



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Amar Thelidji - Laghouat

FACULTE : TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT : Electronique

MEMOIRE DE MASTER

Présenté par : Melle TAKHI Halima

DOMAINE : Sciences et Technologies
FILIERE : Électronique
OPTION : Électronique des systèmes embarqués

Thème

**Technique MPPT pour un système photovoltaïque à
base d'un algorithme d'optimisation globale**

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
Mr ROUGAB Ilyes	MCB	Examineur
Mr MOHAMMED Silla	MCB	Encadrant
Mr RAHMANI Abdallah	MCB	Président

Promotion : 2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ

الرَّحِيمِ

Remerciements

Remerciements

C'est avec un grand plaisir que je consacre ces quelques lignes en signe de gratitude et de reconnaissance à tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Je tiens à rendre un grand hommage à mon encadrant **Mr. Mohammed Yousri Silaa** qui a suivi de près ce projet avec le sérieux et la compétence qui le caractérisent, Ainsi que **Mr. Rougab Ilyes** et **Mr. Rahmani Abdellah** d'avoir accepté d'être membre de ce jury.

Dédicace

Dédicace

Je dédie ce mémoire

*A ma très chère maman, une amie et une confidente qui m'a soutenu
dans mes choix et a su toujours m'encourager quelques que soient les
difficultés que j'ai pu rencontrer tout au long de mon cursus, ainsi
qu'à mon cher papa*

A mes sœurs, Amira Hind , Rym et Fella Yasmine

A toutes mes cousines,

A mes amies, celles de toujours.

A Salah Eddine.

*Je ne manque pas l'occasion de remercier particulièrement ma très
chère amie Nada de m'avoir procuré l'aide quand
j'en avais besoin*

*Je dédie ce mémoire à tous ceux qui ont contribué de près et de loin
pour que je réussisse dans mes études.*

A decorative blue L-shaped line that frames the title from the top-left and bottom-right corners.

Table de matière

Liste de figures :	iii
Liste des tableaux :	iv
Abréviations et Symboles :	vi
Résumé :	vii
Introduction générale :	1
CHAPITRE I: Modélisation du système photovoltaïque	
I.1 Introduction :	1Error! Bookmark not defined.
I.2 Rayonnement Solaire :	3
I.3 Energie solaire photovoltaïque :	4
I.4 L'effet photovoltaïque :	4
I.5 Générateur Photovoltaïque GPV :	5
I.6 Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque :	6
I.7 Grandeurs caractéristiques :	7
I.8 Groupement de Cellules Photovoltaïques :	8
I.9 Implémentation du champ PV sous Simulink :	8
I.10 Résultats et analyses :	11
I.11 Conclusion:	13
CHAPITRE II: Étude des convertisseurs DC/DC	13
II .1 Introduction:	14
II.2 Connexion directe entre la source et la charge :	14
II.3 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge	15
II.4 Convertisseurs DC-DC :	15
II.5 Convertisseur élévateur (Boost)	16
II.6 Convertisseur abaisseur (Buck)	18
II.7 Convertisseur élévateur - abaisseur (Buck-Boost)	20
II.8 Implémentation de l'hacheur Boost sous Simulink :	22
II.9 Résultats et analyses:	23
II.10 Conclusion:	24

CHAPITRE III: Commande MPPT et simulation	24
III.1 Introduction:.....	25
III.2 Principe De La Commande MPPT.....	25
III.3 Différents types de commandes MPPT.....	26
III.4 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche.....	27
III.5 Algorithmes de recherche du point de puissance maximale (MPPT).....	27
III.6 Méthode basée sur la tension du circuit ouvert.....	28
III.7 Méthode basée sur le courant de court-circuit.....	28
III.8 Algorithme basé sur la perturbation et l'observation (P&O).....	29
III.9 Algorithme à partir de l'incrément de conductance.....	31
III.10 Algorithme basé sur la logique flou.....	32
III.11 Méthode basée sur les réseaux de neurones artificiels (ANN).....	35
III.12 Conception du réseau de neurones Deep Learning.....	36
III.13 Résultats et analyses:.....	37
III.14 Conclusion:.....	49
Conclusion générale.....	50
Références bibliographiques.....	52



Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1 Répartition spectrale du rayonnement	4
Figure I.2 Composants d'un GPV.	6
Figure I.3 Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque	6
Figure I.4 Schéma du calcul de I_0 sous Simulink.	9
Figure I.5 Schéma du calcul de I_{rs} sous Simulink.	9
Figure I.6 Schéma du calcul de I_{sh} sous Simulink	9
Figure I.7 Schéma du calcul de I_{ph} sous Simulink.	10
Figure I.8 Schéma du calcul de I sous Simulink	10
Figure I.9 Schéma du système complet sous Simulink.	10
Figure I.10 Influence de la température sur le courant du GPV.	11
Figure I.11 Influence de la température sur la puissance du GPV.	11
Figure I.12 Caractéristiques de puissance du champ PV pour une variation de l'éclairement.	12
Figure I.13 Caractéristiques de puissance du champ PV pour une variation de l'éclairement.	12
Figure II.1 Principe d'une connexion directe entre un GPV et une charge.	14
Figure II.2 Schéma de principe d'un hacheur	16
Figure II.3 Convertisseur élévateur (Boost).....	16
Figure II.4 Tensions et courants d'entrée et de sortie en D et T_s pour un Boost.	17
Figure II.5 Circuit électrique d'Hacheur abaisseur	18
Figure II.6 Forme d'ondes des tensions et des courants d'entrée et de sortie du « Buck » en fonction du rapport cyclique D et la période T_s	19
Figure II.7 Circuit équivalent du convertisseur Buck-Boost.	20
Figure II.8 Tensions et courants du convertisseur Buck-Boost	21
Figure II.9 Simulation de l'hacheur boost.	22
Figures II.10 Résultats de simulation de la tension d'entrée de l'hacheur survolteur.....	23
Figures II.11 Résultats de simulation de la tension de sortie du hacheur survolteur.	23
Figure.III.1 Chaîne de conversion d'énergie solaire.	25
Figure III.2 Organigramme de l'algorithme P & O.	30
Figure III.3 Algorithme P&O sous l'évolution rapide d'irradiation.	31
Figure III.4 Forme d'un neurone artificiel.....	32

Liste des figures

Figure III.5 Simulation avec la methode P & O.....	34
Figure III.6 Courbe d'un pas de rapport cyclique égal à 0.01	34
Figure III.7 Tension du sortie DC/DC boost.....	35
Figure III.8 Puissance de sortie DC/DC boost	35
Figure III.9 Courant de sortie du DC/DC boost.....	36
Figure III.10 Puissance de sortie DC/DC boost.	37
Figure III.11 Tension du sortie DC/DC boost.....	37
Figure III.12 Courant de sortie du DC/DC boost.....	38
Figure III.13 Face avant de la commande.....	39
Figure III.14 Schéma de simulation pour la commande MPPT par ANN.....	40
Figure III.15 Valeurs variables de Température	41
Figure III.16 Valeurs variables de l'Irradiation.	41
Figure III.17 Variation de courant du hacheur Boost.....	42
Figure III.18 Variation de la puissance du hacheur Boost.....	42
FigureIII.19 Variation de la tension du hacheur Boost	43
FigureIII.20 Variation de courant du hacheur Boost.....	44
FigureIII.21 Variation de la puissance du hacheur Boost.....	44
FigureIII.22 Variation de la tension du hacheur Boost	46



Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Les valeurs qui caractérisent le hacheur Boost.....	22
--	----

Abréviations et Symboles

Abréviations et Symboles

E : Eclairement (W/m^2).

I_{Ph} : Le photo-courant (A).

I : Le courant généré par la photopile(A).

I_{RS} : Le courant de saturation inverse de la diode.

I_0 : Le courant de saturation.

I_{sc} : Le courant du court-circuit(A).

I_{PV} : Courant délivré par le générateur PV (A).

V : la tension aux bornes de la cellule(V).

q : La charge de l'électron $=1,6.10^{-19}$ C.

R : La résistance série (Ω).

R_{sh} : La Résistances shunt (Ω).

T: La température de fonctionnement en Kelvin.

n : le facteur d'idéalité de la diode.

I_{sh} : Le courant de la résistance shunt.

V_{CO} : Tension de circuit ouvert.

I_{CO} : Le courant de circuit ouvert.

I_{CC} : Courant de court-circuit.

F : Facteur de forme.

P_{PV} : la puissance disponible en sortie du GPV.

V_{PV} : la tension à la sortie du GPV.

I_{PV} : le courant de sortie du GPV.

N_s : cellules en série.

N_p : cellules en parallèle.

P : La puissance caractéristique(W).

V_{opt} : Tension optimale (V).

I_{opt} : Courant optimale (A).

G : L'éclairement de référence (1000 W/m^2).

L : Inductance du hacheur.

CS : Convertisseur Statique.

D : Rapport cyclique.

MPPT : maximum power point tracking

GPV : générateur photovoltaïque.

PPM : point de fonctionnement optimale.

