 5 : Caractéristique P-V d'un module PV selon l'irradiation à TC = 25°C.....	31
Figure II. 6 : Caractéristique I-V d'un module PV selon la température à G=1000Wh/m ²	32
Figure II. 7 : Caractéristique P-V d'un module PV selon la température à G=1000Wh/m ²	32
Figure II. 8 : Caractéristique I-V d'un champ PV selon l'irradiation à T = 25°C	33
Figure II. 9 : Caractéristique P-V d'un champ PV selon l'irradiation à T = 25°C.....	34
Figure II. 10 : Caractéristique I-V d'un champ PV selon la température à G=1000Wh/m ²	34
Figure II. 11 : Caractéristique P-V d'un champ PV selon la température à G=1000Wh/m ²	35
Figure II. 12 : Circuit électrique d'un hacheur boost.	35
Figure II. 13 : Onde de courant et tension de l'hacheur élévateur.....	36
Figure II. 14 : Schéma électrique d'un hacheur boost fermé.....	36
Figure II. 15 : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert.....	37
Figure II. 16 : Modèle de l'hacheur boost sous l'envi Matlab/Simulink.....	38
Figure II. 17 : Courant de sortie d'un hacheur boost.....	39
Figure II. 18 : Tension de sortie d'un hacheur boost.....	39
Figure II. 19 : Puissance de sortie d'un hacheur boost.....	39
Figure II. 20 : Schéma simplifié d'un système photovoltaïque à base d'un hacheur.	40
Figure II. 21 : Schéma de principe de la commande MPPT d'un système photovoltaïque.	41
Figure II. 22 : Schéma électrique de batterie.	42

Chapitre III : Simulation du système hybride

Figure III. 1 : Schéma de simulation de GPV.	49
Figure III. 2 : Courant de sortie du système (panneau hacheur).	50
Figure III. 3 : Tension de sortie du système (panneau hacheur).	50

Figure III. 4 : Puissance de sortie (panneau hacheur).	50
Figure III. 5 : Courant de la charge avec une variation de température de 50°C-25°C.....	51
Figure III. 6 : Tension de la charge avec une variation de température de 50°C - 25°C	51
Figure III. 7 : Puissance de la charge avec une variation de température de 50°C-25°C.....	52
Figure III. 8 : Courant de la charge avec un éclairnement variable de 200 à 1000W/m ²	52
Figure III. 9 : Tension de la charge avec un éclairnement variable de 200 à 1000W/m ²	53
Figure III. 10 : Puissance de la charge avec un éclairnement variable de 200 à 1000W/m ²	53
Figure III. 11 : Courant de la charge générée par système.	54
Figure III. 12 : Tension de la charge générée par système.	54
Figure III. 13 : Puissance de la charge générée par système.	55
Figure III. 14 : Principe de la méthode Inc-Cond	56
Figure III. 15 : Organigramme de la méthode Inc-Cond.....	57
Figure III. 16 : Organigramme de la méthode P&O[26].	58
Figure III. 17 : les deux Méthode MPPT (P&O et Inc-Cond).	59
Figure III. 18 : Diffèrent méthode MPPT P&O et Incrémental Conductance.	59
Figure III. 19 : Schéma de simulation de la batterie.	60
Figure III. 20 : Résultats de simulation de la batterie en cas de charge.	61
Figure III. 21 : Résultats de simulation de la batterie en cas de décharge.....	61
Figure III. 22 : Résultats de simulation de la batterie en cas de décharge.....	62
Figure III. 23 : La puissance sortie de la charge.	63
Figure III. 24 : La puissance sortie de GPV.....	63
Figure III. 25 : La puissance sortie de Batterie.....	63
Figure III. 26 : Etat de charge et décharge.....	64
Figure III. 27 : La Tension sortie de la charge.	65
Figure III. 28 : La Tension sortie de la GPV.....	65
Figure III. 29 : La Tension sortie de la batterie.....	66
Figure III. 30 : La courant sortie de la charge.	66
Figure III. 31 : La courant sortie de la GPV.	67
Figure III. 32 : La courant sortie de la batterie.	67

Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Comparatif des différents types de cellules-PV à base de silicium.....	7
Tableau I. 2: Comparatif pour quelques technologies.....	8
Tableau I. 3 : Tableau comparatif des caractéristiques principales pour les différentes technologies.	21
Tableau I. 4 : Les différents types de PAC.....	23
Tableau II. 1 : Paramètres du module photovoltaïque utilisés 1Soltech 1STH-215-P.....	30
Tableau III. 1 : Consommation journalière.....	47
Tableau III. 2 : Paramètres du panneau photovoltaïque.....	49
Tableau III. 3 : Paramètres de la Batterie.....	60

Liste de Abréviations :

<p>P_v : Photovoltaïque.</p> <p>ER : Energie Renouvelable.</p> <p>DC : Courant Continu (Direct).</p> <p>AC : Courant Alternative.</p> <p>PAC : Pile a Combustible.</p> <p>I_s : Courant de saturation inverse de la diode.</p> <p>R_s : Résistance en série.</p> <p>R_{sh} : Resistance Shunt.</p> <p>V : la tension.</p> <p>K_i : le coefficient de température de court-circuit.</p> <p>K_v : le coefficient de température en circuit ouvert.</p> <p>I_s : Courant de saturation inverse de la diode.</p> <p>I₀ : le courant de saturation.</p> <p>a : le facteur d'idéalité de la diode.</p> <p>G_n : l'irradiance solaire nominale</p> <p>K : Constant de Boltzmann, $K=1.3854.10^{23}$</p> <p>q : Constant de charge d'électron= $-1.602.10^{-19}$</p> <p>α : Facteur d'idéalité de la diode.</p> <p>T : Température de la jonction P-N.</p> <p>I_{cc} : courant de court-circuit.</p> <p>V_{co} : tension de circuit ouverte.</p> <p>V_T : La tension thermique.</p> <p>I_{pv} : courant génère crée par la cellule PV.</p> <p>I_{ph} : photo courant crée par la cellule.</p> <p>FF : Facteur de Forme.</p> <p>η : Rendement de Conversion.</p> <p>P_{in} : La Puissance lumineuse Incidente.</p> <p>G : Irradiation.</p>	<p>T : Température.</p> <p>P : Puissance.</p> <p>V : Tension.</p> <p>I : Courant.</p> <p>α : Rapport Cyclique.</p> <p>L : l'induction.</p> <p>C : Condensateur.</p> <p>V_{in} : La Tension d'entrée.</p> <p>V_{out} : La Tension de sortie.</p> <p>MPPT : Maximum pour point Tracking.</p> <p>PPM : Point de puissance Maximal.</p> <p>C_{bat} : La Capacité nominale de la batterie [Ah].</p> <p>DOD : La Capacité Nominale de la Batterie.</p> <p>SOC : State of Charge</p> <p>V_b : La Tension du Système.</p> <p>N_a : La nombre de jour d'autonomie.</p> <p>N_s : La nombre de module en série.</p> <p>N_p : La nombre de module en parallèle.</p> <p>P_c : puissance Crête du Champ PV.</p> <p>E_{bes} : Besoin journalière.</p> <p>E_{STC} : ensoleillement dans les conditions STC.</p> <p>STC : Standard Test Condition.</p> <p>E_{mes} : Ensoleillement du site d'installation.</p> <p>C_p : Facteur de correction applique pour tenir complet des différentes pertes.</p> <p>P₁ : puissance de panneau.</p> <p>N_t : numéro de panneau photovoltaïque.</p> <p>P&O : Perturbation et Observation.</p> <p>IncCond : incrémentation de la conductibilité.</p> <p>RC : La Résistance de Charge.</p>
--	--

Introduction Général

Introduction Général

La production d'énergie représente un défi majeur à l'avenir en raison de la demande croissante des sociétés industrialisées et des besoins croissants des pays en développement pour leur développement. Actuellement, une grande partie de l'énergie mondiale provient de sources fossiles, ce qui entraîne des émissions de gaz à effet de serre et une augmentation de la pollution. De plus, une surconsommation de ces ressources naturelles réduit dangereusement les réserves d'énergie pour les générations futures.

Les énergies renouvelables, telles que l'énergie solaire, éolienne, géothermique, hydraulique et la biomasse, sont des sources d'énergie provenant de ressources naturelles illimitées. Elles englobent diverses technologies en fonction de la source d'énergie exploitée et de l'énergie utile produite. La thèse en question se concentre sur la filière de l'énergie solaire photovoltaïque.

En effet sont en cours pour améliorer la compétitivité des panneaux solaires, tant en termes de rendement que de coût. Les matériaux utilisés dans leur fabrication sont en constante évolution, permettant ainsi d'obtenir des panneaux solaires de plus en plus efficaces. Cependant, le principal inconvénient de l'énergie solaire réside dans sa dépendance aux conditions climatiques. Par exemple, en hiver, pendant la nuit ou par temps pluvieux, la puissance fournie par les panneaux solaires est significativement réduite, Ce problème doit être pallié par l'installation d'un périphérique de stockage.

Les panneaux solaires photovoltaïques produisent de l'électricité à partir de la lumière du soleil, mais leur production peut varier en fonction des conditions météorologiques et de la disponibilité du soleil. Pour garantir un approvisionnement continu en électricité, surtout pendant les périodes de faible production solaire (manque de puissance), un système de stockage d'énergie est souvent utilisé en conjonction avec les panneaux solaires. Les accumulateurs lithium-ion sont des choix populaires pour le stockage de l'énergie solaire en raison de leur haute densité d'énergie, de leur longue durée de vie et de leur efficacité de charge/décharge élevée. Ils permettent de stocker l'électricité produite par les panneaux solaires pendant les périodes de production élevée et de la libérer lorsque la production solaire est insuffisante.

Nous avons divisé le travail en trois chapitres et chaque chapitre est complémentaire au suivant

Introduction Général

Le premier chapitre titré par l'état de l'art des systèmes hybrides des énergies renouvelables qui présente les différents sources utilisables, l'hybridation et le système de stockage.

En suit, le 2^{ème} Chapitre étude de modélisation de Panneau photovoltaïque, hacheur boost raccordé avec la commande MPPT et la modélisation de batterie.

Le dernier chapitre présente les résultats de la simulation de notre étude que nous avons interprétées et analysée, de sorte que nous avons fait chacun d'eux séparément (générateur PV, la commande MPPT, les batteries) puis nous les avons combinés en une seule chaine.



Chapitre I :

Etat de l'art des systèmes hybrides à énergies
renouvelables

I.1 Introduction

Dans cette état de l'art, nous examinerons les différentes sources d'énergie renouvelable disponibles, telles que l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la biomasse. Nous discuterons également des tendances actuelles en matière de recherche et de développement dans le domaine des énergies renouvelables, ainsi que des défis et des opportunités pour leur adoption et leur intégration à grande échelle dans les réseaux électriques existants.

Les systèmes hybrides à énergies renouvelables ont émergé comme une solution prometteuse pour fournir une alimentation électrique durable et stable, en combinant différentes sources d'énergie renouvelable. Ces systèmes offrent de nombreux avantages, notamment la réduction de la dépendance aux combustibles fossiles.

Dans ce chapitre nous avons fait une étude détaillée sur l'énergie solaire et leur système de conversion et le système de stockage et différents types de batterie avec leur principe de fonctionnement.

I.2 Définition d'énergies renouvelables

Les énergies renouvelables, également appelées énergies vertes, sont des sources d'énergie qui proviennent de ressources naturelles renouvelables et qui ne s'épuisent pas avec le temps. Contrairement aux énergies fossiles telles que le pétrole, le gaz naturel et le charbon, les énergies renouvelables sont produites à partir de ressources renouvelables telles que la lumière du soleil, le vent, l'eau, la biomasse et la chaleur de la terre. Ces sources d'énergie sont considérées comme durables et écologiques, car elles ne produisent pas de gaz à effet de serre ni d'autres polluants atmosphériques lorsqu'elles sont utilisées pour produire de l'électricité ou de la chaleur. Les technologies utilisées pour exploiter ces sources d'énergie renouvelable sont en constante évolution et comprennent notamment les panneaux solaires, les éoliennes, les turbines hydrauliques et les pompes géothermiques.

I.3 Description des différentes sources utilisables

I.3.1 L'énergie solaire

Un faisceau lumineux est un déplacement de petits corps porteurs d'énergie appelés photons, la lumière est décrite également comme une onde électromagnétique dont la longueur d'onde

s'étend de l'ultraviolet ($0.2 \mu\text{m}$) à l'infrarouge lointain ($3 \mu\text{m}$). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise.

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

Signalons que l'irradiation solaire dépend :

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

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

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

L'énergie d'un photon est donnée par la relation :

$$E = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (I.1)$$

Où :

h : la constante de Planck .

c : la vitesse de la lumière .

λ : la longueur d'onde .

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Cette découverte valut à Albert Einstein le prix Nobel en 1905[1].

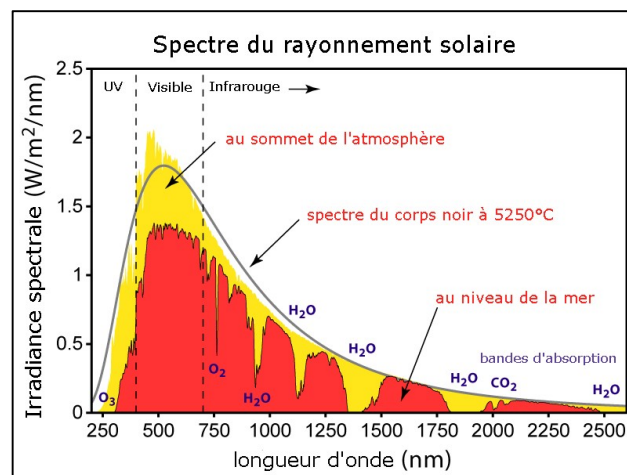


Figure I. 1 : Spectres Solaires

I.3.1.1 Système de conversion d'énergie photovoltaïque

La conversion de l'énergie photovoltaïque en énergie électrique dans un élément semi-conducteur a été découverte par le physicien français Alexander E en 1839[2].

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module photovoltaïque). Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée.



Figure I. 2 : cellule PV ; panneau PV et champ PV.

La conversion photovoltaïque aujourd'hui largement utilisée peut-être simplement définie comme la transformation de l'énergie des photons en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par la matière. Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement de la matière. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein de la matière se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique. Généralement, la paire électron-trou revient rapidement à l'équilibre en transformant son énergie électrique en énergie thermique. De même, toute l'énergie des photons n'arrivant pas à se transformer en électricité est absorbée par le matériau sous forme thermique. Le matériau constituant les capteurs PV a alors sa température interne qui augmente proportionnellement à l'énergie solaire reçue. L'effet thermique est donc majoritaire sur la plupart des capteurs détériorant d'autant plus les performances de ces derniers[1].

La cellule photovoltaïque est constituée de silicium de haute pureté. Sur le silicium, une jonction PN (Positive-Négative) s'est formée comme barrière potentielle. Les photons qui tombent sur la jonction PN provoquent l'apparition de paires de porteurs de charges électriques opposés (trou d'électrons) qui en raison de la présence de la jonction PN, sont séparés dans deux directions différents. Les électrons vont au semi-conducteur N et les trous vont au semi-conducteur P.

La tension va apparaître à la jonction. Du fait que les charges électriques séparées sont des porteuses redondantes, ayant ce que l'on appelle une durée de vie infinie et une tension de jonction PN constante, la jonction, sur laquelle la lumière tombe, agit comme une cellule électrique stable[2].

I.3.1.2 Les différentes technologies photovoltaïques

Il existe un grand nombre de technologies mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de développement. Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono ou poly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre Indium Sélénium).

I.3.1.3 La filière à base de silicium cristallin

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques disponibles à un niveau industriel. Le silicium est fabriqué à partir de sable quartzéux (dioxyde de silicium). Celui-ci est chauffé dans un four électrique à une température de 1700 °C. Divers traitements du sable permettent de purifier le silicium. Le produit obtenu est un silicium dit métallurgique, pur à 98% seulement. Ce silicium est ensuite purifié chimiquement et aboutit au silicium de qualité électronique qui se présente sous forme liquide, puis coulé sous forme de lingot suivant le processus pour la cristallisation du silicium, et découpé sous forme de fines plaquettes (wafers). Par la suite, ce silicium pur va être enrichi en éléments dopants (P, B) lors de l'étape de dopage, afin de pouvoir le transformer en semi-conducteur de type P ou N. La diffusion d'éléments dopants (bore, phosphore) modifie l'équilibre électronique de ces plaquettes (wafers), ce qui les transforme en cellules sensibles à la lumière.

Les cellules monocristallines et poly-cristallines sont fragiles. Elles sont donc placées entre deux plaques de verre (encapsulation) afin de former un module. Le matériau de base est le silicium qui est très abondant, mais la qualité nécessaire pour réaliser les cellules doit être d'une très grande pureté et son coût intervient de façon importante dans le coût de revient total.

A long terme, la technologie silicium a encore un grand rôle à jouer dans le développement Photovoltaïque. Cependant, elle ne sera pas la seule technologie employée. En effet, pour baisser les prix et rendre abordable cette énergie, plusieurs tentatives de nouveaux développements technologiques existent actuellement.

Il existe trois grands types de silicium : mono cristallin, poly cristallin et amorphe

Cellules monocristallines	Cellules poly-cristallines	Cellules amorphes
		
<p>Les panneaux PV avec des cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Son procédé de fabrication est long et exigeant en énergie ; plus onéreux, il est cependant plus efficace que le silicium poly cristallin. Du silicium à l'état brut est fondu pour créer un barreau. Lorsque le refroidissement du silicium est lent et maîtrisé, on obtient un monocristal. Un Wafer est alors découpé dans le barreau de silicium. Après divers traitements (traitement de surface à l'acide, dopage et création de la jonction P-N, dépôt de couche antireflet, pose des collecteurs), le wafer</p>	<p>Les panneaux PV avec des cellules poly-cristallines sont élaborés à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles nécessitent 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Le wafer est</p>	<p>Les modules photovoltaïques amorphes ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 8% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide. Le rendement de ces panneaux est moins bon que celui des technologies poly-cristallines ou monocristallines. Cependant, le silicium amorphe permet de produire des panneaux de grandes surfaces à bas coût en utilisant peu de matière première. Nota : En chimie,</p>

<p>devient cellule. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 12 à 18%, mais la méthode de production est laborieuse.</p>	<p>scié dans un barreau de silicium dont le refroidissement forcé a créé une structure polycristalline. Durée de vie estimée \approx 30 ans.</p>	<p>un composé amorphe est un composé dans lequel les atomes ne respectent aucun ordre à moyenne et grande distance, ce qui le distingue des composés cristallisés. Les verres sont des composés amorphes.</p>
---	---	---

Tableau I. 1 : Comparatif des différents types de cellules-PV à base de silicium.

I.3.1.4 Comparatif pour quelques technologies

Matériau	Rendement	Longévité	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium Monocristallin	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> • Très performant • Stabilité de production d'W • Méthode de production coûteuse et laborieuse. 	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium Poly-cristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	<ul style="list-style-type: none"> • Adapté à la production à grande échelle. • Stabilité de production d'W. • Plus de 50% du marché mondial. 	Modules pour toits, façades, générateurs...

Amorphe	5 à 8% (13% en laboratoire)	≤ 10 ans	Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. <ul style="list-style-type: none"> • Fonctionnement si faible luminosité. • Fonctionnement par temps couvert • Fonctionnement si ombrage partiel • La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois. 	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
Composite mono cristallin (GaAs)	18 à 20% (27.5% en laboratoire)		• Lourd, fissure facilement	Systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
Composite poly cristallin (CdS, CdTe, ClGS, etc.)	8% (16% en laboratoire)		Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), Intégration dans le bâtiment

Tableau I. 2: Comparatif pour quelques technologies[1]

I.3.2 Les énergies éoliennes

La première source possible est l'énergie du vent. Propre et renouvelable, elle est disponible en quantité abondante sur toute la surface de la planète. Son exploitation est devenue au cours des dernières années la principale source d'électricité d'origine renouvelable, hors énergie hydraulique, avec plus de 200 TWh produits dans le monde en 2008.

La transformation de cette énergie en électricité se fait grâce aux éoliennes, qui peuvent couvrir une large gamme de puissance selon les besoins et le type de génération choisi. Ainsi par exemple, les éoliennes offshore peuvent faire plusieurs dizaines de mètres de hauteur pour générer plusieurs MW (par exemple les M5000 conçues par Areva en 2013, produisant jusqu'à 5 MW pour une hauteur de mât de 130 m), ce qui en font des solutions intéressantes pour les relier à un réseau national. D'autres, ne dépassant pas la dizaine de mètres de hauteur, sont par contre plus adaptées à un usage domestique, tournant à proximité d'une habitation pour produire quelques centaines ou milliers de Watts. Elles doivent être installées dans des espaces dégagés pour améliorer leur production, mais surtout par mesure de sécurité. Elles ne sont donc pas forcément adaptées à un usage urbain ; mais sont parfaitement adéquates pour une structure isolée, comme une ferme, ou l'espace est disponible.

La turbine permet de convertir l'énergie cinétique extraite du vent en énergie électrique. La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne est convertie en énergie cinétique qui est transformée en énergie électrique.

Plusieurs structures d'éoliennes existent, qui sont à choisir selon la puissance à générer, la gamme de vitesses de vent considérée, et les dimensions désirées. Deux types d'architecture sont à distinguer[3].

I.3.2.1 Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical ; elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques.

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal (Fig.I,3) :

Amont : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

Aval : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable. La disposition turbine en amont est la plus utilisée car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction.

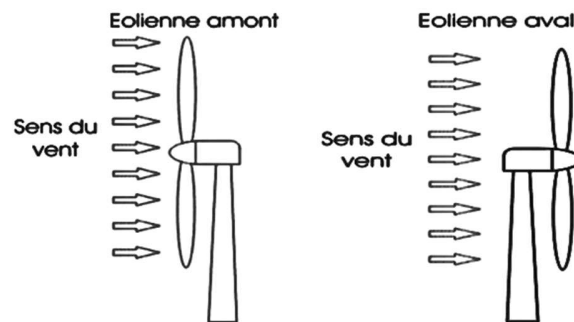


Figure I. 3 : Types d'éoliennes à axe horizontal.

I.3.2.2 Les éoliennes à axe verticales

Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur, etc.) au pied de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor. Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement car l'éolienne subit les turbulences du vent. De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal.

Les deux types des structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues reposent sur les principes de traînée différentielle ou de la variation cyclique d'incidence :

Le rotor de Savonius, dont le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes (Fig.I.4). Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble

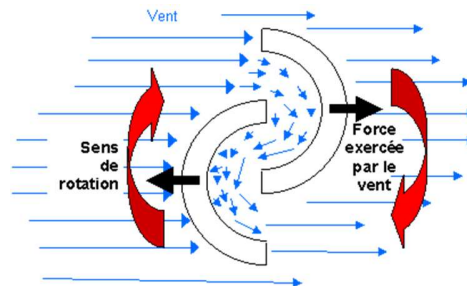


Figure I. 4 : Schéma de principe du rotor de Savonius.

Le rotor de Darrieus est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil, placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif (Fig.I.5) [4].