DC-DC : conversion continu-continu.

P&O: Perturb and Observe.

Résumé

ملخص

يتأثر أداء النظام الكهروضوئي بشدة بالظروف البيئية التي يتعرض لها مثل التغيرات الجوية العشوائية. نظرا للخصائص الكهربائية غير الخطية للغاية للخلايا الكهروضوئية ومجموعاتها ، يمكن تحسين كفاءة الأنظمة الكهروضوئية من خلال الحلول القائمة على تقنيات MPPT.

يهدف هذا العمل إلى تحسين أداء النظام الكهروضوئي المرتبط بمحول DC / DC بسبب تغير المناخ. يقدم هذا العمل النهج الكامل لإجراء محاكاة للتحكم MPPT (الحد الأقصى لتتبع نقطة الطاقة) بناء على طريقة الاضطراب والمراقبة (P&O) وطريقة الشبكة العصبية. لهذا قمنا بنمذجة ومحاكاة النظام في البيئات: Matlab / Simulink. نقطة أخرى تمت مناقشتها هي المقارنة بين طريقة P&O الكلاسيكية وما يسمى بالطريقة الجديدة للشبكات العصبية ANN.

الكلمات المفتاحية: الكهروضوئي, الاضطراب والمراقبة, الحد الأقصى لتتبع نقطة الطاقة, الشبكات العصبية

La performance du système photovoltaïque est fortement affectée par les conditions environnementales auxquelles est soumis tels que les variations atmosphériques aléatoires. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules PV et de leurs associations, le rendement des systèmes PV peut être amélioré par des solutions à base des techniques MPPT.

Ce travail vise à améliorer les performances du système PV lié à un convertisseur DC/DC en raison du changement climatique. Ce travail présente la démarche complète pour réaliser une simulation de la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) en se basant sur la méthode de perturbation et observation (P&O) et la méthode des réseaux neurones. Une chaîne de commande a été réalisée entre le panneau photovoltaïque et la charge. Pour cela nous avons simulé le système dans l'environnement : Matlab/Simulink. Un autre point discuté est la comparaison entre la méthode classique P&O et la méthode dite nouvelle des réseaux de neurones ANN.

Mots clés : PV, convertisseur DC-DC, BOOST, MPPT. P&O, ANN.

Abstract

Due to the highly non-linear electrical characteristics of PV cells and their combinations, the efficiency of PV systems can be improved by solutions based on MPPT techniques.

This work aims to improve the performance of PV system linked to a DC/DC converter due to climate change.

It presents the complete procedure for simulating MPPT (Maximum Power Point Tracking) control, based on the perturbation and observation (P&O) method and the neural network method. A control chain was created between the photovoltaic panel. To do this, we simulated the system in: Matlab/Simulink. Another point discussed was the comparison between the classical P&O method and the new ANN neural network method.

A decorative blue L-shaped line that starts with a horizontal segment on the left, then turns 90 degrees downward, and finally turns 90 degrees to the right, forming a large 'L' shape that frames the text on the right side.

Introduction générale

Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par les émissions de gaz à effet de serre lors de leur utilisation, il est devenu essentiel de développer d'autres sources d'énergie alternatives. Les énergies renouvelables se présentent comme une solution écologique, offrant une alternative aux combustibles fossiles et à l'énergie nucléaire. Elles ont l'immense avantage d'être naturelles, inépuisables, non polluantes et parfaitement adaptées à une production décentralisée. L'exploitation de ces sources d'énergie permettrait de fournir de l'électricité aux zones isolées, éloignées des réseaux électriques, tout en évitant la nécessité de construire de nouvelles lignes électriques qui exigent des investissements importants [Huijbregts, M].

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) connaît une utilisation croissante dans diverses applications terrestres telles que l'éclairage, les télécommunications et le pompage [Sampaio, P]. Les systèmes PV fonctionnent sans avoir besoin de combustible externe, et les générateurs eux-mêmes ne contiennent aucune pièce mobile, ce qui réduit considérablement les besoins en entretien. Par conséquent, les coûts d'exploitation et de maintenance réguliers sont relativement bas. C'est pourquoi cette source d'énergie est particulièrement adaptée aux milieux ruraux, où les populations sont dispersées en petites communautés et où la demande énergétique est relativement faible [6].

Le générateur PV ayant une caractéristique courant-tension non linéaire et présentant un point de puissance maximale (PPM) [14]. Cette caractéristique dépend du niveau d'éclairement et de la température, ainsi que du vieillissement de l'ensemble. Le point de fonctionnement du générateur PV peut donc varier entre les points extrêmes correspondants au courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert. La détermination du point de fonctionnement du générateur PV dépend directement de la charge à laquelle il est connecté. La puissance maximale disponible est fournie seulement en un seul point de fonctionnement donné [19].

Afin d'optimiser l'utilisation de l'énergie fournie par le générateur photovoltaïque, l'utilisation de techniques d'optimisation, de régulation et de contrôle permet d'augmenter le rendement global du système photovoltaïque. Ces techniques permettent de transférer la puissance électrique maximale du générateur photovoltaïque à la charge, indépendamment des variations de l'éclairement et de la température. Cela permet une gestion efficace de l'énergie disponible, améliorant ainsi le rendement global de l'installation photovoltaïque [9].

Les techniques MPPT (maximum power point tracking) sont utilisées dans les systèmes photovoltaïques pour maximiser la puissance délivrée par le panneau photovoltaïques en

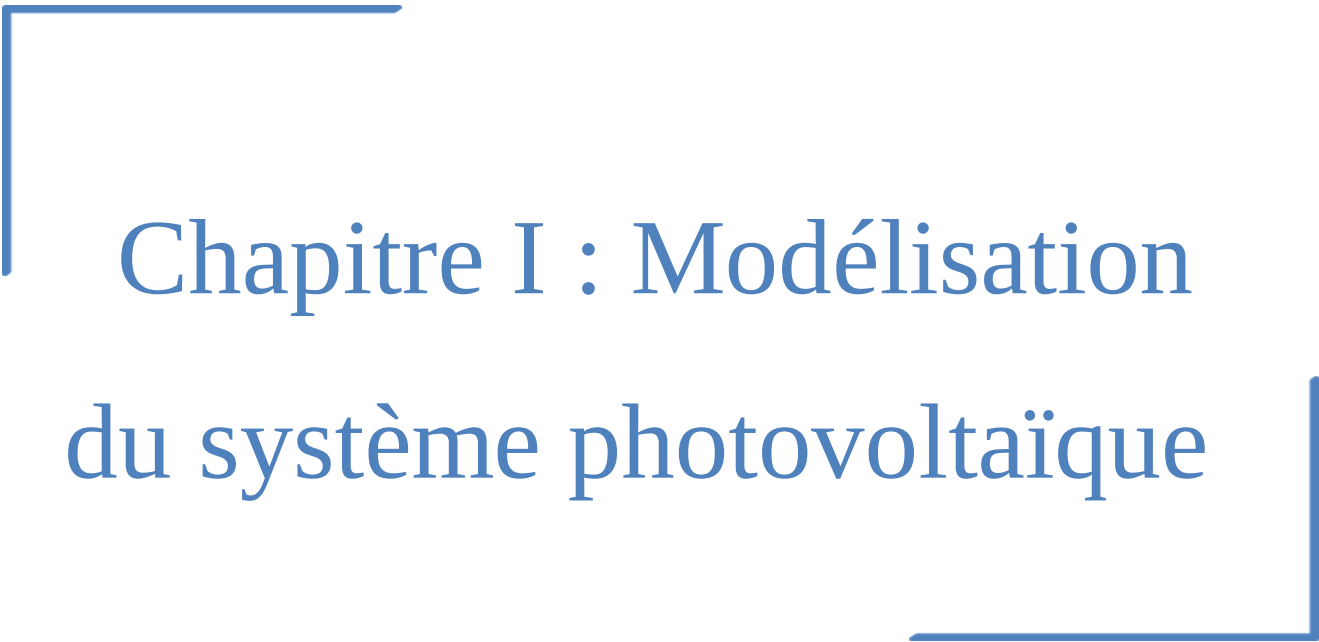
Introduction générale

poursuivant continuellement le point de puissance maximale, ce qui n'est pas évident à atteindre. En effet, ce problème de poursuite fait jusqu'à nos jours l'objet de plusieurs recherches [25].

Afin de mieux présenter notre travail, ce mémoire sera organisé comme suit :

On présente quelques généralités sur l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques et le modèle électrique et mathématique des cellules et modules photovoltaïques (générateur photovoltaïque). On illustre à travers des simulations l'influence des facteurs météorologiques (température et éclairage) sur les caractéristiques courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V) de mon générateur photovoltaïque.

On présente aussi la modélisation des convertisseurs DC/DC, en simulant le hacheur boost ainsi que le principe de la commande MPPT afin de l'appliquer dans notre système photovoltaïque. Les résultats d'optimisation de la puissance du générateur photovoltaïque par les deux méthodes P&O et réseaux de neurones artificiels obtenus par la simulation en utilisant Matlab/Simulink.