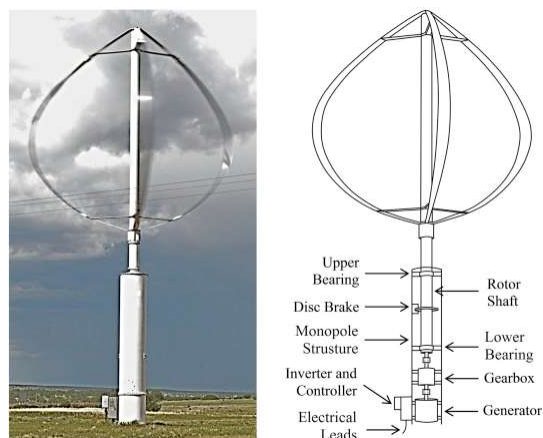


Figure I. 5 : Schéma du rotor de Darrieus.

I.3.2.3 Composants d'une éolienne

Une éolienne est composée classiquement de cinq parties :

- ✓ Une turbine éolienne, avec ses annexes mécaniques (régulation, sécurité, réduction), qui, lorsqu'elle est exposée à un vent de vitesse V v , tourne à la vitesse Ωt et fournit sur son arbre un couple de turbine Tt .

- ✓ Un générateur électrique qui transforme l'énergie éolienne (mécanique) en énergie électrique alternative.
- ✓ Un convertisseur qui est généralement placé entre le générateur électrique et la charge et qui adapte la forme de l'énergie électrique fournie par le générateur à ce qu'exige la charge.
- ✓ Un système de commande et de régulation qui assure la conversion optimale en régime stationnaire et, éventuellement en régime dynamique.
- ✓ Coté consommateur avec une charge alternative[3].

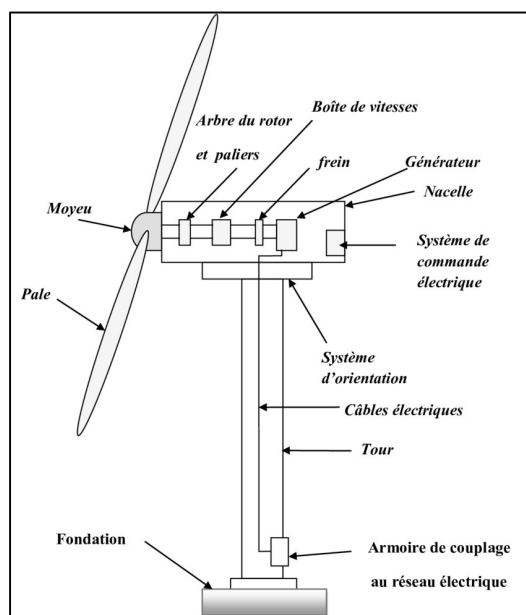


Figure I. 6 : Les constituants d'une éolienne.

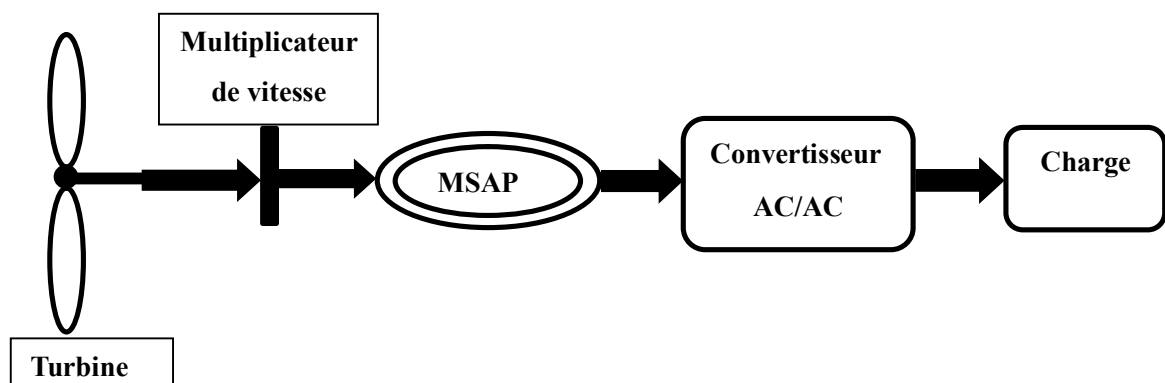


Figure I. 7 : Schéma d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne.

I.3.3 Energie hydraulique

L'énergie hydraulique : L'eau est également une source renouvelable puisqu'elle se régénère grâce au cycle d'évaporation et des précipitations. Sa force est connue et exploitée depuis des milliers d'années au travers des barrages, des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou le mouvement de l'eau. Les roues à aubes peuvent la transformer directement en énergie mécanique (moulin à eau), tandis que les turbines et les générateurs électriques la transforment en électricité[5].

I.3.4 Énergie marine

Les matériaux composites joueront un rôle essentiel dans le développement de systèmes de conversion d'énergie marine renouvelable, et pour cette application compte tenu des contraintes liées à la maintenance une excellente durabilité à long terme s'avère indispensable. On dispose d'une bonne expérience de ces matériaux en milieu marin, et pour des applications, telles les éoliennes, où ils sont soumis à un chargement cyclique, mais on ne trouve que très peu d'informations sur leur comportement sous sollicitation cyclique dans l'eau de mer. Cet article adresse cette lacune, et présente les résultats d'une étude du comportement sous chargement quasi-statique et cyclique de composites renforcés de différentes fibres de verre et sollicités dans l'eau de mer. Pour ces conditions de chargement couplé, le type de fibre, la résine et l'interface fibre/matrice influent tous sur la durée de vie[6].

I.3.5 L'énergie thermique des mers

C'est l'énergie liée au différentiel de température entre les eaux de surface et les eaux profondes. Elle est abondante, prévisible et disponible continuellement. Les océans captent l'énergie solaire et son absorption diminue avec la profondeur. Des volumes d'eaux profondes et de surface sont pompés pour exploiter le différentiel de température afin de produire de l'électricité. Ce procédé est intéressant quand la température de l'eau est à 4°C à une profondeur de 1 000 m tandis qu'elle est supérieure à 24°C en surface (soit un différentiel d'au moins 20° pour rentabiliser l'exploitation). Elle est exploitée par des centrales à cycle qui sont onéreuses à installer[7].

I.3.6 Energie éolienne offshore :

Les vents marins sont très soutenus et réguliers, l'exploitation de leur énergie par des éoliennes sur mer permet d'avoir des performances exceptionnelles. La production en mer présente deux avantages : une meilleure productivité et une réduction de l'impact visuel. En revanche, elle présente, comme les autres ressources marines, des difficultés technicoéconomiques liées au transport de l'électricité à terre vers les lieux de consommation. Pour cette raison, les éoliennes offshore sont généralement limitées à une distance de 40 km des côtes[8].

I.3.7 Energie marémotrice

La grande qualité de l'énergie marémotrice par rapport à toutes les énergies dites renouvelables, est la connaissance parfaite de sa disponibilité sans aléas hors l'indisponibilité technique de certaines de ses machines. En effet, l'énergie marémotrice dépend d'une part, des positions relatives de la Terre, de la Lune et du Soleil et d'autre part, de la bathymétrie des fonds marins du site de l'installation. Les positions des trois astres sont bien connues et prévisibles à l'échelle des temps astronomiques ; la topographie et la bathymétrie d'un site côtier sont immuables pour un temps que l'on peut qualifier de géologique[9].

I.3.8 Energie hydrolienne

Les hydroliennes sont des turbines installées dans un courant d'eau (fleuve, fonds marins...) afin de récupérer une part de leur énergie cinétique. Le concept en lui-même n'est pas totalement nouveau, mais il représente une des sources d'énergie renouvelable qui a encore besoin d'études exploratoires[10].

I.3.8.1 Fonctionnement d'un ouvrage hydroélectrique

L'aménagement hydroélectrique comporte principalement :

- ✓ Une prise d'eau sert à créer une chute d'eau importante et un réservoir de stockage de l'eau, ce qui permet à la centrale de continuer à fonctionner, même en période de basses eaux.
- ✓ Un canal de dérivation prélève l'eau. Il peut être un canal à ciel ouvert, une galerie souterraine ou une conduite. Certaines centrales de basse chute n'en utilisent pas de canal de dérivation.

- ✓ La centrale, appelée aussi usine. C'est là que la chute d'eau fait tourner une turbine qui entraîne le générateur d'électricité (un alternateur).

I.3.8.2 Contexte hydraulique favorable

Le principe de l'hydroélectricité est de capter l'énergie hydraulique d'un cours d'eau et de la convertir en énergie mécanique puis électrique. La puissance hydraulique disponible d'un cours d'eau est donc proportionnelle à :

- ✓ La dénivellation -ou pente- du cours d'eau ou de la chute d'eau.
- ✓ Le débit du cours d'eau ou de la chute[8].

I.3.9 Energie de la biomasse

L'énergie de la biomasse, ou bioénergie, est l'énergie qui est extraite des matières organiques non fossiles comme le bois, la paille, les huiles et les déchets végétaux des secteurs forestiers, agricole et industriel. Tout comme l'énergie des combustibles fossiles, la bioénergie provient de l'énergie solaire emmagasinée dans les plantes par la photosynthèse. La principale différence entre les deux formes d'énergie tient au fait que les combustibles fossiles ne sont transformables en énergie utilisable qu'après des milliers d'années, alors que l'énergie de la biomasse bien gérée est renouvelable et peut être utilisée de façon continue. La biomasse se présente sous forme solide, liquide ou gazeuse et peut servir à de nombreuses applications. À l'heure actuelle, l'énergie de la biomasse provient en très grande partie des solides (copeaux, sciure, granulats, charbon, ordures ménagères) et des liquides (lessives de cuisson) provenant de la cuisson du bois dans l'industrie papetière.

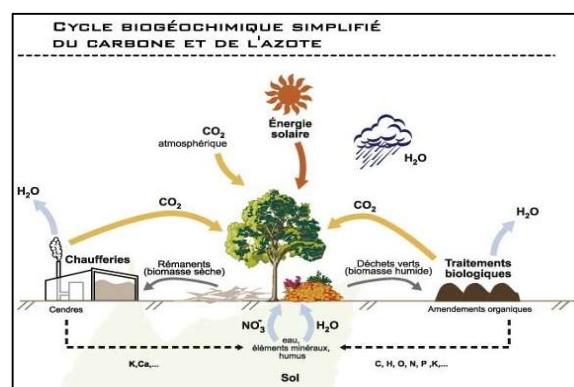


Figure I. 8 : Bilan de cycle biomasse.

I.3.9.1 Types de biomasse

Les chercheurs caractérisent les divers types de biomasses de différentes manières mais une méthode simple est de définir quatre types principaux, à savoir :

- ✓ Plantes de type (bois).
- ✓ Plantes herbacées.
- ✓ Plantes aquatiques.
- ✓ Engrais ou fumiers.

Les ressources en biomasse peuvent être classées en plusieurs catégories, selon origines :

- ✓ Le bois, la principale source d'énergie de la biomasse aujourd'hui. Des exemples de résidus forestiers (tels que les arbres morts, les branches et les souches d'arbres), des coupures de cour, des copeaux de bois et de déchets solides.
- ✓ Usine de biomasse ou de matières animales qui peuvent être converties en fibres ou d'autres produits chimiques industriels, y compris le bio-carburant comprend également.

Les déchets organiques tels que les déchets urbains comprenant les boues d'épuration, ordures ménagères, et les déchets en provenance de l'agriculture tels que les effluents agricoles[11].

I.4 Définition de l'hybridation

Un système hybride dans les énergies renouvelables, est composé par le couplage de plusieurs sources d'électricité, au moins une seule d'origine renouvelable ainsi la combinaison de ces flux énergétiques avec un dispositif de stockage.

Les systèmes d'énergies hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées. Les systèmes hybrides à énergies renouvelables sont fiables, sans pollution et répondent à la demande d'énergie sur de longues périodes.

Afin, de pouvoir répondre aux exigences du côté consommation, ainsi la satisfaction du besoin énergétique d'une façon complète pour la charge. Un système de stockage (batterie, super condensateur, pile à combustible...). Est nécessaire pour emmagasiner le surplus d'énergie

produite, ainsi permettre leur utilisation lors d'une insuffisance de puissance électrique générée par la source à l'entrée du système.

Le but du système hybride est d'assurer l'énergie demandée par la charge et, si possible, de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable, tout en maintenant la qualité d'énergie fournie.

Le système hybride à énergies renouvelables que nous allons étudier dans notre travail, se compose à la fois d'une source photovoltaïque avec un stockage en utilisant des batteries.

I.5 Les types de bus commun

I.5.1 Le couplage DC

Dans l'architecture suivante (fig.I.9), les sources de production sont toutes connectées au bus à courant continu (DC) par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance.

Le cas des sources de productions d'énergie à courant alternatif, l'utilité d'un redresseur (AC/DC) pour redresser la tension. L'aérogénérateur avant d'être lié au bus continu, un convertisseur (AC/DC) doit être placé avec le bus. Par contre les sources à courant continu (PV, batterie) sont reliées à des hacheurs (DC/DC) afin d'agir sur la tension d'entrée ou de la réduire selon la tension du bus et pour gérer le flux d'énergie produit.

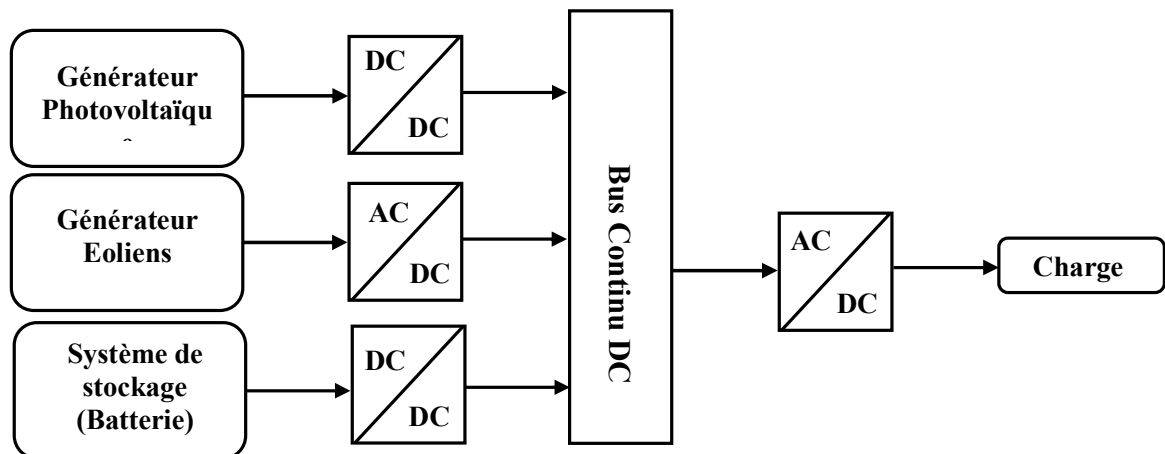


Figure I. 9 : Architecture d'un système hybride à bus continu (DC).

I.5.2 Le couplage AC

Dans La forme suivante, les éléments du système hybride sont reliés à une charge alternative dans notre cas, comme la montre là (fig.I.10). Cette architecture se diffère par

rapport à la configuration précédente, dans la possibilité de synchronisation de chaque convertisseur avec le générateur pour alimenter la charge indépendamment et en parallèle avec les autres convertisseurs ce qui rends les sources flexibles, et permet de satisfaire la charge désirée.

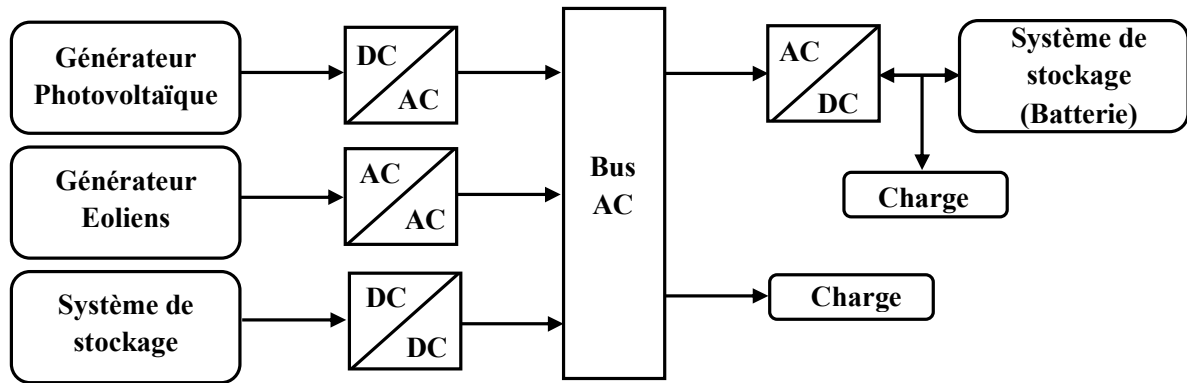


Figure I. 10 : Architecture d'un système hybride à bus alternatif (AC).

Le couplage AC/DC

La (fig.I.10) représente la structure à bus mixte, d'un système hybride. Dans cette structure, les sources d'énergie peuvent alimenter une charge alternative (AC) ou une charge continue (DC) par l'intermédiaire d'un convertisseur bidirectionnel qui réalise la conversion continue-alternative et alternative-continue[3].

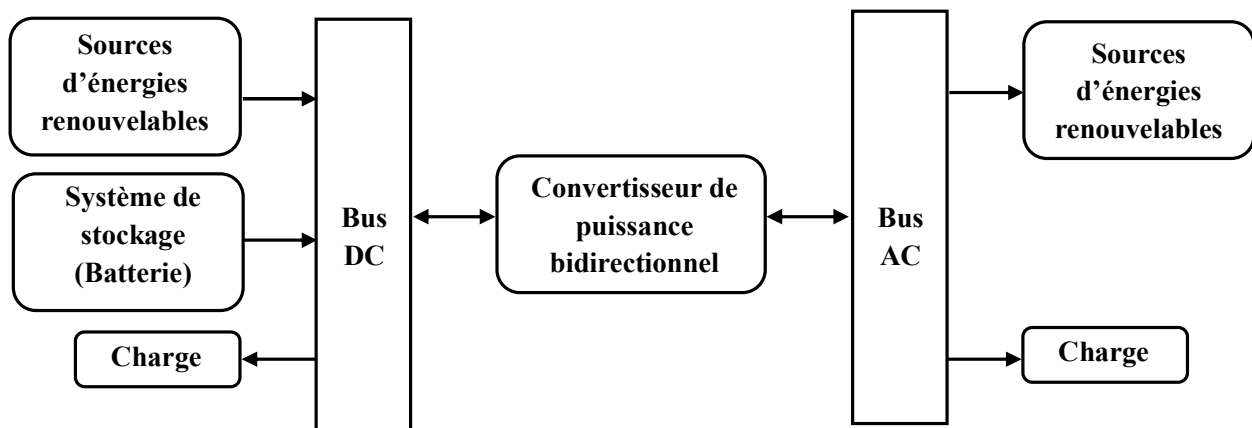


Figure I. 11 : Configuration du système hybride à bus mixte (AC/DC).

I.6 Batteries de stockage

La batterie c'est un ensemble de cellules électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la restituer partiellement par la suite grâce à la

réversibilité des réactions mises en jeu. Ces réactions consistent en désoxydation et des réductions (oxydoréductions en abrégé, soit perte ou gain d'un ou plusieurs électrons) au niveau des électrodes, le courant circulant sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit raccordé à la batterie.

I.6.1 Différents types de batteries

I.6.1.1 Lithium-Ion (Li-ion)

Ces batteries ont une « densité énergétique » bien supérieure à celles des types NiCd et NiMH, ce qui permet une importante miniaturisation à autonomie égale. Leur taux d'autodécharge est très inférieur, de sorte qu'elles se déchargent peu en cas de stockage. Ce type de batterie peut être rechargé à tout moment, même après décharge partielle, sans incidence sur la capacité. Les batteries Lithium-Ion sont aussi moins nocives pour l'environnement que les autres types. La technologie Lithium-Ion a donc de gros avantages. Elle est toutefois plus onéreuse par rapport aux types NiCd et NiMH. Les matériaux entrant dans la fabrication de ces batteries sont moins polluants que ceux des batteries NiCd, ce qui ne dispense pas d'une mise au rebut responsable, bien sûr.

I.6.1.2 Nickel métal-hydrure (NiMH)

Par rapport à la batterie NiCd, ce type de batterie a une « densité énergétique » supérieure qui lui assure une plus grande autonomie. Comme les batteries NiCd, les batteries NiMH ne doivent être rechargées qu'une fois complètement déchargées. Toutefois, en cas de rechargement prématuré, la perte de capacité (perte d'autonomie) est moindre. Les batteries NiMH ont le plus haut taux d'autodécharge, ce qui veut dire qu'elles perdent rapidement leur charge en cas de stockage. Ce type de batterie doit être chargé avant stockage. Les matériaux entrant dans la fabrication de ces batteries sont moins polluants que ceux des batteries NiCd, ce qui ne dispense pas d'une mise au rebut responsable, bien sûr.

I.6.1.3 Nickel Cadmium (NiCd)

Longue durée de vie, si l'entretien de la batterie est correct. Les batteries NiCd ne doivent être rechargées qu'une fois complètement déchargées, sous peine d'en réduire la capacité (réduction d'autonomie entre deux charges). C'est le type de batterie le plus robuste et fiable, tout particulièrement par temps chaud et froid. C'est aussi le type qui délivre le plus de puissance, chose bien utile par exemple au démarrage ou pour un travail intensif. Les batteries NiCd ont un

taux élevé d'autodécharge, ce qui veut dire qu'elles perdent leur charge en cas de stockage. Ce type de batterie doit être chargé avant stockage. Le cadmium étant un matériau polluant, la mise au rebut doit être faite de manière responsable[12].

I.6.2 Le principe de fonctionnement d'une batterie

Le principe de fonctionnement d'une batterie repose sur une réaction chimique électrochimique qui produit un flux d'électrons, générant ainsi une différence de potentiel électrique entre les bornes de la batterie. Cette différence de potentiel est appelée tension électrique et elle est mesurée en volts.

Une batterie est composée de deux électrodes, une cathode et une anode, et d'un électrolyte qui permet la circulation des ions entre les deux électrodes. Lorsque la batterie est connectée à un circuit électrique, les électrons circulent de l'anode vers la cathode à travers le circuit, tandis que les ions se déplacent dans l'électrolyte pour maintenir l'équilibre électrique.

Lorsque la batterie est déchargée, les ions et les électrons sont tous concentrés dans la cathode, ce qui crée une différence de potentiel électrique. Lorsque la batterie est connectée à un circuit, les électrons sont alors forcés de circuler vers l'anode, fournissant ainsi une source d'énergie électrique pour le circuit.

Lorsque la batterie est chargée, un courant électrique est appliqué dans le sens inverse pour forcer les ions à se déplacer de la cathode vers l'anode, ce qui rétablit l'équilibre électrique et stocke de l'énergie chimique dans la batterie.

Les batteries peuvent être fabriquées à partir de différents matériaux, tels que le plomb, le lithium, le nickel et le cadmium, et leur performance et leur durée de vie varient en fonction du type de matériau utilisé et de la conception de la batterie.

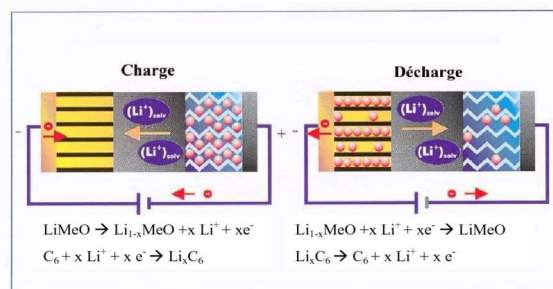


Figure I. 12 : mécanisme de charge et décharge dans les batteries lithium-ion.

I.6.3 Comparaison des caractéristiques des batteries électrochimiques :

Les principales caractéristiques sont résumées dans le tableau :

		Batteries			
		Pb-O ₂	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion
Densité énergétique (Wh/kg)		15-40	45-80	60-120	110-160
Profondeur de décharge		80%	80%	80%	80%
Tolérance à la surcharge		Oui	Moyenne	Très faible	Nulle
Autodécharge par mois		5%	20%	30%	10%
Voltage nominal d'une cellule		2V	1.2V	1.2V	3.6V
Plage de température de fonctionnement	En charge	10 à 40°C	0 à 40°C	0 à 40°C	0 à 40°C
	En décharge	-20 à 60 °C	-40 à 60 °C	-20 à 60 °C	-20 à 60 °C
Commercialisé depuis		1970	1950	1960	1991

Tableau I. 3 : Tableau comparatif des caractéristiques principales pour les différentes technologies[13].

I.7 Pile à combustible

Une pile à combustible est une pile dans laquelle la génération d'une tension électrique se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur (par exemple l'hydrogène) couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que l'oxygène de l'air.

Les piles à combustible sont des moyens de production de l'énergie électrique, considérées comme des sources d'énergie de par leur grande densité d'énergie. Le diagramme de Ragone présenté par la figure permettant de comparer les performances énergétiques de différents dispositifs. Ce dernier montre que les piles à combustible présentent les densités d'énergie les plus élevées par rapport aux autres dispositifs[12].

I.7.1 Principe de fonctionnement d'une pile à combustible

Une pile à combustible est un dispositif de conversion d'énergie qui convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique sans aucun processus thermique ou mécanique fig 1.1. L'énergie est produite quand l'hydrogène réagit chimiquement avec l'oxygène de l'air. Dans

un moteur à combustion interne, lorsque la réaction se produit, l'énergie est relâchée sous forme de chaleur, dont une partie peut effectuer un travail utile en poussant un piston. Dans une pile à combustible, la réaction est électrochimique et produit de l'énergie électrique et de la chaleur. L'énergie électrique peut être employée pour effectuer le travail utile directement tandis que la chaleur est soit gaspillée soit employée par ailleurs.

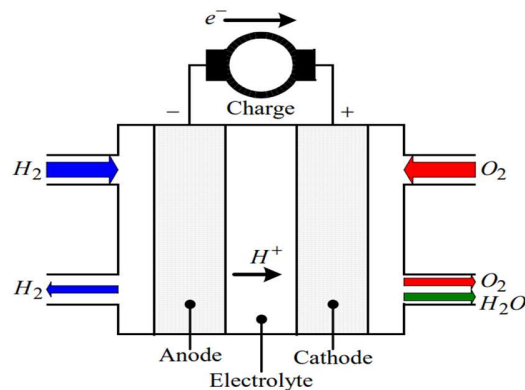


Figure I. 13 : Fonctionnement de principe d'une pile à combustible

Une caractéristique fondamentale des piles à combustible est que la charge électrique détermine le taux de consommation d'hydrogène et d'oxygène. Les gaz sont fournis, à l'anode pour l'hydrogène et à la cathode pour l'oxygène. Ainsi, la structure d'une pile à combustible comporte des arrivées de gaz des deux côtés de l'électrolyte. Les électrolytes peuvent être liquides ou solides, certains fonctionnent à haute température, d'autres à basse température. Les piles à combustible fonctionnant à basse température tendent à exiger des catalyseurs en métal noble, typiquement du platine, destiné à améliorer les réactions aux électrodes. La plupart des piles à combustible destinées aux applications automobiles emploient un électrolyte solide à basse température qui conduit des ions d'hydrogène.

En principe, une pile à combustible peut fonctionner en utilisant une variété de carburants et d'oxydants. L'hydrogène a été reconnu comme le carburant le plus efficace parce qu'il a une plus haute réactivité électrochimique que les autres carburants, tels que les hydrocarbures ou les alcools. Et l'oxygène est l'oxydant par excellence en raison de sa haute réactivité et son abondance dans l'air[14].

I.7.2 Différents types de piles à combustible

Le tableau suivant représenté les différents types des piles à combustible :

Acronyme	Nom	Température de fonctionnement	Electrolyte
PEMFC	Electrolyte Membrane Fuel Cell	50-80°C	Polymère
HT-PEMFC	High Temperature PEMFC	120-180°C	Polymère
DMFC	Direct Methanol Fuel cell	25-50°C	Polymère
DCFC	Direct Ethanol Fuel Cell	25-50°C	Polymère
SOFC	Solid Oxide Fuel Cell	700-1000°C	Céramique
MCFC	Molten Carbonate Fuel Cell	650°C	Liquide
PAFC	Phosphoric Acid Fuel Cell	150-200°C	Liquide
AFC	Alkaline Fuel Cell	60-120°C	Liquide

Tableau I. 4 : Les différents types de PAC.

I.7.3 Pile à combustible de type à membrane échangeuse de protons (PEMFC)

La pile à combustible de type PEM est actuellement le type le plus prometteur de piles à combustible pour les applications automobiles et a été utilisée dans la majorité des prototypes construits. Dans cette thèse, nous nous intéressons exclusivement à ce type de pile à combustible. La structure d'une cellule de pile à combustible de type PEM est représentée dans la figure (I.13). Se déplaçant dans la direction de x, les gaz viennent de canaux gravés dans des plaques bipolaires (épaisseur 1-5 millimètres). De la vapeur d'eau est ajoutée aux gaz pour humidifier la membrane. Les couches de diffusion (100-500 micromètres) assurent une bonne distribution des gaz aux couches de réaction (5-50 micromètres). Ces couches constituent les électrodes de la cellule où des particules de platine, qui jouent le rôle du catalyseur, ont été déposées dans un support carbone sur la membrane[12].

I.8 Conclusion

En conclusion, les systèmes hybrides à énergies renouvelables et les systèmes de stockage d'énergie sont des solutions innovantes et prometteuses pour répondre aux défis actuels de la production d'électricité à partir de sources d'énergie renouvelable. Ils peuvent aider à améliorer

Chapitre I Etat de l'art des systèmes hybrides à énergies renouvelables

l'efficacité, la fiabilité et la durabilité des réseaux électriques tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre.

Dans le chapitre suivant nous verrons une modélisation détaillée de la chaîne qui nous avons étudiée sur le générateur PV et l'hacheur élévateur boost ainsi que les batteries.



Chapitre II :

Modélisation des différents composants du système hybride

II.1 Introduction

L'énergie solaire est une source d'énergie dont la disponibilité varie considérablement dans la journée. Son utilisation de façon optimale nécessite la prise en compte des types de charges (batteries, lampes, etc.). Dans cette optique, on utilise un convertisseur boost afin de maximiser la production et l'utiliser de façon optimale. L'objectif de ce travail est de présenter une meilleure conception d'un convertisseur boost capable de rechercher la puissance maximale quelles que soient les variations de l'ensoleillement. Afin de juger de l'efficacité du convertisseur boost proposé, nous avons d'abord modélisé et simulé sous Simulink un champ photovoltaïque (PV) directement connecté à une charge. Ensuite la modélisation et la simulation ont été effectuées avec le champ PV connecté à une charge par l'interface du boost.

Dans ce chapitre, nous avons modélisé chaque composant de notre étude GPV avec les batteries, Avec une idée générale sur la commande MPPT.

II.2 Modélisation du générateur PV

II.2.1 Modèle d'une cellule photovoltaïque

On appelle cellule solaire un convertisseur qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque[15].

Le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque est présenté dans la (fig.II.1). Il inclut une source de courant, une diode, une résistance série et une résistance shunt.

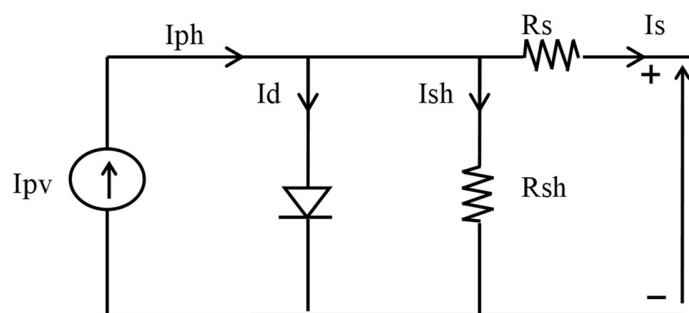


Figure II. 1 : Modèle électrique d'une cellule PV.

En se basant sur le circuit, le courant généré par la cellule pourra être présenté par l'équation suivante.

$$I_{PV} = I_{Ph} - I_0 \left(\exp \frac{q(V + R_s \cdot I_s)}{aV_T} - 1 \right) - \frac{(V + R_s \cdot I_s)}{R_{sh}} \quad (II.1)$$

I_s : Courant de saturation inverse de la diode.

I₀ : le courant de saturation.

a : le facteur d'idéalité de la diode.

Les expressions du photo-courant et du courant de saturation sont données par les équations :

$$I_{PH} = (I_s + K_i dT) \frac{G}{G_n} \quad (II.2)$$

$$I_0 = \frac{I_{cc} + K_i dT}{\exp \left[\frac{V_{CO} + K_v dT}{aV_t} \right] - 1} \quad (II.3)$$

K_i : le coefficient de température de court-circuit.

K_v : le coefficient de température en circuit ouvert.

G_n : l'irradiance solaire nominale[16].

II.2.2 Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les grandeurs caractéristiques principales d'une cellule photovoltaïque sont :

II.2.2.1 Courant de court-circuit

Le courant de court-circuit est le courant débité par la cellule sous éclairage en court-circuitant la sortie. C'est à dire que : $I_{cc} = I(V=0)$

Pour une cellule solaire idéale le courant de court-circuit est égal au courant de photo-génération I_{ph} .

II.2.2.2 Tension de circuit ouvert

La tension de circuit ouvert est la différence de potentiel mesurée aux bornes de la cellule lorsque la sortie est en circuit ouvert. C'est à dire : $V_{co} = V(I=0)$

Pour une cellule solaire idéale la tension de circuit ouvert est donnée par :

$$V_{co} = V_T \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_S} + 1 \right) \quad (II.4)$$

V_T : La tension thermique.

II.2.2.3 Facteur de forme

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (P_{max}) pour un point de fonctionnement $P_{max}(I_{max}, V_{max})$ de la courbe courant-tension (Fig.II.3). Le facteur de forme est défini par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{co} \cdot I_{CC}} = \frac{V_{max} \cdot I_{max}}{V_{co} \cdot I_{CC}} \quad (II.5)$$

II.2.2.4 Rendement de conversion

Le rendement η des cellules solaires désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} .

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = FF \frac{V_{co} \cdot I_{CC}}{P_{in}} \quad (II.6)$$

Où est la puissance incidente de la lumière est égale à la puissance solaire $P_{solaire}$ ($P_{solaire} = 1000 \text{mW/cm}^2$)

Pour améliorer ce rendement, il faut augmenter le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert.

II.2.3 Simulation d'une cellule photovoltaïque

Nous avons présenté une simulation de la cellule solaire pour MATLAB :

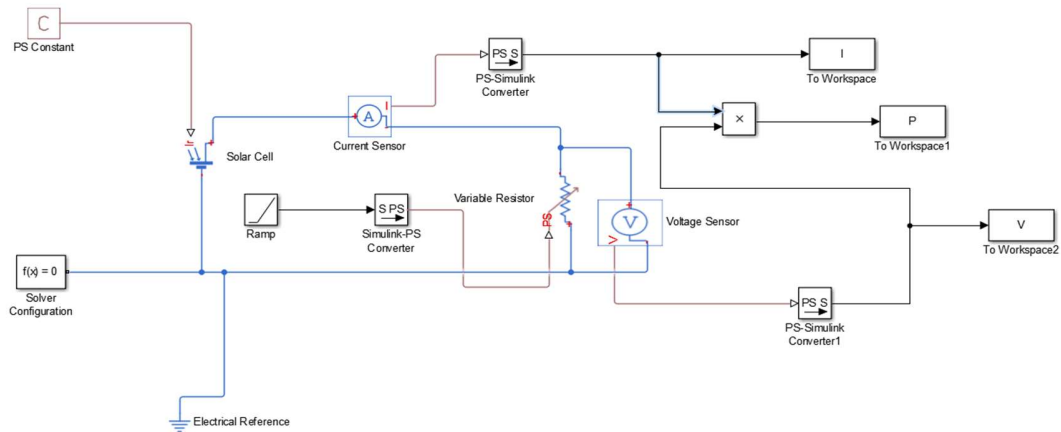


Figure II. 2 : Simulation d'une cellule photovoltaïque

II.2.4 Caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

La modélisation mathématique d'une cellule nous permet d'obtenir les différentes caractéristiques qui montrent l'influence de l'irradiation sur le courant, la tension et la puissance d'une cellule.

A température et éclairage constants, le rendement d'une cellule solaire dépend de la charge dans le circuit électrique. En circuit ouvert ($R_c = \infty$, $I = 0$, $V = V_{co}$), ou en court-circuit ($R_c = 0$, $I = I_{cc}$, $V = 0$), aucune énergie n'est transmise à l'extérieur. Entre ces deux extrêmes, il existe une valeur optimale R_{opt} de la résistance de charge R_c pour laquelle la puissance fournie par la cellule solaire à la résistance de charge est maximale notée P_{max} (fig II.3)[17].

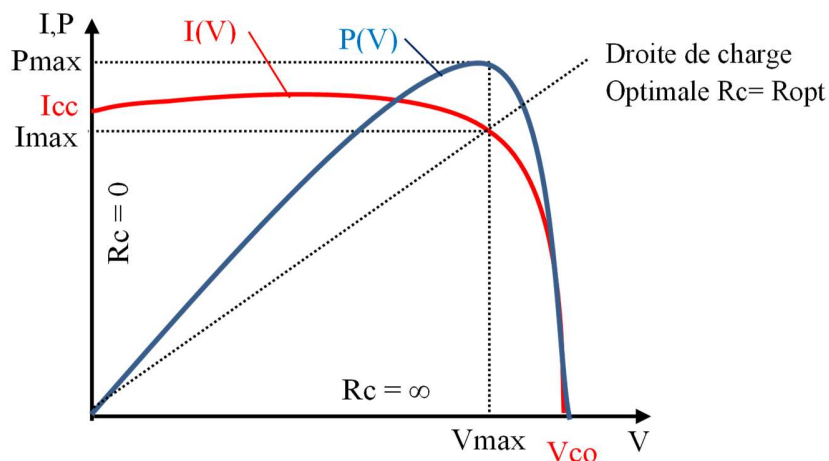


Figure II. 3 : Caractéristiques I(V) et P(V) d'une cellule PV.

II.2.5 Modèle du module photovoltaïque

Le tableau II.1 montre les paramètres du module photovoltaïque monocristallin choisi pour notre étude :

Paramètres	Valeurs
Puissance Maximal (Pmax)	213.5
Tension à Puissance Maximal (Vmax)	29
Courant à Puissance Maximum (Amax)	7.35
Tension Circuit Ouvert (Voc)	36.3
Courant Circuit Court (Icc)	7.84
Cellules par module (Ncellule)	60
Coefficient de température de Voc (%/deg.C)	-0.36099
Coefficient de température d'Isc (%/deg.C)	0.102
Courant généré par la lumière IL (A)	7.8649
Courant de saturation des diodes I0 (A)	2.9259×10^{-10}
Facteur d'idéalité α	0.98117
Résistance série R	313.3991
Résistance parallèle Rsh	0.39383

Tableau II. 1 : Paramètres du module photovoltaïque utilisés 1Soltech 1STH-215-P.[18]

II.2.5.1 Influence de l'irradiation

En variant l'irradiation, les courbes de ($I_{pv} = f(V_{pv})$) et ($P_{pv} = f(V_{pv})$) du module PV pour une température constante $T = 25^\circ\text{C}$ sont représentées respectivement sur les (fig.II.4)- (fig.II.5)[13].

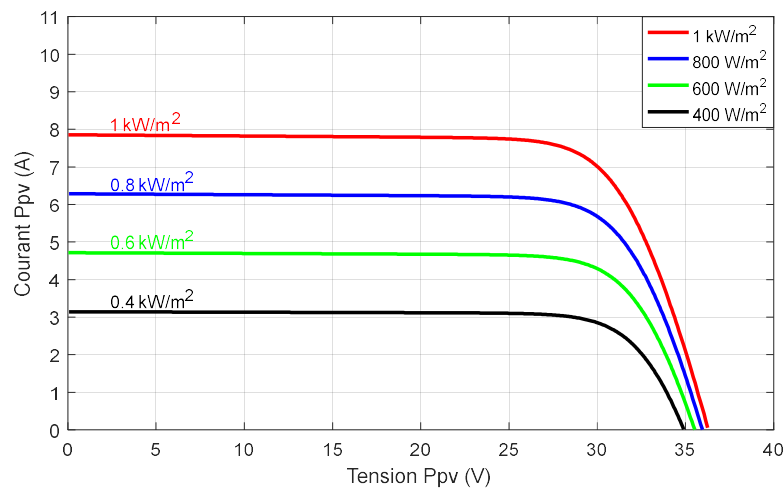


Figure II. 4 : Caractéristique I-V d'un module PV selon l'irradiation à $TC = 25^\circ\text{C}$

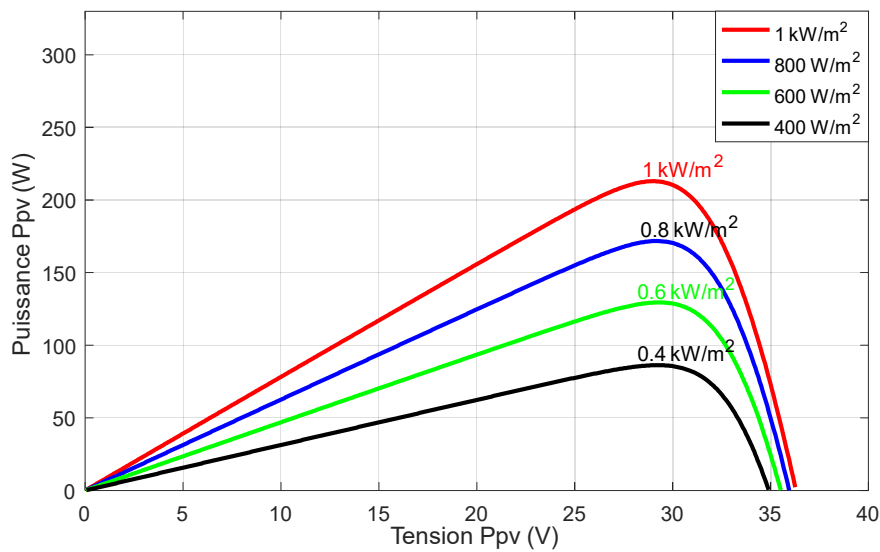


Figure II. 5 : Caractéristique P-V d'un module PV selon l'irradiation à TC = 25°C

On Remarque 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, elle reste quasiment identique même à faible éclaircissement.

Pour un éclaircissement constant $E=1000W/m^2$, on varie la température afin de voir l'influence de celui-ci par rapport aux caractéristiques du générateur PV. En faisant varier la température ambiante entre $0c^\circ$ et $50c^\circ$. Les caractéristiques Courant –Tension et Puissance-Tension sont données par le des deux (fig.II.4) et (fig.II.5).

On remarque que l'augmentation de la température fait diminuer la tension du circuit ouvert de générateur PV, contrairement au courant de court-circuit qui reste constant. La puissance du générateur PV est diminuée aussi pour une augmentation de la température[18].

II.2.5.2 Influence de la température

En faisant varier la température entre $25^\circ C$ et $55^\circ C$, les caractéristiques ($I_{pv}=f(V_{pv})$) et ($P_{pv}=f(V_{pv})$) du module PV sont données par les (fig.II.6) et (fig.II.7) respectivement[13].

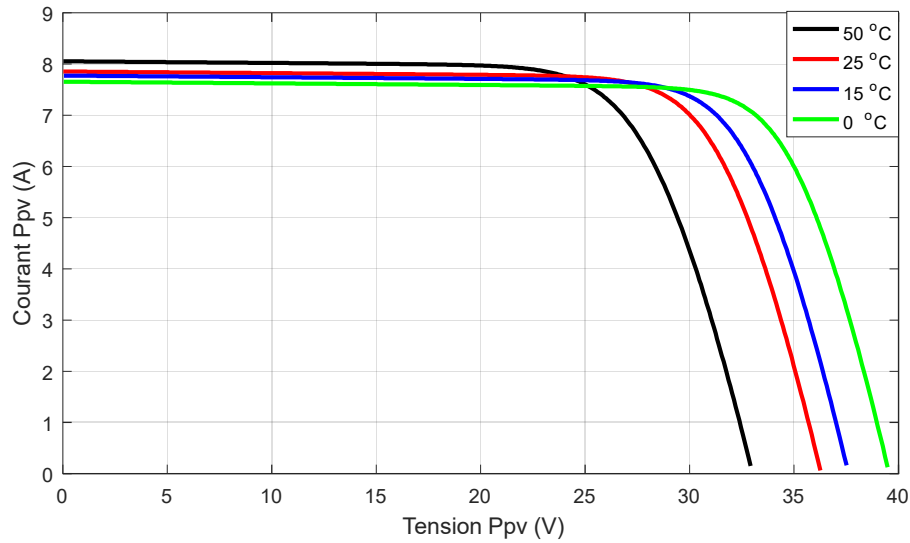


Figure II. 6 : Caractéristique I-V d'un module PV selon la température à $G=1000\text{Wh/m}^2$

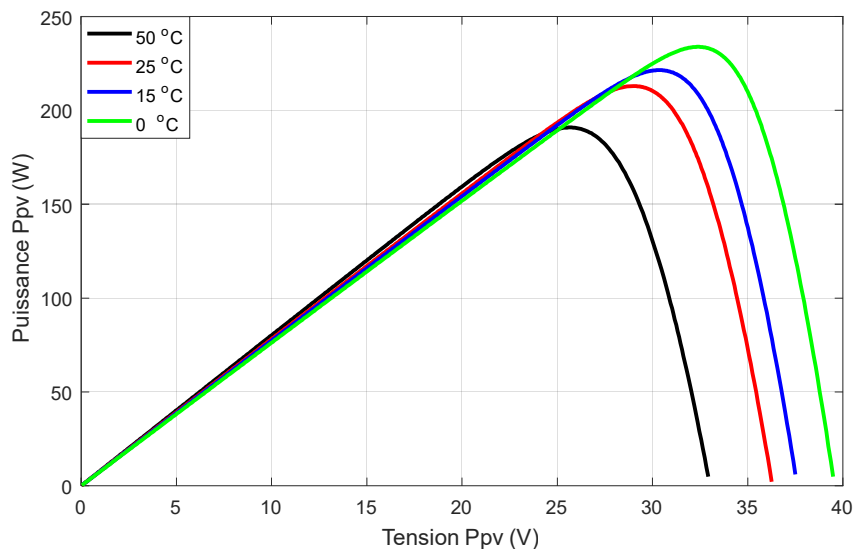


Figure II. 7 : Caractéristique P-V d'un module PV selon la température à $G=1000\text{Wh/m}^2$

A partir les deux (fig.II.6) et (fig.II.7), on peut observer que la caractéristique Ppv (Vpv) change considérablement avec la variation du niveau d'ensoleillement ; alors que le changement est assez négligeable lors de la variation de la température. Ceci s'explique par le fait que le courant varie considérablement avec la variation de l'irradiation ; alors que la tension varie peu. Par contre, cette dernière varie beaucoup, quand la température varie[18].

II.2.6 Caractéristique de champ PV

Les puissances demandées par les charges couramment utilisées nécessitent conjointement des tensions supérieures à celle que peuvent fournir les modules photovoltaïques, il faut donc envisager des groupements. Pour cela les modules sont assemblés pour donner un champ photovoltaïque.

L'équation de la caractéristique tension-courant du champ PV est donnée par l'équation (II.7).

$$I = N_{sh}I_{PH} - N_{sh}I_0 \left[\exp \left(\frac{V + \left(\frac{R_s N_s}{N_{sh}} \right) I}{aV_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + \left(\frac{R_s N_s}{N_{sh}} \right) I}{\frac{R_{sh} N_s}{N_{sh}}} \quad (II.7)$$

II.2.6.1 Influence de l'irradiation

En faisant varier l'irradiation entre 400 Wh/m² et 1000 Wh/m² avec un pas de 200, les caractéristiques (I_{pv}=f(V_{pv})) et (P_{pv}=f(V_{pv})) du champ PV sont données par les (fig.II.8) et (fig.II.9) respectivement. On remarque 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, elle reste quasiment identique même à faible irradiation. L'irradiation standard, internationalement acceptée, pour mesurer la réponse des modules PV est une intensité rayonnante de 1000 Wh/m² est une température de 25°C

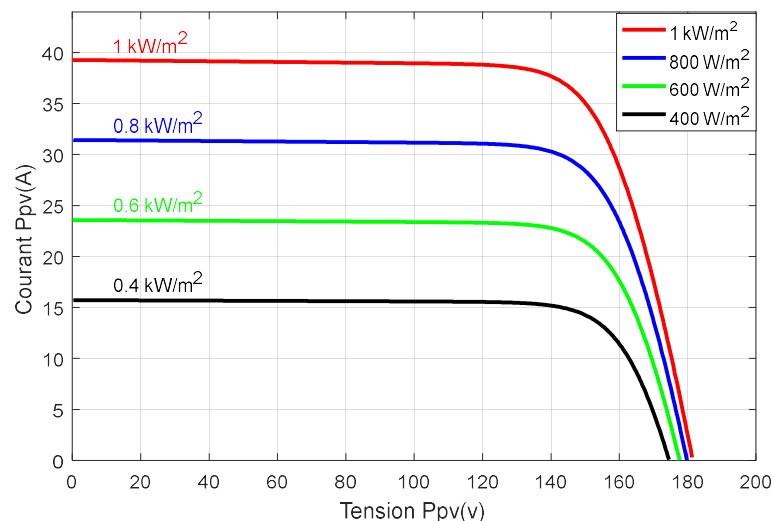


Figure II. 8 : Caractéristique I-V d'un champ PV selon l'irradiation à T = 25°C

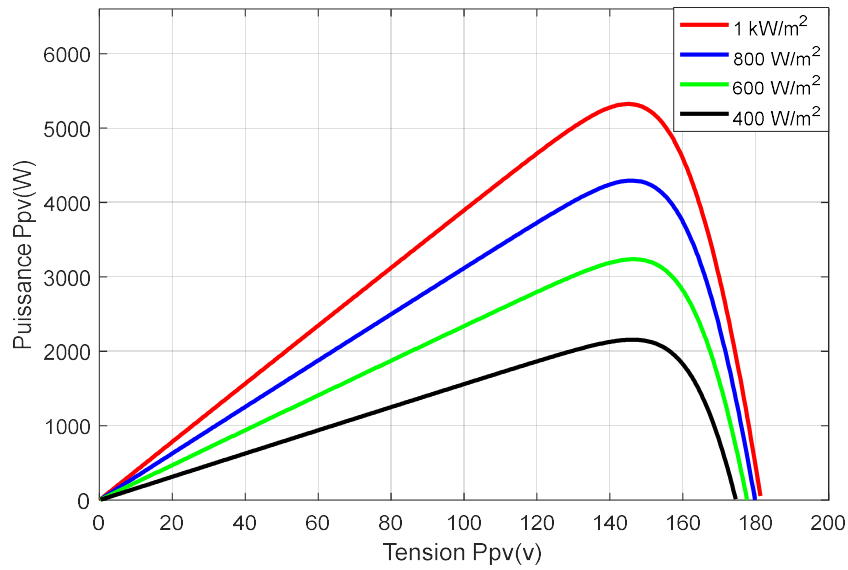


Figure II. 9 : Caractéristique P-V d'un champ PV selon l'irradiation à $T = 25^{\circ}\text{C}$

II.2.6.2 Influence de la température

En faisant varier la température entre 25°C et 55°C , les caractéristiques ($I_{pv}=f(V_{pv})$) et ($P_{pv}=f(V_{pv})$) du champ PV sont données par les (fig.II.10) et (fig.II.11) respectivement. On remarque que la température a une influence négligeable sur le courant de court-circuit mais la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente.

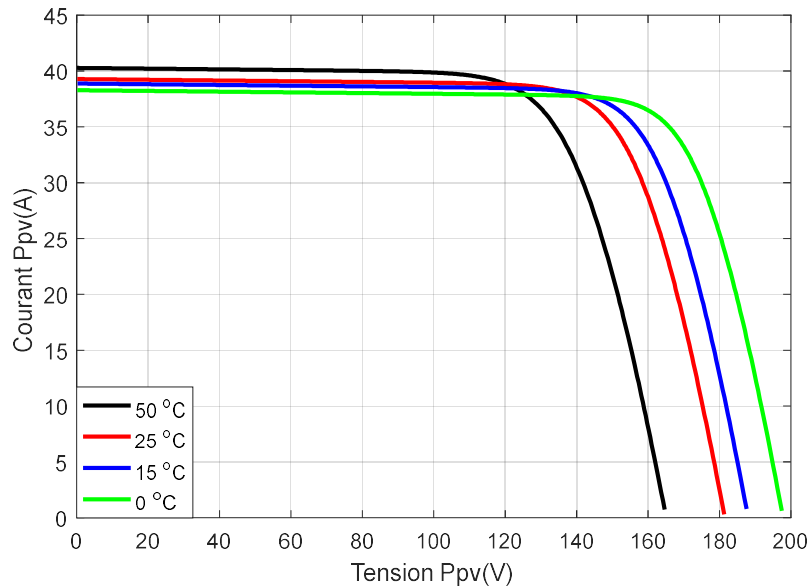


Figure II. 10 : Caractéristique I-V d'un champ PV selon la température à $G=1000\text{Wh/m}^2$

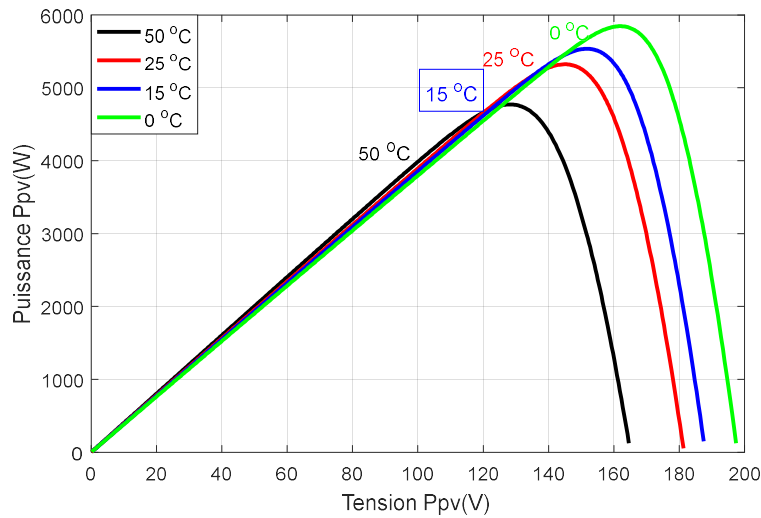


Figure II. 11 : Caractéristique P-V d'un champ PV selon la température à $G=1000Wh/m^2$

II.3 Modélisation de le hacheur Boost

Le hacheur parallèle est un convertisseur statique permettant de convertir une tension continue constante a une autre tension continue réglable de valeur moyenne plus grande. Il est constitué d'un interrupteur en parallèle avec le générateur, d'une diode, d'une inductance pour lissage de courant et d'un condensateur pour le filtrage de la tension[19].

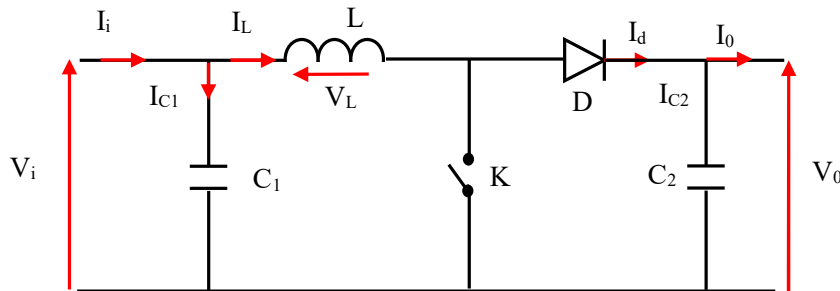


Figure II. 12 : Circuit électrique d'un hacheur boost.

II.3.1 Fonctionnement

Quand l'interrupteur est fermé pendant la durée αT_e , le courant dans l'inductance croît linéairement. La tension aux bornes de 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 $V_k = V_0$. En écrivant que la tension aux bornes de l'inductance est nulle, on arrive à :

$$V_0(1 - \alpha) = V_i \tag{II.8}$$

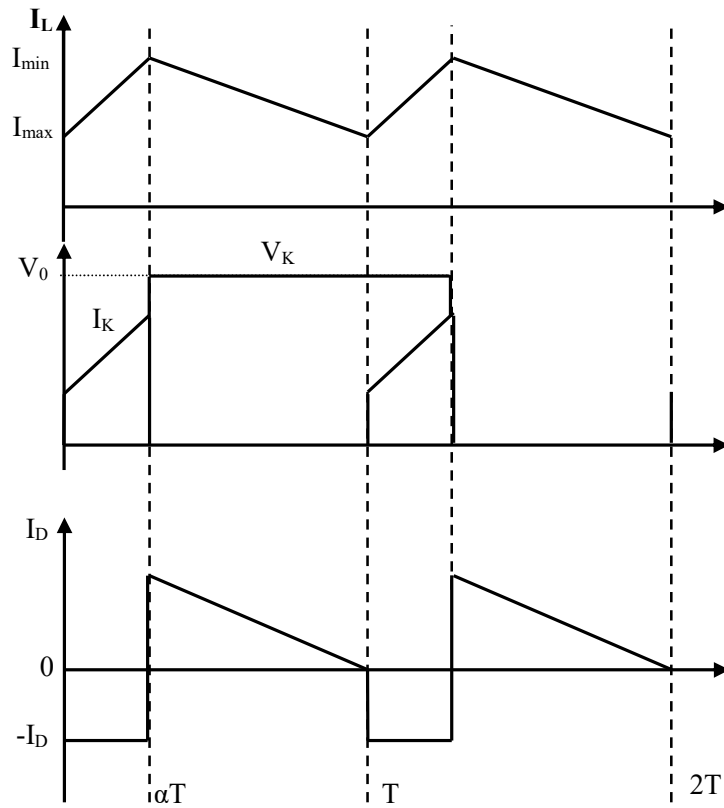


Figure II. 13 : Onde de courant et tension de l’hacheur élévateur.

II.3.2 Modèle mathématique

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. celui de la figure (fig.II.14), présente le circuit équivalent du boost lorsque K est fermé c.-à-d entre $[0, \alpha T_e]$.

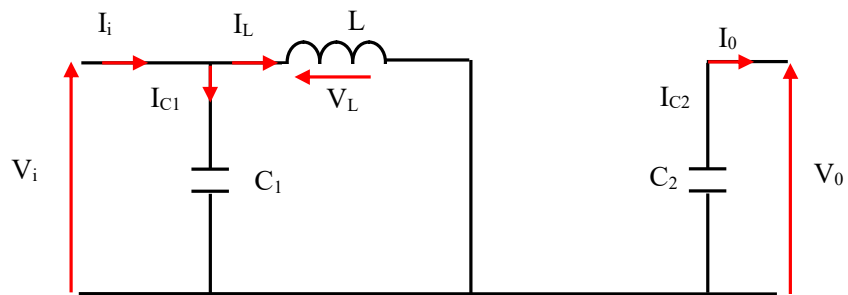


Figure II. 14 : Schéma électrique d’un hacheur boost fermé.

Chapitre II : Modélisation des différents composants du système hybride

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

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (II.9)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = -I_0(t) \quad (II.10)$$

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

À l'état ouvert de l'interrupteur K, le circuit équivalent au fonctionnement du Boost est le suivant:

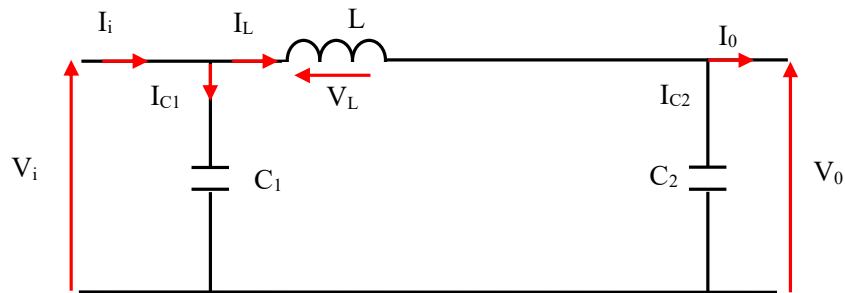


Figure II. 15 : Schéma électrique d'un hacheur boost ouvert[20].

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (II.12)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_0(t)}{dt} = I_L(t) - I_0(t) \quad (II.13)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) - V_0(t) \quad (II.14)$$

II.3.3 Simulation d'hacheur

L'un des circuits électroniques couramment simulés est l'hacheur, qui est un convertisseur de tension utilisé pour réguler la tension d'un système électrique. Le hacheur Boost est l'un des types les plus courants de hacheurs, et il est utilisé pour convertir une tension continue en une tension continue supérieure à la tension d'entrée.

Chapitre II : Modélisation des différents composants du système hybride

II.3.3.1 Application numérique

Pour une tension d'entrée ($V_{in} = 29 \text{ V}$) et une tension de sortie ($V_{out} = 48 \text{ V}$), et à partir des équations précédentes on obtient :

$$\alpha = 1 - \frac{29}{48} = 0.39 \quad (II.21)$$

$$R = \frac{48^2}{213.5} = 10.49\Omega \quad (II.22)$$

$$I_L = \frac{48}{10.79} \cdot \frac{1}{1 - 0.39} = 7.29\text{A} \quad (II.23)$$

$$\Delta I_L = 0.1 \times 7.29 = 0.72\text{A} \quad (II.24)$$

$$L = \frac{29}{2 \times 0.72 \times 20 \times 10^3} \times 0.39 = 3.92 \times 10^{-4}\text{H} \quad (II.25)$$

$$\Delta V = 0.01 \times 48 = 0.48\text{V} \quad (II.26)$$

$$C = \frac{29 \times 0.39}{2 \times 0.48 \times 10.79 \times 20 \times 10^3} = 5.45 \times 10^{-5}\text{F} \quad (II.27)$$

α : Est le rapport cyclique ($0 < \alpha < 1$).

ΔI_L : Ondulation de courant de l'inducteur.

ΔV : ondulation de tension.

I_L : Courant de sortie.

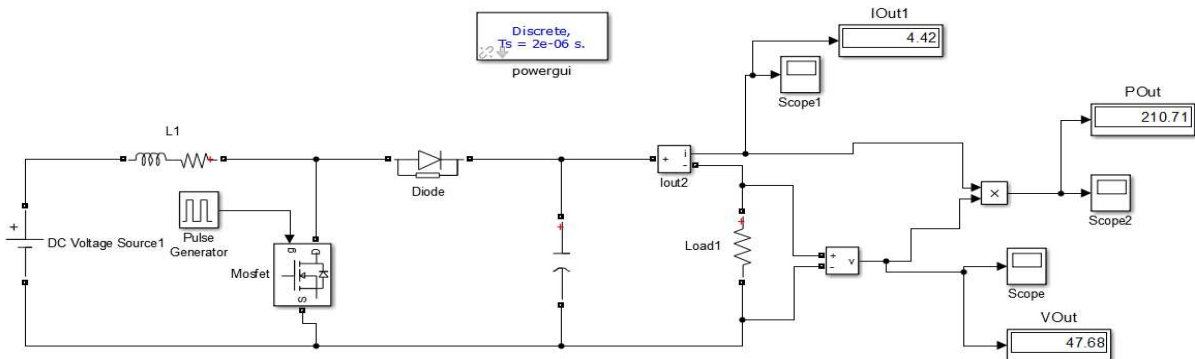


Figure II. 16 : Modèle de l'hacheur boost sous l'envi Matlab/Simulink.

II.3.3.2 Résultat de simulation

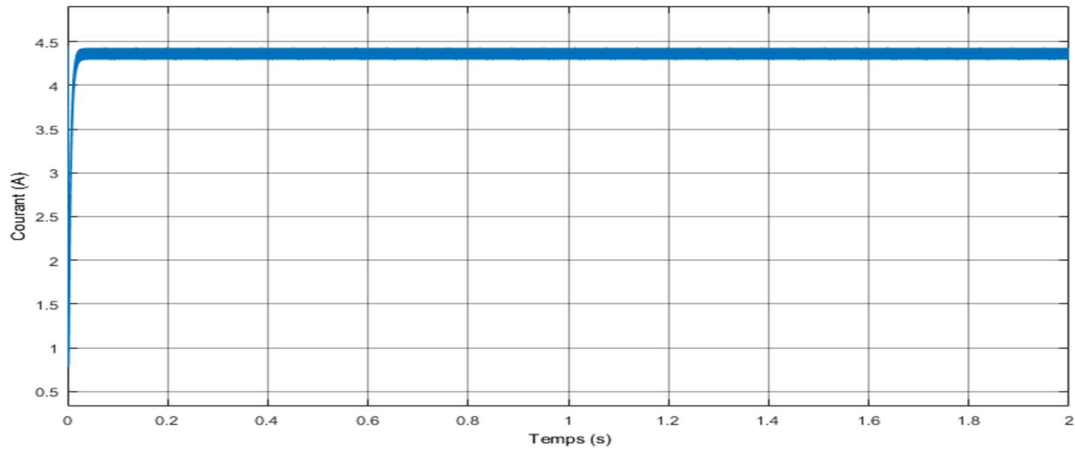


Figure II. 17 : Courant de sortie d'un hacheur boost.

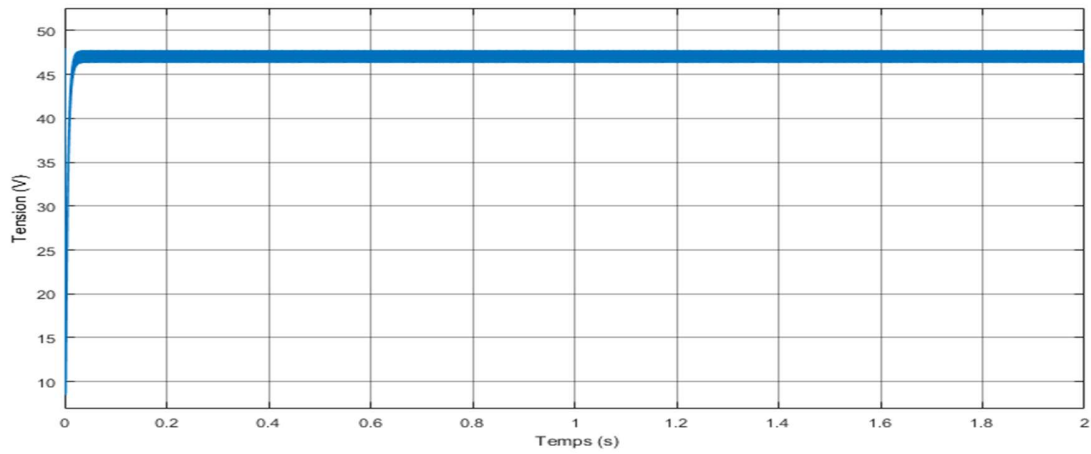


Figure II. 18 : Tension de sortie d'un hacheur boost.

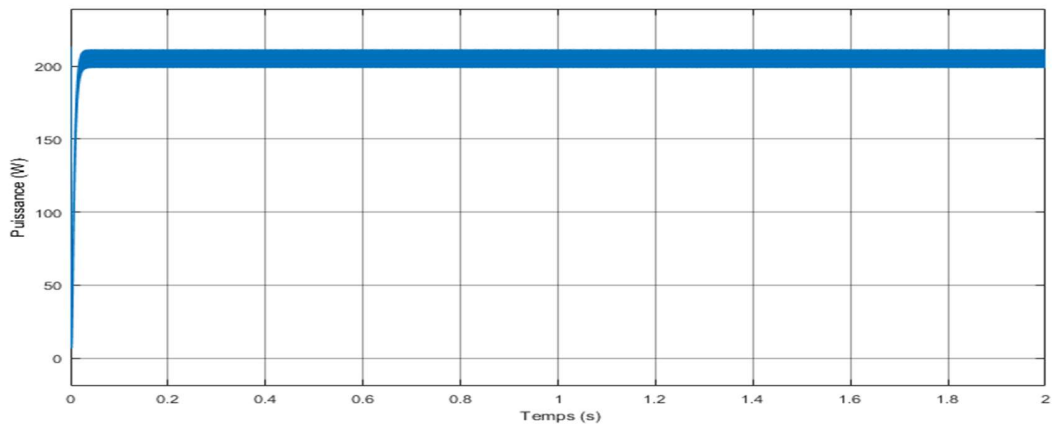


Figure II. 19 : Puissance de sortie d'un hacheur boost.

Ces résultats montrent que la tension de sortie d'hacheur survolteur est supérieure à celle d'entrée. Le courant et la tension de sortie subissent un régime transitoire oscillant puis se stabilisent en régime permanent. Donc l'hacheur survolteur effectue correctement son rôle.

II.4 Commande MPPT de l'hacheur élévateur

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie, mais il ne peut délivrer une puissance maximale que pour des valeurs particulières du courant et de la tension. En effet, la caractéristique du courant en fonction de la tension $I(V)$ du générateur dépend de l'éclairement solaire et de la température. Les variations climatiques entraînent la fluctuation du point de la puissance maximale. À cause de cette fluctuation, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur, un ou plusieurs convertisseurs statiques commandés permettant de poursuivre le point de puissance maximale[21].

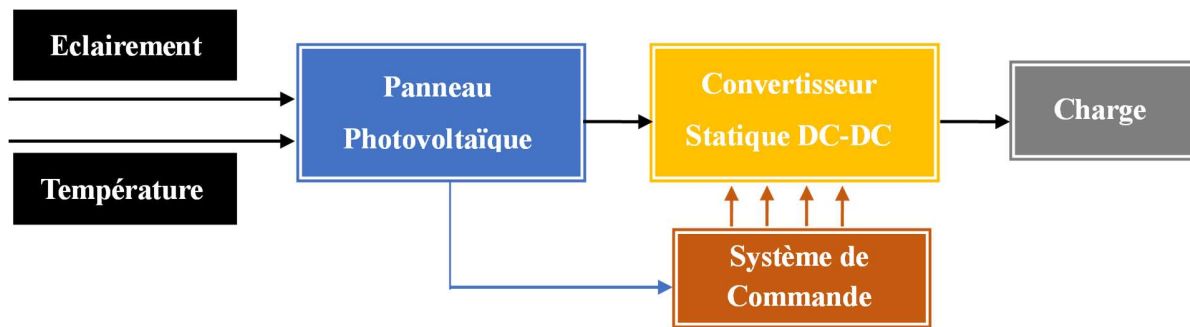


Figure II. 20 : Schéma simplifié d'un système photovoltaïque à base d'un hacheur.

II.4.1 Principe de la MPPT

La MPPT, de l'anglais « Maximum Power Point Tracking » est une technique permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur photovoltaïque. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. À cet effet, un contrôleur MPPT permet de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge à chaque instant.

La (Fig.II.20) présente le schéma du principe d'un générateur photovoltaïque doté d'étage d'adaptation dc-dc entre le générateur et sa charge. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant de stocker l'énergie pour une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension. Cet

étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM (point de puissance maximale) que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé (fig.II.21)[21].

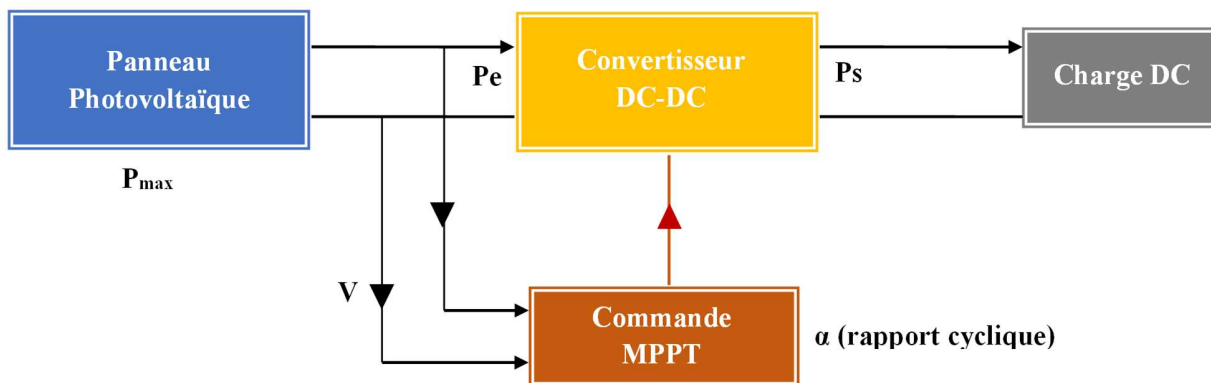


Figure II. 21 : Schéma de principe de la commande MPPT d'un système photovoltaïque.

II.5 Modélisation de la batterie

La modélisation et la simulation peut jouer un rôle important dans la compréhension et la conception de systèmes de batteries. Les simulations prédictives peuvent compléter les expériences dans l'accélération et le déploiement de nouveaux modèles de batteries et ont généralement le plus grand impact où :

- Les données expérimentales ne sont pas suffisantes pour comprendre les mécanismes sous-jacents qui contrôlent les phénomènes observés.
- Les données nécessaires ne peuvent pas être facilement déterminées faiblement, ou économiquement grâce à des expériences.
- L'espace des paramètres est si grand qu'il est difficile de trouver la solution optimale, même avec la meilleure conception de techniques expérimentale

Puisque les batteries font partie du système électrique global, il est nécessaire de les inclure dans le modèle du système. Par conséquent un modèle de circuit électrique équivalent pour les

Chapitre II : Modélisation des différents composants du système hybride

batteries est nécessaire pour pouvoir analyser le fonctionnement dynamique et le comportement stable du système[22].

Ce modèle est basé sur le schéma suivant (Fig.II.22) où la batterie est décrite par seulement deux éléments, une source de tension et une résistance interne, dont les valeurs dépendent d'un certain nombre de paramètres.

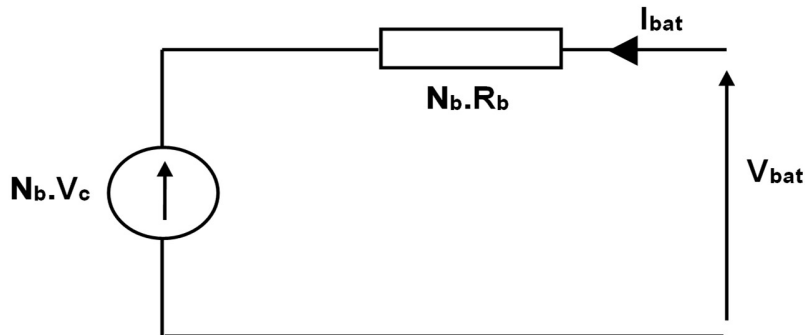


Figure II. 22 : Schéma électrique de batterie.

Ce modèle définit la tension aux bornes de l'accumulateur en fonction du courant imposé, de son état de charge et de la température. Il tient compte du rendement faradique en charge pour calculer l'évolution de son état de charge et intègre la phase de dégazage (dégagement d'hydrogène).

$$I_{bat} = \frac{P_{pv}(t)}{V_{bat}(t)} \quad (II.28)$$

Pour ressortir les phénomènes physiques qui régissent le fonctionnement du système de stockage, par le biais de la capacité, il faudrait tenir compte de la température. C'est pourquoi, nous proposons le modèle de la capacité, donnant la quantité d'énergie qui peut être restituée en fonction du courant moyen de décharge, elle est donnée par l'équation (II.29)

$$\frac{C_{bat}}{C_{10}} = \frac{1.67}{1 + 0.67 \left(\frac{I}{I_{10}}\right)^{0.9}} (1 + 0.005\Delta T) \quad (II.29)$$

Le modèle de la capacité est établie à partir de l'expression du courant I_{10} , correspondant au régime de fonctionnement à C_{10} (C_{10} est la capacité en Ah de la batterie en régime de décharge à courant constant I_{10} durant 10h : $C_{10} = 10.I_{10}$), dans lequel ΔT est l'échauffement de

Chapitre II : Modélisation des différents composants du système hybride

l'accumulateur (supposé identique pour tous les éléments) par rapport à une température ambiante qui est égale à 25 °C.

On définit également l'état de charge SOC de la batterie par :

$$SOC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (II.30)$$

C_{bat} : la capacité (Ah) nominale de la batterie.

Q_d : la quantité de charge manquante par rapport à C_{bat} .

Les expressions des grandeurs de la batterie sont exprimées ci-dessous. L'expression générale de la tension batterie :

$$V_{bat}(t) = N_b \cdot V_{CO}(t) + N_b \cdot I_{bat}(t) \cdot R_{bat}(t) \quad (II.31)$$

$V_{bat}(t)$: la tension de circuit ouvert au temps t,

$R_{bat}(t)$: la résistance interne de batterie, la tension de circuit ouvert est exprimée comme un logarithme de la fonction de l'état de charge[23].

$$V_{CO}(t) = V_F + b \cdot \log(SOC(t)) \quad (II.32)$$

V_F : la force électromotrice,

b : un constant empirique.

Les tensions en décharge et en charge sont modélisées par deux équations différentes[24] :

Tension en décharge :

$$V_{bat-d} = N_b \cdot [1,965 + 0,12 \cdot SOC] - N_b \cdot \frac{|I_{bat}|}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + |I_{bat}|^{1,3}} + \frac{0,27}{SOC^{1,5}} + 0,02 \right) (1 - 0,007 \cdot \Delta T) \quad (II.33)$$

Tension en charge :

$$V_{bat-d} = N_b \cdot [2 + 0,16 \cdot SOC] + N_b \cdot \frac{I_{bat}}{C_{10}} \left(\frac{6}{1 + I_{bat}^{0,86}} + \frac{0,48}{(1 - SOC)^{1,5}} + 0,036 \right) (1 - 0,025 \cdot \Delta T) \quad (II.34)$$

Chapitre II : Modélisation des différents composants du système hybride

Le rendement de la batterie se calcule par la relation suivante :

$$\eta_{bat} = \frac{P_{fourni}}{P_{incid}} \quad (II.35)$$

En pratique, le rendement est considéré constant égale à 85%, la tension nominale est de 2V et la capacité de l'ordre de 100A/h. donc la puissance fournie par une batterie peut_ s'écrire comme suit :

$$P_{fourni} = \eta_{bat} \cdot P_{incid} \quad (II.36)$$

P_{incid} : Puissance du générateur[23].

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons identifié les équations qui permettent de modéliser l'influence des facteurs extérieurs (tels que la température et le rayonnement) et des facteurs intérieurs (comme l'association du module de cellule hybride) sur un panneau solaire. De plus, nous avons fourni une vue d'ensemble des différents types de convertisseurs statiques basés sur le principe de fonctionnement du convertisseur BOOST.

Après avoir introduit le modèle de le hacheur élévateur et sa stratégie de commande à modulation de largeur d'impulsion , nous avons exposé les résultats de simulations du système générateur PV-hacheur charge.

Pour le chapitre qui suit le panneau solaire produit différentes puissances, mais il est nécessaire de sélectionner celle qui est optimale en utilisant le régulateur MPPT (Maximum Power Point Tracking) afin de trouver le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale.



Chapitre III :

Simulation du système hybride

III.1 Introduction

Après avoir effectué la modélisation des différentes composantes d'un système hybride dans le chapitre précédent, nous allons procéder dans ce chapitre à la simulation individuelle de chaque composante du système global (le générateur photovoltaïque, le convertisseur élévateur et la batterie). Nous allons effectuer la simulation du système étudié en utilisant Matlab Simulink afin d'obtenir les différentes courbes caractéristiques du système et de présenter les résultats obtenus[12].

Les techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) sont employées dans les systèmes photovoltaïques afin de maximiser la puissance fournie par les panneaux solaires en cherchant en permanence le point de puissance maximale. Atteindre ce point n'est pas trivial, et cela a fait l'objet de nombreuses recherches jusqu'à aujourd'hui. De nombreuses méthodes ont ainsi été développées et utilisées pour résoudre ce problème de suivi du point de puissance maximale.

Dans ce chapitre, on présentera l'aspect théorique de deux méthodes pour le suivi du point de fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque et qui sont les méthodes classiques « perturbation et observation » et la méthode « conductance incrémentale ».

III.2 Estimation de la consommation journalière

Dans notre travail, on va dimensionner le système photovoltaïque pour alimenter le laboratoire pédagogique des énergies renouvelables au sein de centre universitaire SALHI AHMED NAAMA.

La région de NAAMA est parmi les régions qui présentent le plus grand potentiel solaire de tout l'Algérie.

Pièce ou Appareil électrique	Numéro	Puissance (W)	Temps de fonctionnement	Puissance total (W)	Energie (Wh/jour)
Les Lamps	32	18	8h	576	4608
Onduleur	1	644	5h	644	3220
Banc d'étude pour la conduction thermique	1	580	5h	580	2900
Refroidisseur d'eau	1	2300	4h	2300	9200
PC	1	150	5h	150	750
				Total	20678

Tableau III. 1 : Consommation journalière.

III.3 Simulation du GPV

À partir des modèles et des lois issues des précédents, nous discutons des résultats de simulation pour les différentes sources d'énergie qui représentent cette étude, pour faire ça nous avons conçu un algorithme implémenté sous Matlab-Simulink.

Pour faire la simulation, nous choisissons Blocs Signal Builder Matlab-Simulink pour la température et l'éclairage du générateur solaire, ainsi qu'une batterie rechargeable. Pour observer et analyser les courbes facilement, nous définissons le temps comme 5 secondes qui signifie 24 heures (un jour) en réel.

III.3.1 Les paramètres des sources

Calcul de la puissance crête du champ PV :

La Puissance qu'il faut calculer à partir de la table Consommation journalière est donnée par :

$$P_c = \frac{E_{bes} \cdot E_{STC}}{E_{mes} \cdot C_p} \quad (III. 1)$$

$$P_c = 5302.05 \text{ Wc}$$

P_c : Puissance crête du champ photovoltaïque (W).

E_{bes} : Besoin journalier 20678 Wh/j.

E_{stc} : Ensoleillement dans les conditions STC (E_{stc} = 1000 W/m²).

E_{mes} : Ensoleillement du site d'installation (kWh/j. (m²)).

C_p: Facteur de correction appliqué pour tenir compte des différentes pertes (C_p= 0.65).

$$N_t = \frac{P_c}{P_1} = 25 \quad (III. 2)$$

P₁ : Puissance de panneau.

N_t : Numéro de panneau photovoltaïque 25.

Paramètres des panneaux photovoltaïques :

Panneaux	Ns	Np	Ncel	Vpm(V)	Ipm(A)	P(w)
Photovoltaïques	5	5	60	29	7.35	213.15

Tableau III. 2 : Paramètres du panneau photovoltaïque.

III.3.2 Simulation du générateur PV alimentant une charge résistive :

Nous allons simuler le fonctionnement du système photovoltaïque constitué d'un panneau PV relié à un hacheur alimentant une charge résistive.

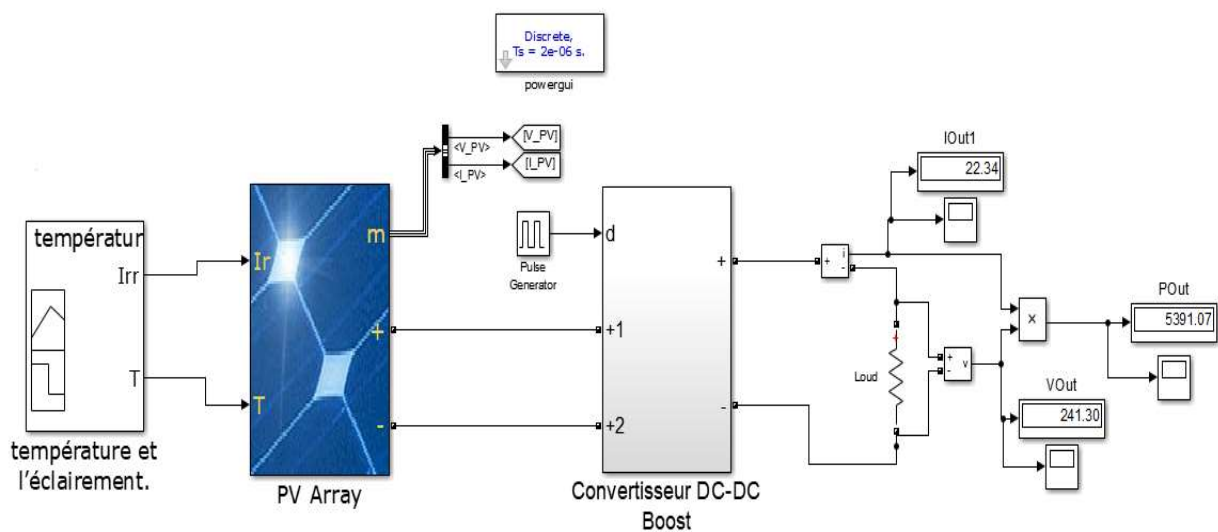


Figure III. 1 : Schéma de simulation de GPV.

III.3.2.1 Cas de variation de température et l'éclairement :

Les figures (III.2), (III.3) et (III.4) présentent le courant, la tension et la puissance générée par le panneau PV et celle aux bornes de la charge, On de la température 25°C et l'éclairement 1000W/m².

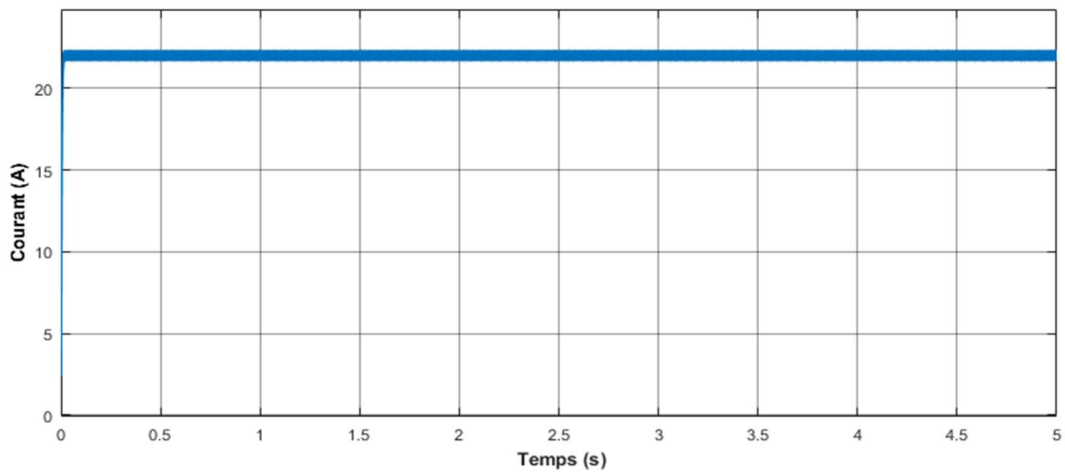


Figure III. 2 : Courant de sortie du système (panneau hacheur).

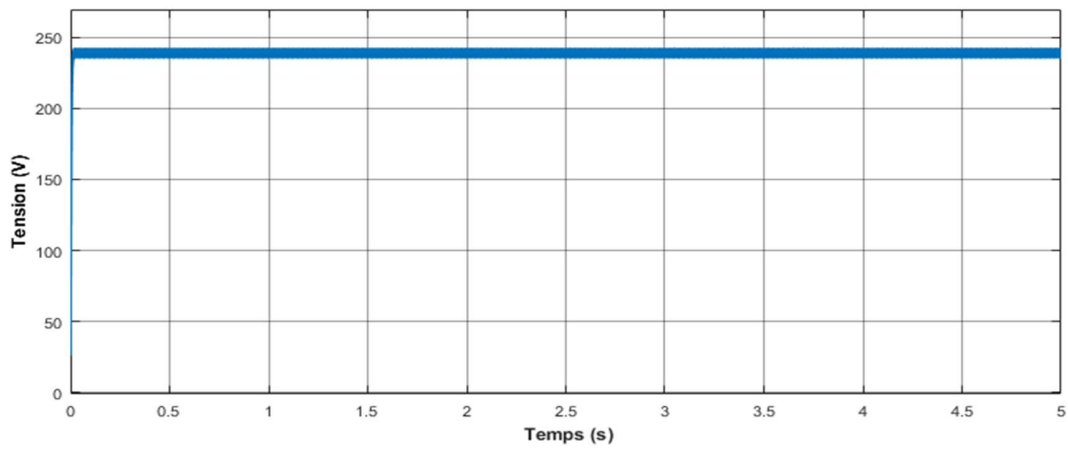


Figure III. 3 : Tension de sortie du système (panneau hacheur).

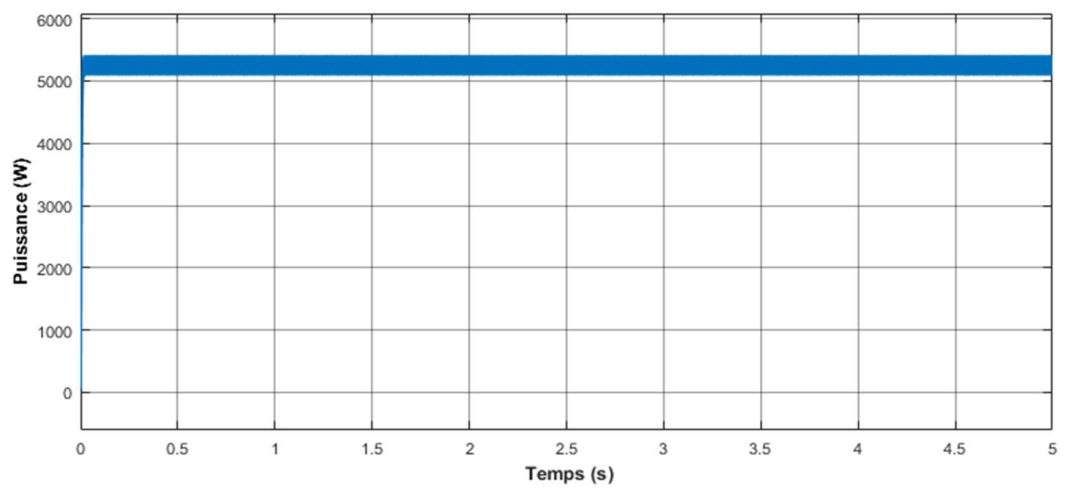


Figure III. 4 : Puissance de sortie (panneau hacheur).

III.3.2.2 Cas de variation de température :

Nous allons simuler le fonctionnement de système photovoltaïque (panneau-hacheur-charge) pour un éclairement fixe (1000W/m^2) et une variation de température (50°C - 25°C) à l'instant 2.7S.

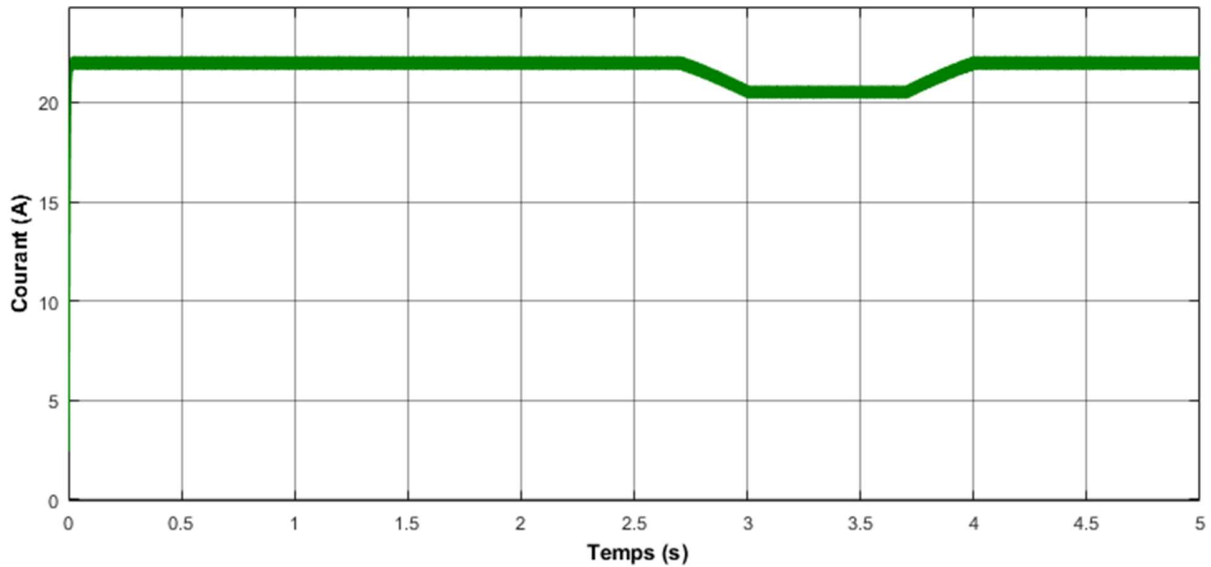


Figure III. 5 : Courant de la charge avec une variation de température de 50°C - 25°C .

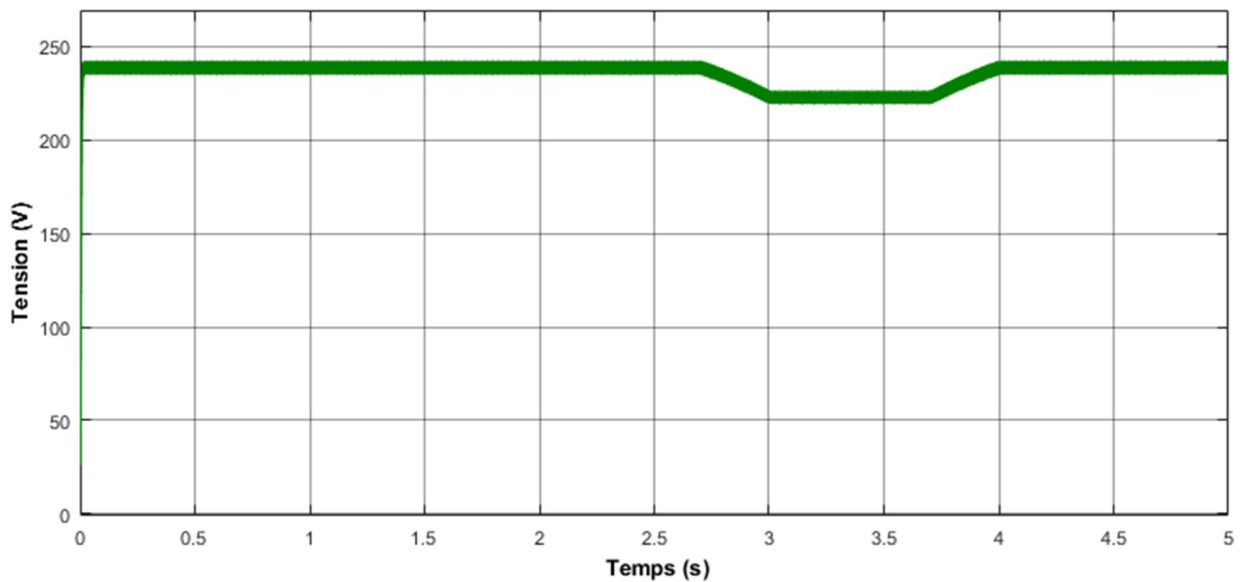


Figure III. 6 : Tension de la charge avec une variation de température de 50°C - 25°C

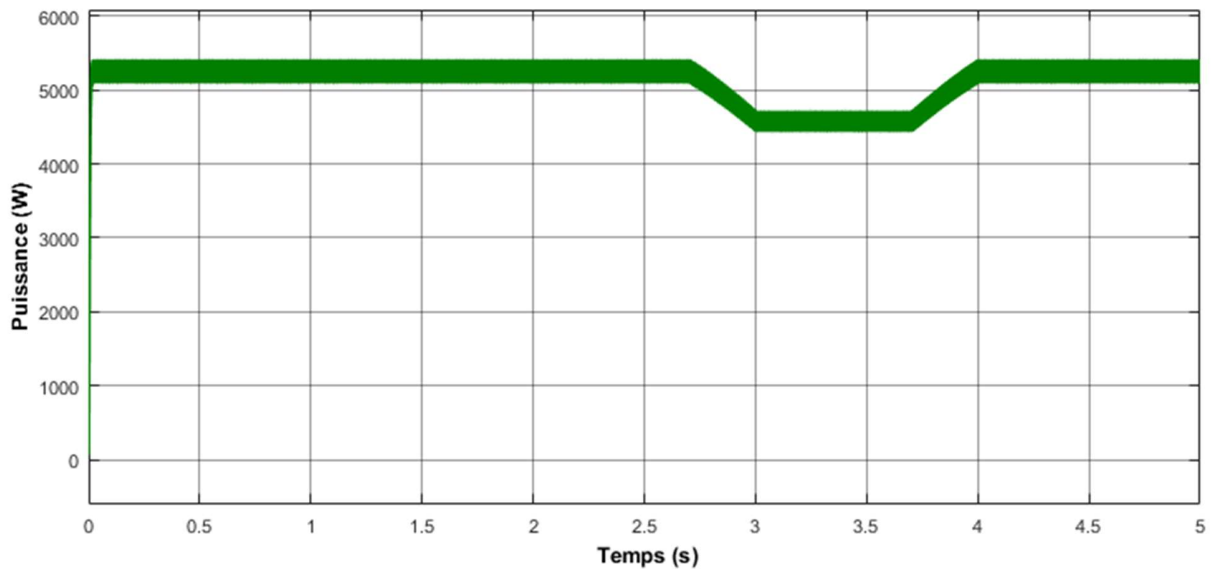


Figure III. 7 : Puissance de la charge avec une variation de température de 50°C-25°C

La (fig.III.7) présente l'évolution de la puissance par le panneau PV et celle aux bornes de la charge. On note que la puissance augmente avec la diminution de la température (50°C jusqu'à 25°C).

III.3.2.3 Cas de variation de l'éclairement :

Nous allons simuler le fonctionnement de système photovoltaïque (panneau-hacheur charge) pour une température fixe (25°C) et un éclairement variable (200-1000w/m²)

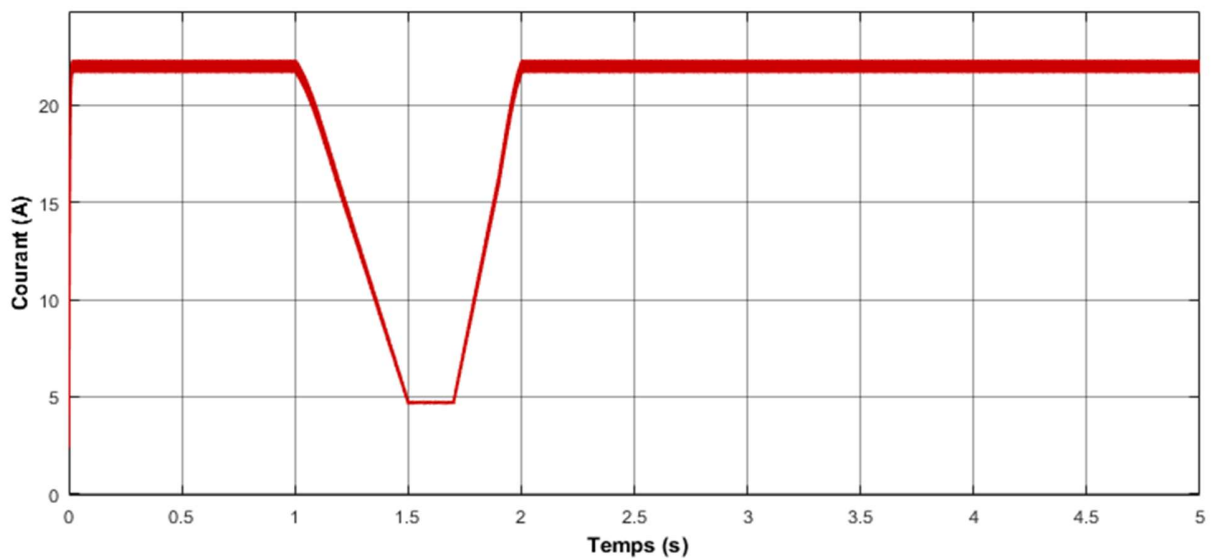


Figure III. 8 : Courant de la charge avec un éclairement variable de 200 à 1000W/m².

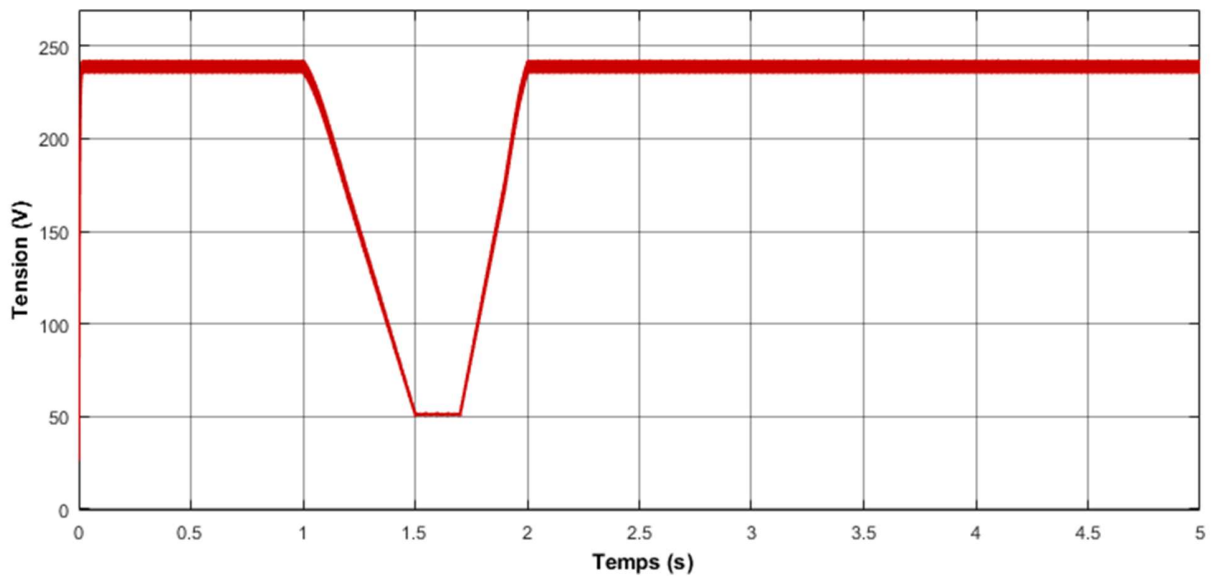


Figure III. 9 : Tension de la charge avec un éclairement variable de 200 à 1000W/m².

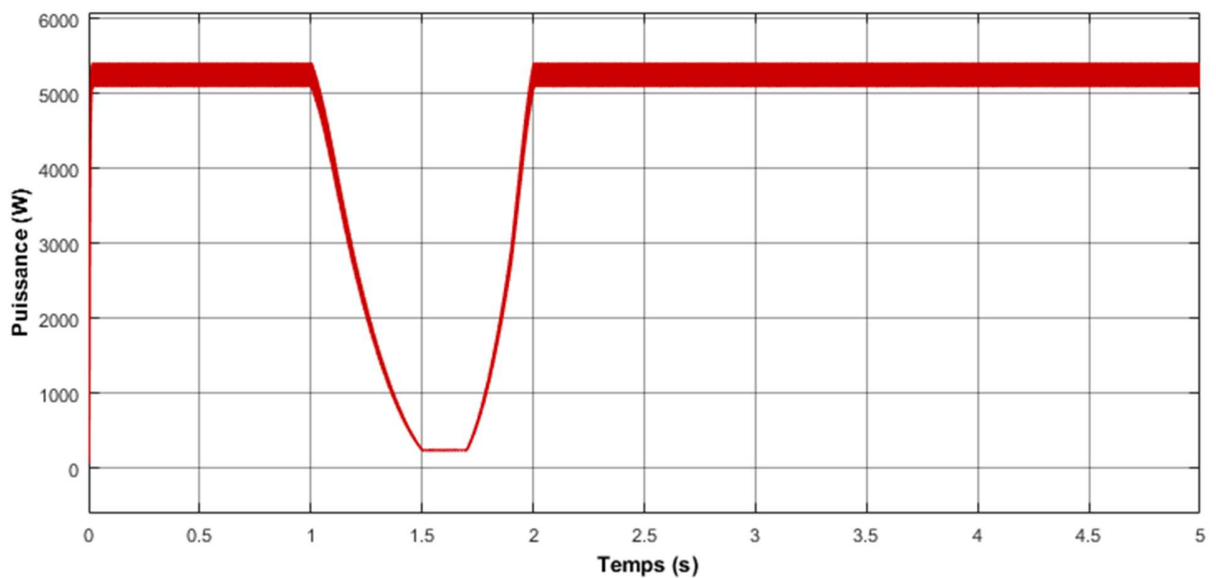


Figure III. 10 : Puissance de la charge avec un éclairement variable de 200 à 1000W/m².

La (fig.III.10) présente l'évolution de la puissance générée par le panneau PV et celle consommée par la charge. On note que la puissance augmente avec l'augmentation de l'éclairement de 200 à 1000W/m².

III.3.2.4 Cas de variation de l'éclairage et variation de température :

On voit aussi de la variation de la température et de l'éclairage. Cela est dû à la présence dans le modèle à paramètres.

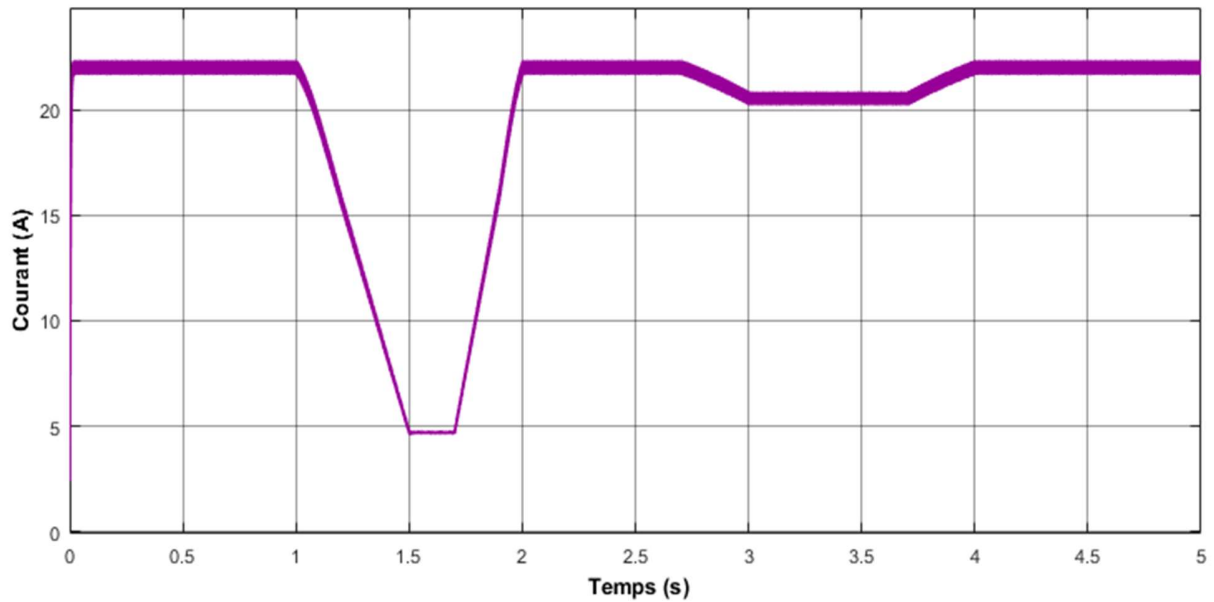


Figure III. 11 : Courant de la charge générée par système.

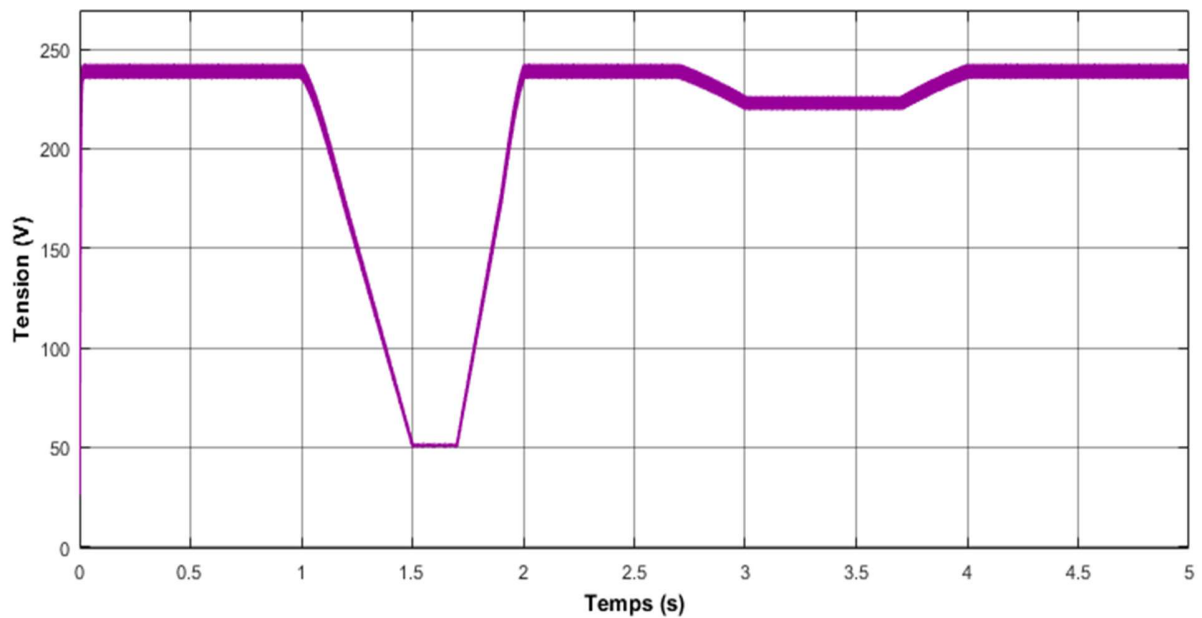


Figure III. 12 : Tension de la charge générée par système.

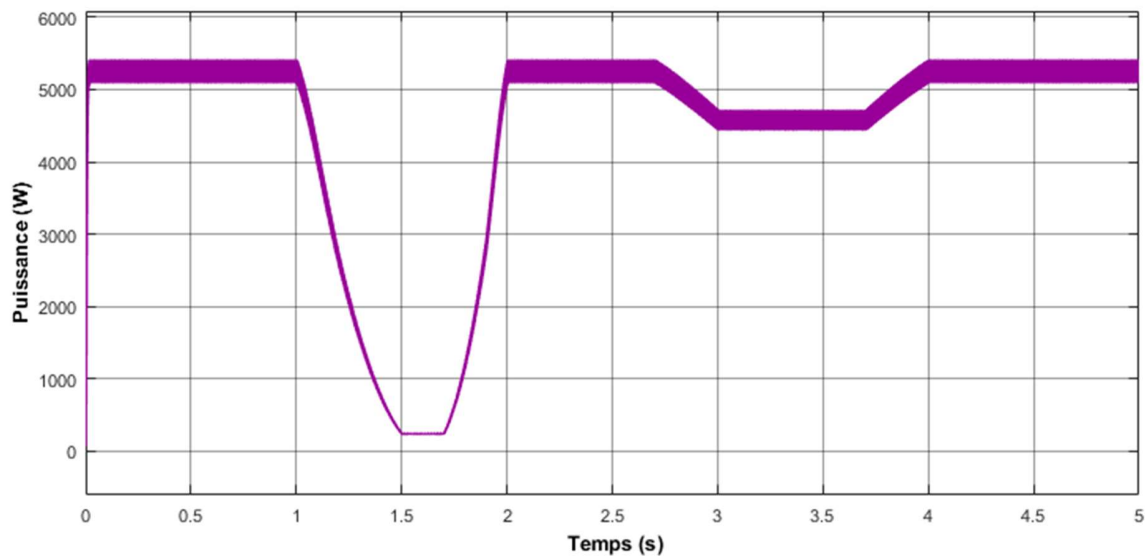


Figure III. 13 : Puissance de la charge générée par système.

Les (fig.II.11) et (fig.II.12) et (fig.II.13), présentent l'évolution de la tension et courant et puissance aux bornes de la charge.

- ❖ **La période $t = [0-1]$ s :** une puissance de sortie fixe due à la température 25°C et éclairement 1000W/m .
- ❖ **La période $t = [1-2]$ s :** une diminution de puissance de sortie due à la variation de l'éclairage (on a diminué l'éclairage de 1000W/m à 200W/m et fixé la température à 25°).
- ❖ **La période $t = [2.7-4]$ s :** une diminution de puissance de sortie due à la variation de la température (on a augmenté la température de 25°C jusqu'à 50°C et fixé l'éclairage à 1000W/m).
- ❖ **La période $t = [4-5]$ s :** une puissance de sortie fixe due à la température 25°C et éclairage 1000W/m .

A partir des courbes obtenues, on peut tirer au moins les deux conclusions ci-dessous :

- La puissance maximale du GPV est pratiquement proportionnelle à l'éclairage.
- L'augmentation de la puissance optimale va dans le sens inverse de T.

III.4 Méthode classique de commande MPPT

III.4.1 Méthode par l'incrémentation de la conductivité (IncCond)

Le principe de cet algorithme est basé sur la connaissance de la valeur de la conductance $G = \frac{1}{V}$ et sur l'incrément de la conductance (dG) pour en déduire la position du point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale, 'PMP'. Si l'incrément de conductance (dG) est supérieur à l'opposé de la conductance ($-G$), on diminue le rapport cyclique. Par contre, si l'incrément de conductance est inférieur à l'opposé de la conductance, on augmente le rapport cyclique. Ce processus est répété jusqu'à atteindre le point de puissance maximale, 'PMP'

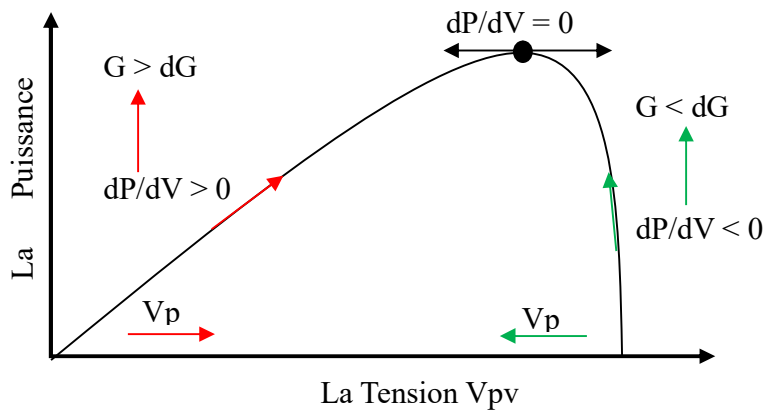


Figure III. 14 : Principe de la méthode Inc-Cond

Nous allons chercher le maximum de point d'annulation de la dérivée de puissance de la figure précédente, en comparant la conductance G à la conductance incrémentielle ΔG .

$$P = V \cdot I \tag{III. 3}$$

Donc :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \qquad \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{1}{V} \qquad (a) \text{ Au point du MPP}$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \qquad \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{1}{V} \qquad (b) \text{ A gauche du MPP} \tag{III. 4}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \qquad \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{1}{V} \qquad (c) \text{ A droite du MPP}$$

Les deux équations (b) et (c) sont utilisées pour déterminer la direction du déplacement de point de fonctionnement MPP dans laquelle la perturbation se produit, elle se répète jusqu'à ce que l'équation (a) soit satisfaite.

À partir des équations (III .4), l'algorithme Inc-Cond peut être représenté par l'organigramme suivant :

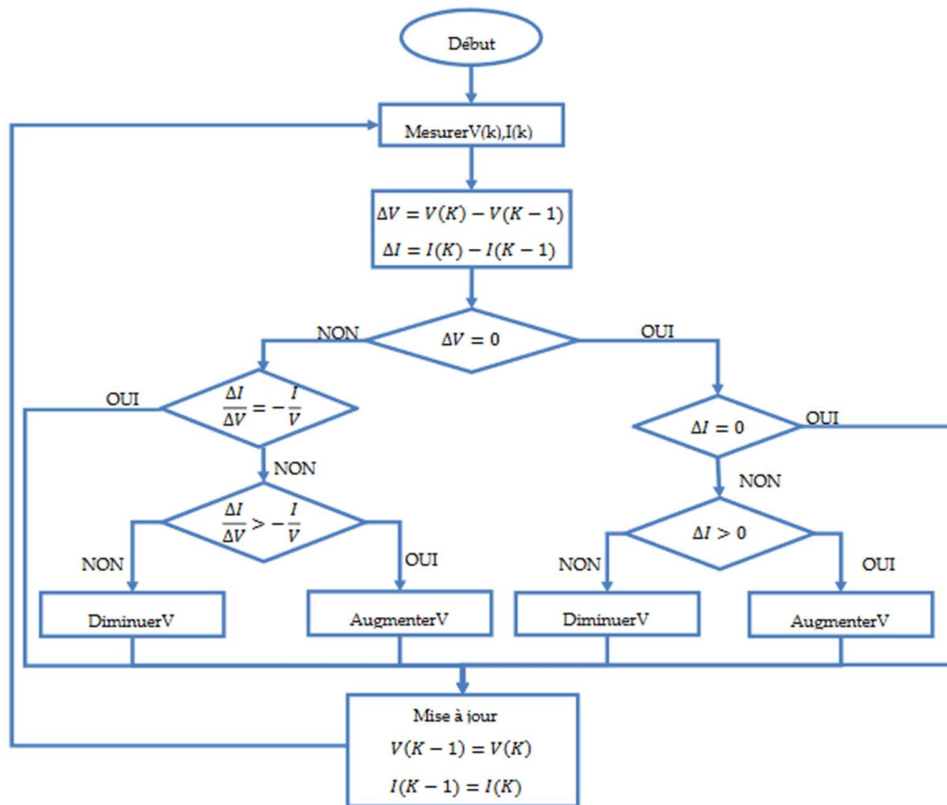


Figure III. 15 : Organigramme de la méthode Inc-Cond.

III.4.2 La technique Perturbation & Observation (P&O)

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répandue dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque VPV et IPV respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors(s) des variations de l'éclairement et la température.

Le principe de cet algorithme P&O est d'effectuer une perturbation sur la tension V_{pv} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau photovoltaïque

selon le signe de la pente de la puissance en fonction de la tension selon les équations :

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dV} > 0 & \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} > -\frac{1}{V} \\ \frac{dP}{dV} = 0 & \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} = -\frac{1}{V} \\ \frac{dP}{dV} < 0 & \quad \frac{\Delta I}{\Delta V} < -\frac{1}{V} \end{aligned} \tag{III.5}$$

La figure (III.16) représente l'algorithme de la méthode P&O. À chaque cycle, V_{pv} et I_{pv} sont mesurés pour calculer $P_{pv}(k)$. Cette valeur de $P_{pv}(k)$ est comparée à la valeur $P_{pv}(k-1)$ calculée au cycle précédent.

Si la puissance de sortie a augmenté, V_{pv} est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué, V_{pv} est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent. V_{pv} est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT.

Quand le point de puissance maximale est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale V_{op} . Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrément de la perturbation. Si ce pas d'incrément est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement[25].

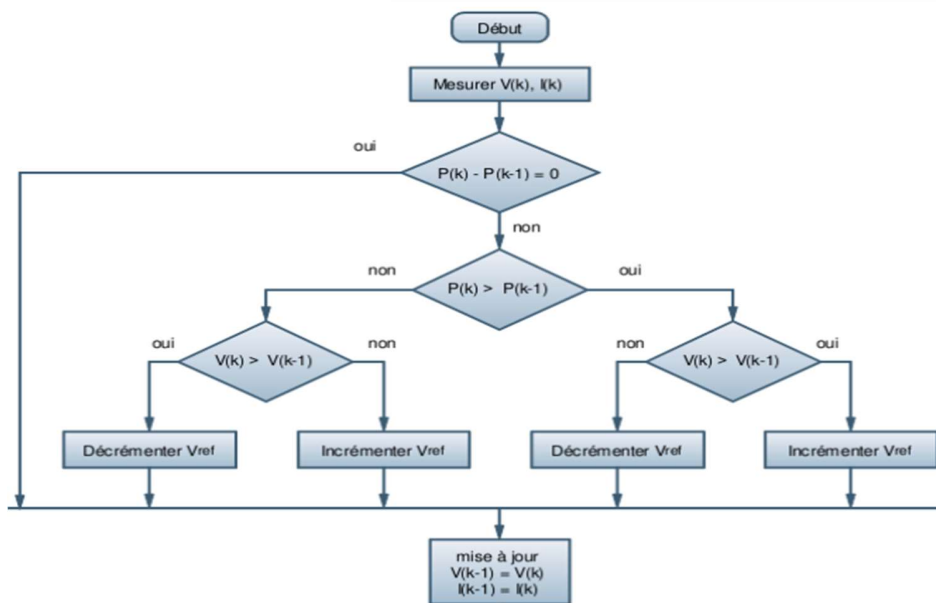


Figure III. 16 : Organigramme de la méthode P&O[26].

III.4.3 Simulation les deux Méthode de commande MPPT

Dans cette simulation, nous allons examiner et comparer la méthode de commande MPPT P&O et la méthode IncCond. Nous allons étudier leur fonctionnement, leur précision de suivi du point de puissance maximale, leur sensibilité aux variations du rayonnement solaire, et d'autres facteurs pertinents. Cette comparaison nous permettra de mieux comprendre les avantages et les inconvénients de chaque méthode et de déterminer celle qui convient le mieux à un scénario donné.

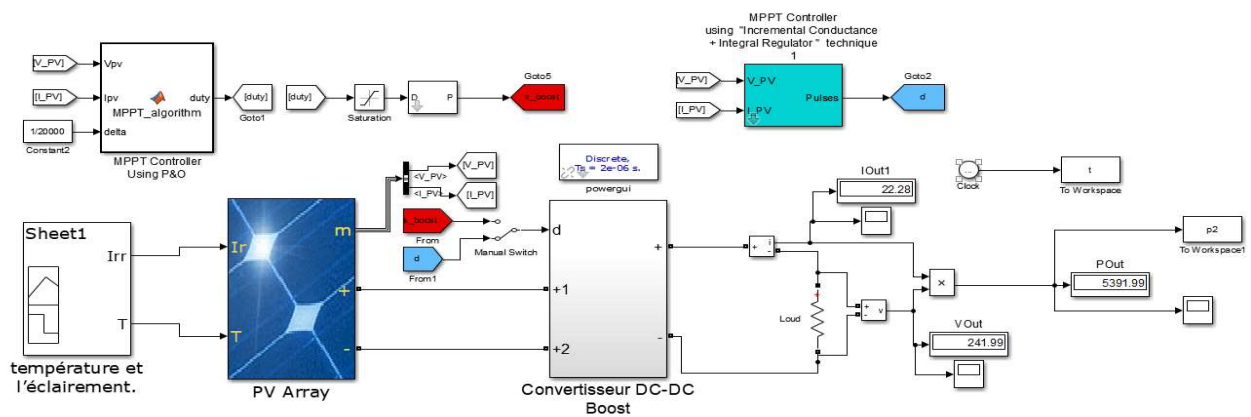


Figure III. 17 : les deux Méthode MPPT (P&O et Inc-Cond).

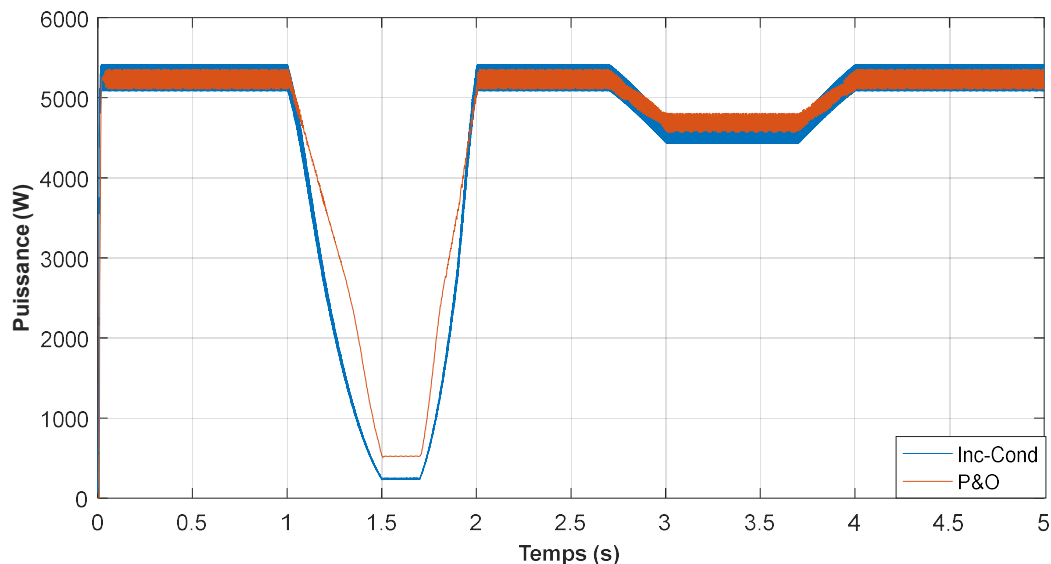


Figure III. 18 : Différent méthode MPPT P&O et Incrémental Conductance.

La méthode de l'Incrémental Conductance est plus complexe que la méthode P&O, mais elle permet généralement d'atteindre plus rapidement et plus précisément le PPM. Cependant, elle peut également présenter des problèmes d'oscillation dans certaines conditions de fonctionnement spécifiques.

En résumé, le Perturbé and Observe (P&O) et l'Incrémental Conductance sont deux méthodes populaires pour le MPPT dans les systèmes photovoltaïques. Chacune a ses avantages et ses limitations, et le choix entre les deux dépendent des exigences spécifiques du système et des conditions de fonctionnement.

III.5 Simulation de Batterie

Paramètres de la Batterie :

Batterie	Type de la batterie	La tension nominale (V)	Capacité (Ah)	Résistance interne (Ω)	Courant nominal de décharge (A)
	Lithium-ion	48	50	0.0096	21.7391

Tableau III. 3 : Paramètres de la Batterie.

III.5.1 Schéma et Résultats de simulation :

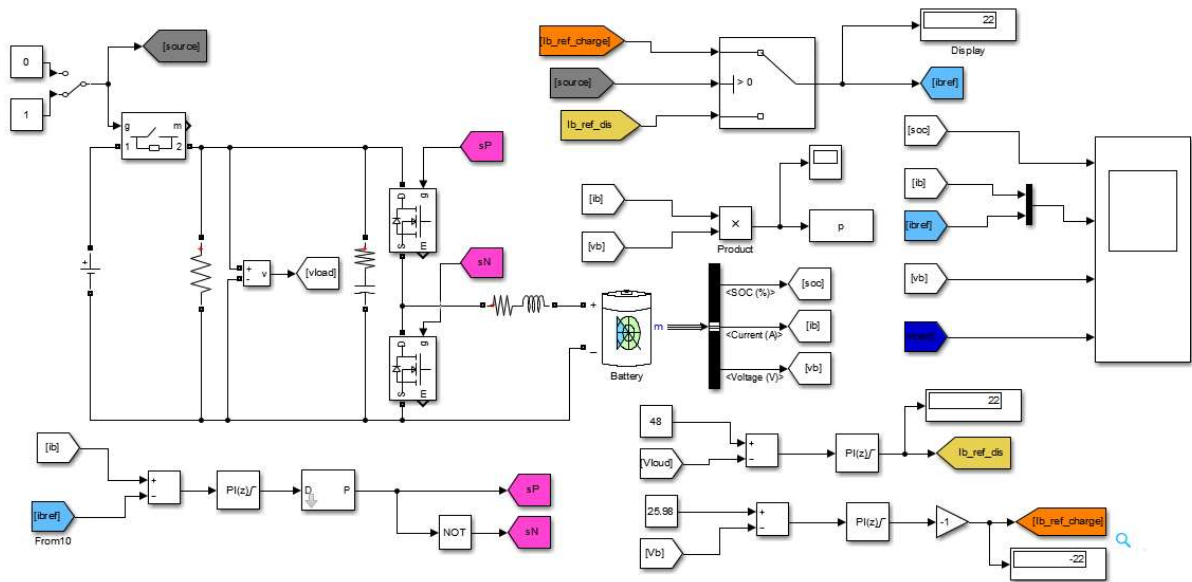


Figure III. 19 : Schéma de simulation de la batterie.

III.5.1.1 Cas de charge :

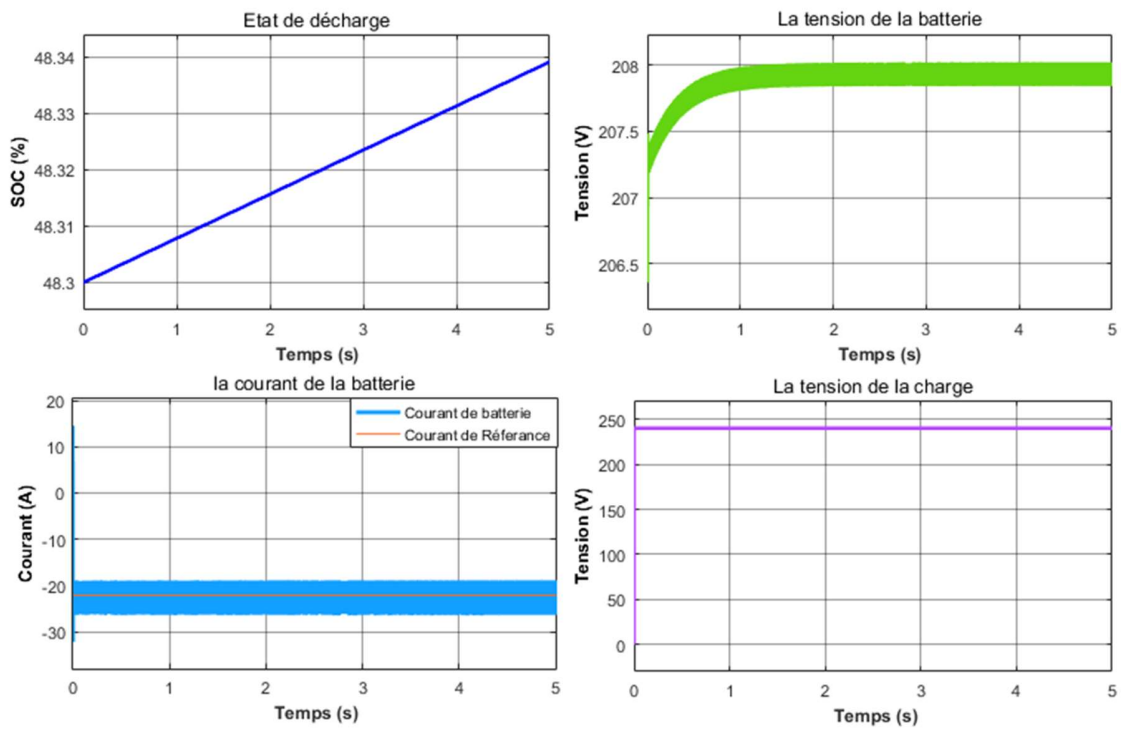


Figure III. 20 : Résultats de simulation de la batterie en cas de charge.

III.5.1.2 Cas de décharge

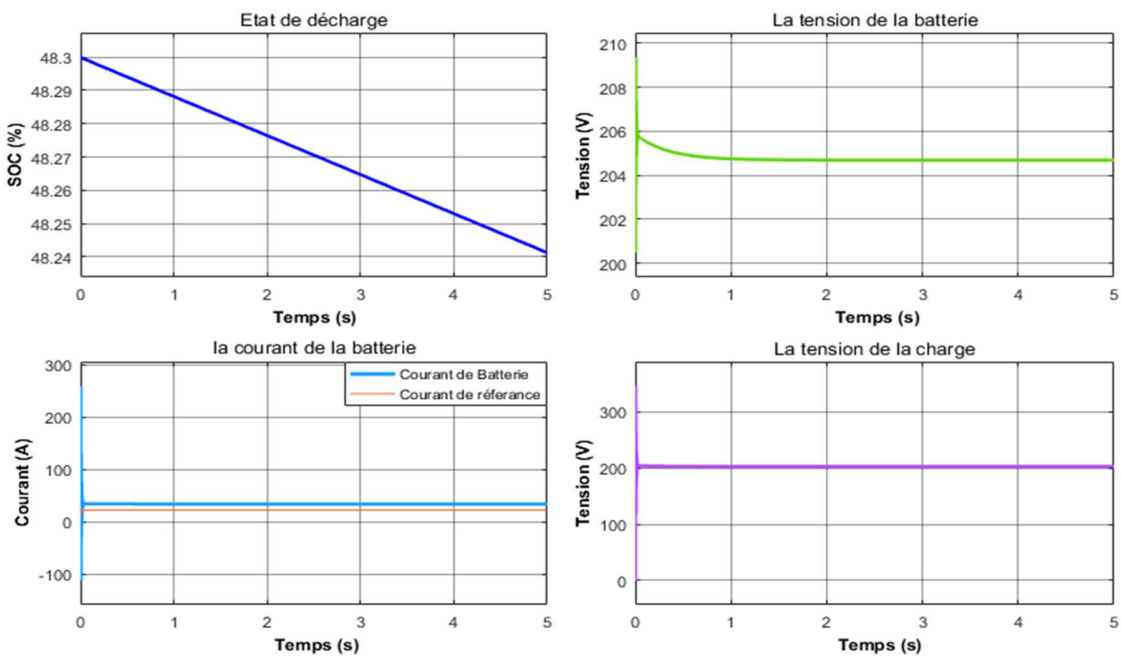


Figure III. 21 : Résultats de simulation de la batterie en cas de décharge.

III.5.1.3 Interprétation des résultats :

Le niveau de stockage de la batterie change en fonction de chaque état :

- dans l'état de décharge, le niveau de stockage de la batterie (SOC) diminue.
- dans l'état de charge, le niveau de stockage de la batterie (SOC) augmente.

La valeur de la tension de la batterie dans le cas de la charge est de 52.15 (V) tandis que le courant est de -22 (A)

Contrairement à l'état décharge, la valeur de la tension est 51.8 (V) et le courant est 20 (A)

III.6 Simulation du Générateur Photovoltaïque et Batterie :

La simulation d'un générateur photovoltaïque et d'une batterie dans MATLAB permet d'évaluer et de prédire les performances d'un système solaire autonome. Elle permet de prendre des décisions éclairées sur la conception et l'optimisation du système, et peut être utilisée pour l'étude de différentes conditions de fonctionnement et de scénarios d'utilisation.

La simulation d'un générateur photovoltaïque et d'une batterie est un moyen efficace d'évaluer et de prédire le fonctionnement d'un système solaire autonome la simulation d'un générateur photovoltaïque et d'une batterie :

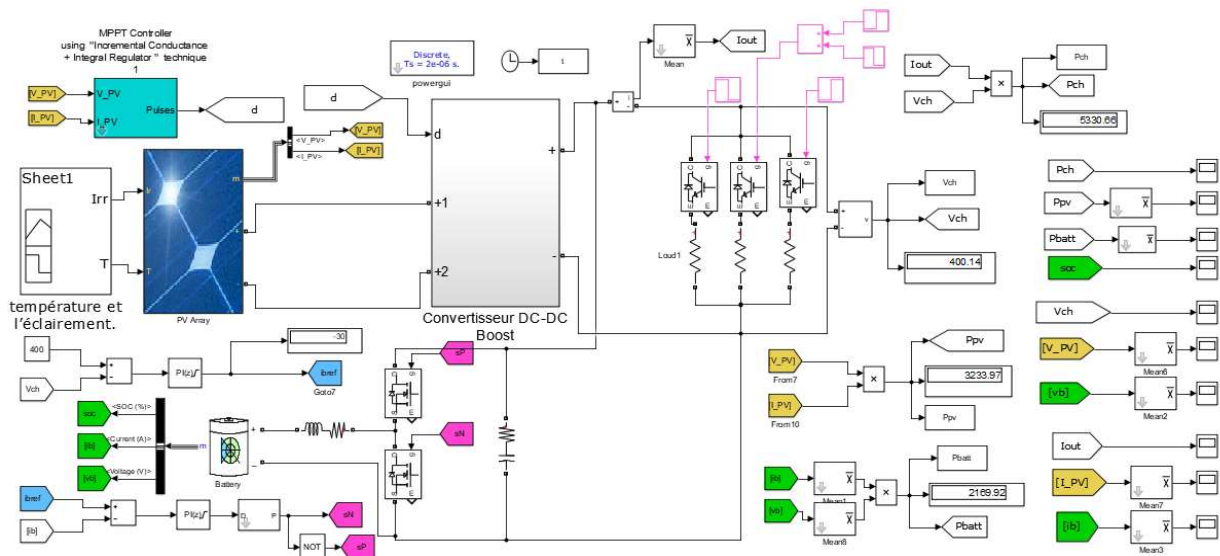


Figure III. 22 : Résultats de simulation de la batterie en cas de décharge.

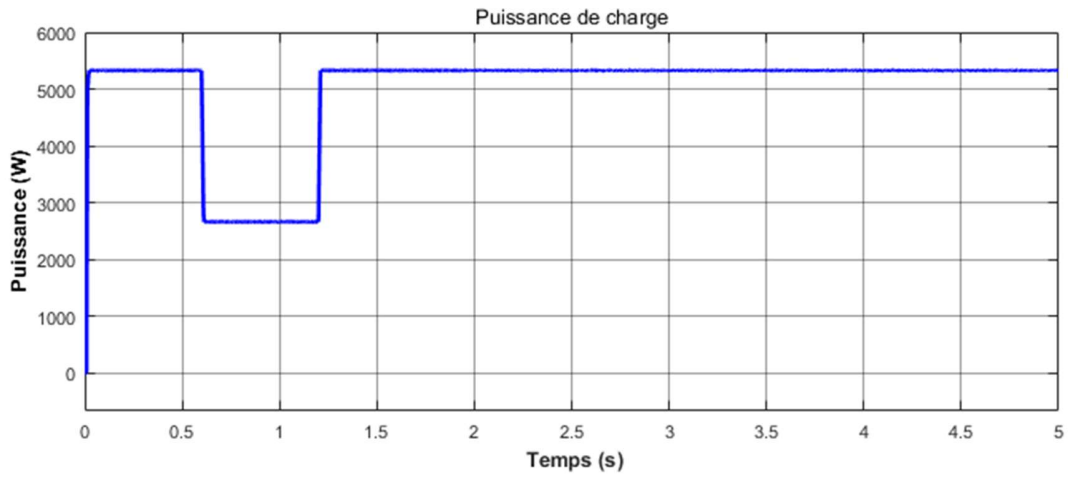


Figure III. 23 : La puissance sortie de la charge.

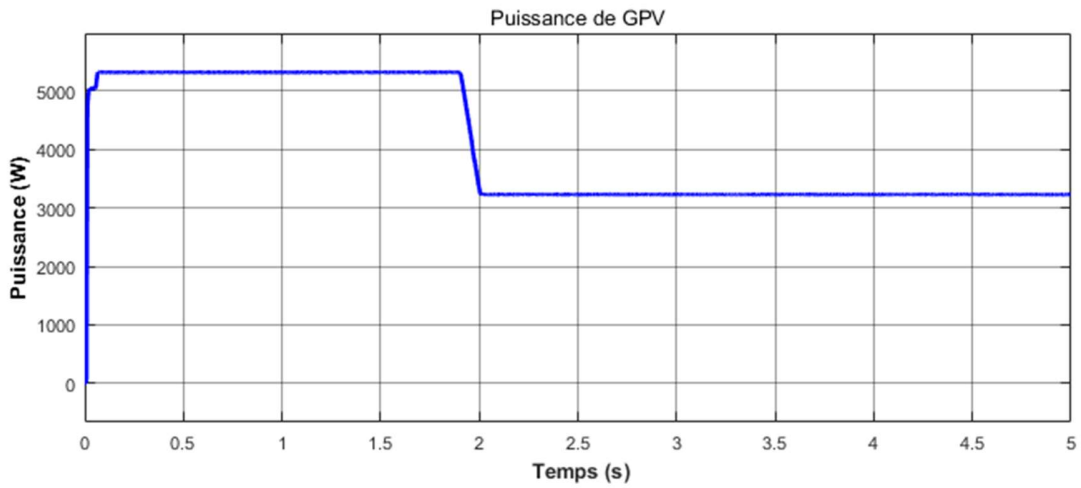


Figure III. 24 : La puissance sortie de GPV.

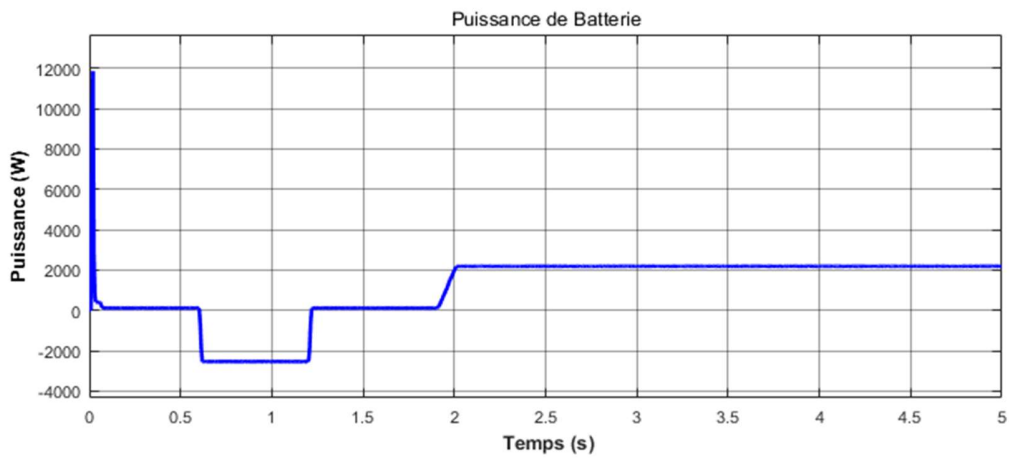


Figure III. 25 : La puissance sortie de Batterie.

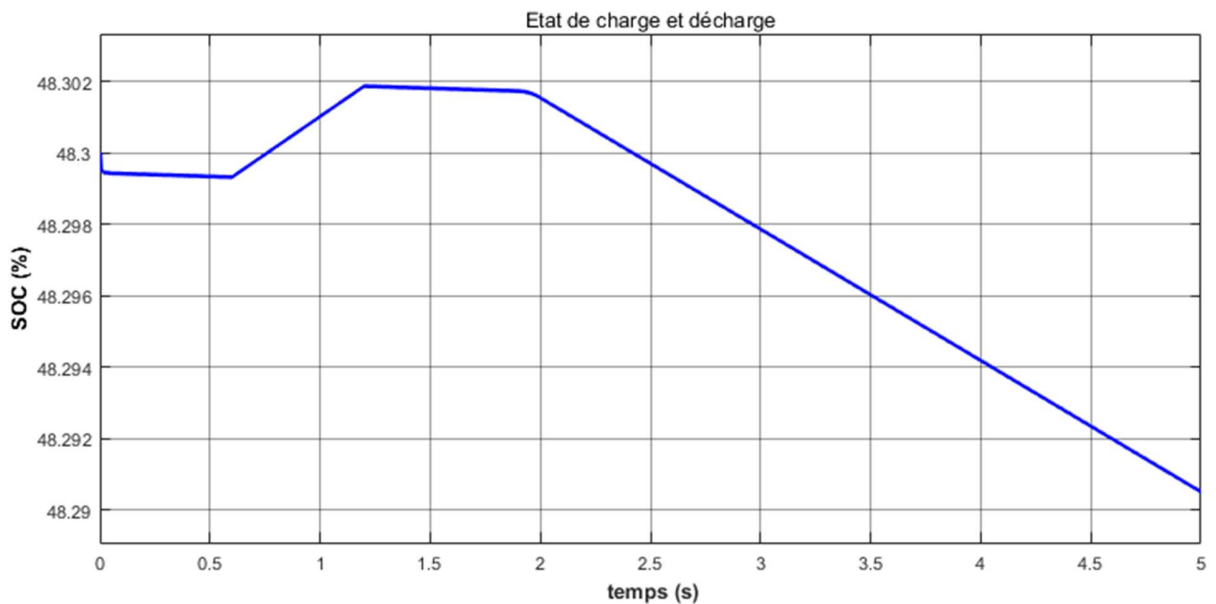


Figure III. 26 : Etat de charge et décharge.

III.6.1.1 Interprétation des résultats :

Fig.III.23 :

- **La période [0 – 2] s = 1000Wh/m²** : On observe que le système solaire a fonctionné efficacement pour donner une Puissance de 5320W.
- **La période [2 – 5] s = 600Wh/m²** : événements d'atterrissage brusque aux panneaux solaires à une Puissance de 3233.97W.

Fig.III.22 :

- On Applique une variation de la charge à l'instant [0,6 – 1,2] s ce qui a entraîné une diminution de la consommation de 5328,23W à 2664W pour revenir à la consommation normale de [1,2 – 5] s.

Fig.III.24 et Fig.III.25 :

- **La période [0 – 0,6] et [1,2 – 2] s** : Notez que la batterie en cas de stagnation (ne fonctionne pas) ne se charge pas ou décharge parce que la puissance qui alimente la charge ne peut pas charger la batterie ou la batterie fournit une Puissance.
- **La période [0,6 – 1,2] s** : La batterie se charge là où Puissance négative -2534W lorsque la charge est courte.

La période [2 – 5] s : Pendant cette période, la batterie est déchargée pour fournir la Puissance de 2169.92W pour compenser compensant ainsi le manque puissance de GPV atteignant 3233.97W que la puissance des GPV avec la puissance de la batterie est égale à la puissance de la charge

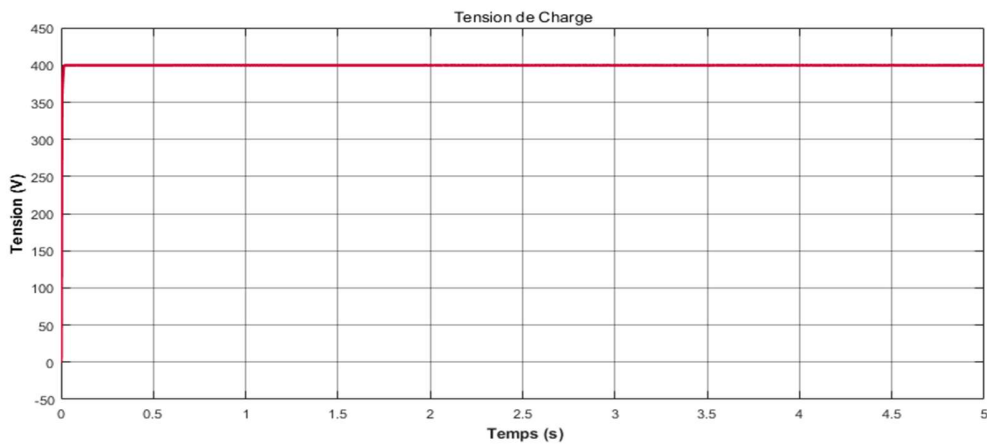


Figure III. 27 : La Tension sortie de la charge.

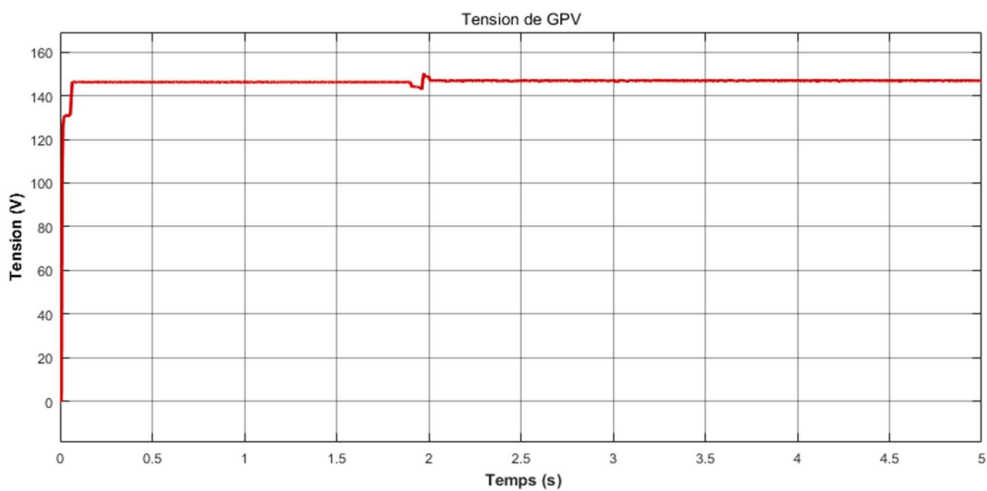


Figure III. 28 : La Tension sortie de la GPV.

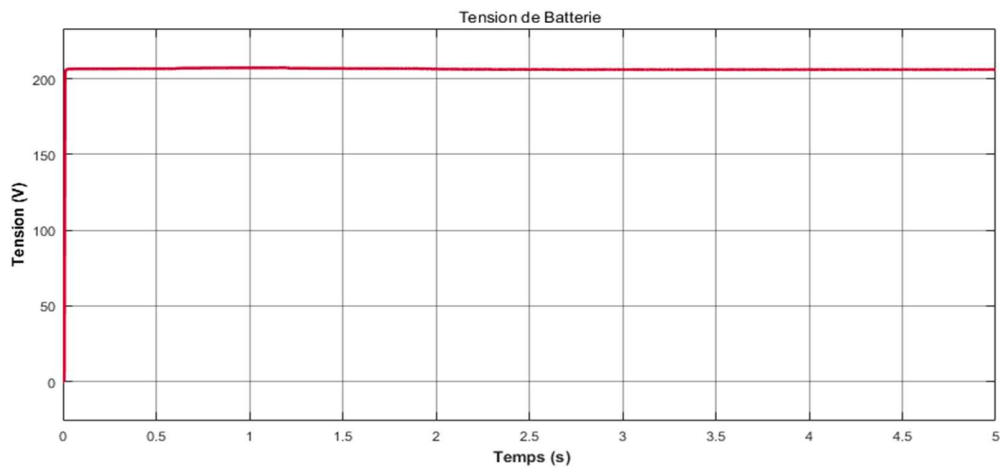


Figure III. 29 : La Tension sortie de la batterie.

Au cours de notre étude, nous avons constaté que le courant était maintenu de manière constante pour la charge, les panneaux solaires et la batterie, même en présence de variations de la charge et de l'irradiation. La tension demeurait proportionnellement constante, avec une tension de charge de 400 V, des panneaux solaires à 146,2 V et une batterie à 207,2 V

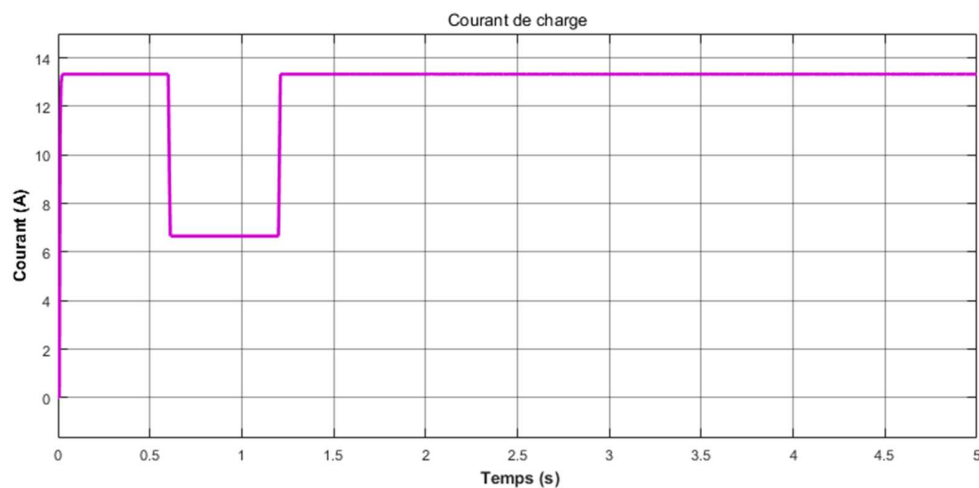


Figure III. 30 : La courant sortie de la charge.

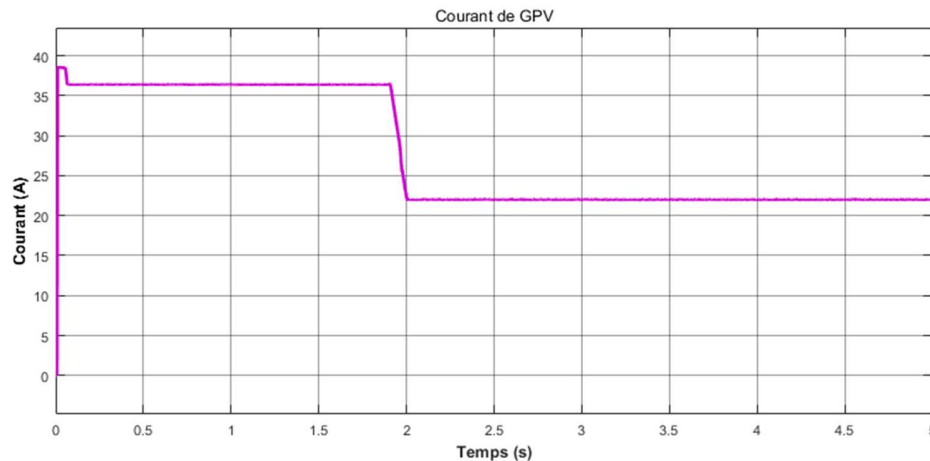


Figure III. 31 : La courant sortie de la GPV.

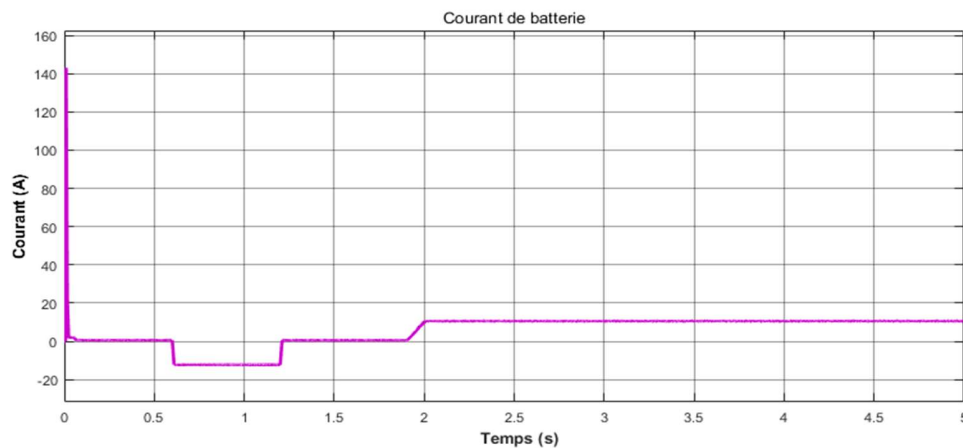


Figure III. 32 : La courant sortie de la batterie.

- **La période [0 – 2] s = 1000Wh/m²** : On observe que le système solaire a fonctionné efficacement pour donner une Courant de 36,37 A.
- **La période [2 – 5] s = 600Wh/m²** : événements d’atterrissage brusque aux panneaux solaires à une courant de 22,05 A.
- **La période [0 – 0,6] et [1,2 – 2] s** : Notez que la batterie en cas de stagnation (ne fonctionne pas) ne se charge pas ou décharge parce que la Courant qui alimente la charge ne peut pas charger la batterie ou la batterie fournit une Courant.
- **La période [0,6 – 1,2] s** : La batterie se charge là où Courant négative -12,24 A lorsque la charge est courte.

- **La période [2 – 5] s** : Pendant cette période, la batterie est déchargée pour fournir la courant d'ouverture et fermeture 10.58 A pour compenser compensant ainsi le manque puissance de GPV atteignant 3233.97W

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les modèles Simulink de chaque composant des chaînes de conversion photovoltaïque avec batteries le convertisseur élévateur. À partir des simulations, nous avons conclu qu'il est réalisable d'utiliser le système hybride en employant une commande pour gérer le fonctionnement, où chaque composant est utilisé selon les besoins. Les résultats des simulations ont démontré le bon fonctionnement du système étudié, et ces résultats ont été présentés et commentés en détail.

De plus, ces résultats confirment l'efficacité du contrôleur (P&O) tout en démontrant un fonctionnement encore plus performant du contrôleur flou. Ce dernier a clairement démontré de meilleures performances avec une erreur en régime permanent très faible, témoignant ainsi de sa robustesse et de sa fiabilité.

Conclusion Général

Conclusion Général

Pour une utilisation dans des sites isolés, l'énergie photovoltaïque, tout comme toute autre source d'énergie intermittente, requiert un système de stockage électrique permettant de fournir de l'énergie sur demande. Actuellement, les batteries au plomb sont les plus largement utilisées en raison de leur coût abordable et de leur facilité de mise en œuvre. Cependant, pour améliorer leur durée de vie, il est essentiel d'étudier les mécanismes de corrosion et de vieillissement, tout en explorant de nouvelles voies de stockage. Ces domaines de recherche représentent des axes majeurs visant à prolonger la durabilité des batteries et à découvrir des alternatives de stockage innovantes.

Dans ce mémoire, nous avons fait la modélisation et la simulation du fonctionnement d'un système photovoltaïque commander par une technique MPPT rassurants la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV, et l'intégration de la batterie a un système photovoltaïque. Pour cela nous avons divisé notre travail en trois chapitres.

Le premier chapitre de ce travail porte sur un état de l'art des systèmes hybrides à énergies renouvelables, nous avons vu aussi le système hybride avec le système de stockage.

Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation sous Matlab Simulink du système hybride, qui est composé d'un générateur photovoltaïque, de l'hacheur boost élévateur, d'une batterie de stockage. Cette modélisation aide à faciliter la simulation dans le dernier chapitre.

Dans le dernier chapitre, nous avons fait la simulation de notre système hybride, d'abord dimensionnement de la puissance délivrée par le panneau, ainsi que de la puissance de la charge d'utilisation, la simulation de système de panneaux photovoltaïques, ensuite la commande MPPT, le système de stockage batterie, où nous avons vu le modèle de la charge, de la décharge, de la tension, du courant et du rendement de la batterie. Finalement nous avons simulé le système global étudié.

Enfin, ce que nous avons conclu à partir de cette étude, il apparait que le système hybride n'est pas sans inconvénients. Comme suggestion, on doit ajouter la gestion pour améliorer ses performances et réduire ses inconvénients.

Bibliographie

- [1] Z. MEZIANI, « modélisation de modules photovoltaïques », Université de Batna 2, 2012.
- [2] B. Belabbas, « Gestion des flux énergétiques d'un système de production d'énergie de sources renouvelables avec stockage en vue de la conception des réseaux électriques intelligents "Smart GRID" », 2018.
- [3] S. Belaid, M. Zebboudj, T. Larfaoui, et D. Rekioua, « Gestion d'un système multi-sources (photovoltaïque-éolien) avec stockage par batteries », Université A. mira-Béjaia, 2021.
- [4] K. Ferkous et A. Bentounsi, « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », 2017.
- [5] A. A. A. ATIA Tarek, « Modélisation des convertisseurs statiques Dc-Dc pour des applications Dans les énergies renouvelables (En utilisant MATLAB/Simulink) ».
- [6] P. Davies, A. Boisseau, D. Choqueuse, F. Thiebaud, et D. Perreux, « Durabilité des composites pour énergie marine renouvelable », *Matér. Tech.*, vol. 100, n° 6-7, p. 653-663, 2012.
- [7] L. Boisgibault et R. Woessner, *Energies*. Atlante, 2014.
- [8] Badi Mossab Abd raouf, « Turbinage des eaux usées (réalisation d'un modèle prototype) ». juillet 2019.
- [9] R. BONNEFILLE, « Sur l'énergie marémotrice renouvelable et prévisible sans aléas ».
- [10] M. Andreica, S. Bacha, D. Roye, et J. Guiraud, « Intégration d'une hydrolienne au réseau, MPPT et qualité de l'énergie », *Rev. Énerg. Renouvelables*, vol. 11, n° 4, p. 493-502, 2008.
- [11] A. E. Naili et L. Messaoudi, « Valorisation énergétique de la biomasse en Algérie et prospective à l'horizon 2050 ».
- [12] M. DAHEUR et S. A. E. TAINI, « Etude et simulation du système hybride PV/Pile à combustible/Batterie », 2020.
- [13] A. Redjradj et D. Aouzellag, « Etude, dimensionnement et simulation d'un système hybride photovoltaïque-diesel alimentant une habitation isolée », Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2016.
- [14] P. Thounthong, « Conception d'une source hybride utilisant une pile à combustible et des supercondensateurs », Institut National Polytechnique de Lorraine-INPL, 2005.
- [15] T. Massitan, « Gestion du système photovoltaïque d'une alimentation privée connecté au réseau », *Mém. Master En Sci. Technol. Fac. Sci. L'ingéniorat Dép. D'électrotechnique Univ. BADJI MOKHTAR-ANNABA*, 2017.
- [16] T. T. GUINGANE, Z. KOALAGA, E. SIMONGUY, F. ZOUGMORE, et D. BONKOUNGOU, « Modélisation et simulation d'un champ photovoltaïque utilisant un convertisseur élévateur de tension (boost) avec le logiciel MATLAB /SIMULINK », 2016, doi: 10.18145/JITIPEE.V11I2.80.G59.
- [17] Z. Bahous, « sont chères, mes deux chers parents pour leurs soutiens, A tout ma grande famille Zellouta Sans oublier tous mes amis ».
- [18] M. Y. GOHMES, B. DJELLALI, et A. DJEDAI, « Modélisation et commande d'un système PV connecté au réseau électrique utilisant DSTATCOM », UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
- [19] S. Fatiha, « Implémentation d'un régulateur de type trois pour convertisseur DC-DC sur DSP », UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA, 2017.
- [20] M. M. Nadjib et H. C. Eddine, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau », 2013.
- [21] S. Sarri, H. Boutefaha, et D. E. Lalili, « Commande en MPPT d'une chaîne photovoltaïque à base d'un hacheur multiniveaux. », Université de Jijel, 2020.
- [22] B. Bendib, « Une nouvelle approche de modélisation et de commande des systèmes photovoltaïques autonomes », 2018.
- [23] M. Bencherif, « Modélisation des paramètres d'une batterie Plomb-Acide, et son intégration dans un système photovoltaïque autonome », 2015.

- [24] O. Gergaud, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2002.
- [25] M. LAMARA, « Etude comparative des algorithmes P&O et Inc-Cond pour l'optimisation d'un système photovoltaïque (PV) autonome », university of M'sila, 2022.
- [26] M. Dahmani, « Conception et réalisation d'une commande MPPT par la méthode P&O à base d'un microcontrôleur PIC16F876 », 2014.