Chapitre I : Modélisation du système photovoltaïque

I.1 Introduction

La production d'énergie électrique est largement basée sur l'utilisation de combustibles fossiles et fissiles. L'utilisation généralisée de combustibles fossiles tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel permet de maintenir des coûts de production bas, mais entraîne également une émission considérable de gaz polluants et de gaz à effet de serre [22]. Selon les estimations, la production électrique à partir de combustibles fossiles est responsable de 40% des émissions mondiales de dioxyde de carbone (CO₂) [24].

L'énergie d'origine nucléaire qui ne rejette pas directement de gaz carbonique, souffre généralement d'une mauvaise image médiatique à cause des risques importants encourus. Certes, les risques d'accident liés à leur exploitation sont très faibles mais les conséquences d'un accident seraient désastreuses [7]. Par ailleurs, le traitement des déchets issus de ce mode de production est très coûteux : la radioactivité des produits traités reste élevée durant de nombreuses années. Enfin, les réserves d'uranium sont comme celles du pétrole limitées (moins de 100 ans au rythme actuel de consommation) [26].

Les énergies renouvelables sont parfois considérées comme une réponse au problème du changement climatique. Cependant, il est important de prendre en compte deux aspects complémentaires des politiques de gestion de l'énergie : les économies d'énergie d'une part, et les sources d'énergie renouvelable d'autre part. Cela permet de réduire la consommation d'énergies fossiles de manière globale.

I.2 Rayonnement solaire

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique qui se situe dans une bande de longueurs d'onde allant de 0,22 à 10 microns (μm). L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement avec une puissance moyenne de 1,37 kilowatt par mètre carré (kW/m²) à plus ou moins 3%. Cette puissance varie en fonction de la distance entre la Terre et le Soleil lors de sa rotation autour de celui-ci. Cependant, une partie de ce rayonnement est absorbée par l'atmosphère, ce qui fait que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre est généralement inférieure à 1,2 kW/m² (1200W/m²) [17]. La rotation et l'inclinaison de la terre entraînent également des variations de l'énergie disponible en un lieu donné en fonction de la latitude, de l'heure et de la saison. De plus, la présence de nuages, de brouillard, de particules atmosphériques et d'autres phénomènes météorologiques provoque des fluctuations horaires et quotidiennes qui modifient le rayonnement solaire et le rendent diffus. La figure I.1 représente la variation de la répartition spectrale énergétique [29].

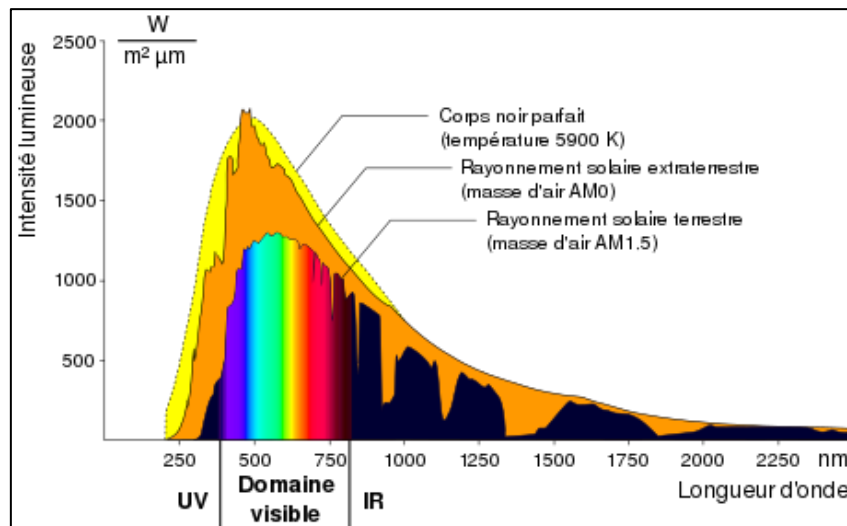


Figure I.1: Répartition spectrale du rayonnement.

I.3 Energie solaire photovoltaïque

Le photovoltaïque a été découvert en 1839 par Antoine Becquerel, qui est le grand-père d'Henri Becquerel, le découvreur de la radioactivité en 1896. Les modules photovoltaïques (PV) utilisés dans cette transformation présentent de nombreux avantages. Ils sont durables, fiables et les coûts associés à leur utilisation diminuent. De plus, ils nécessitent peu d'entretien car ils ne comportent aucune pièce mobile. Les modules photovoltaïques sont également entièrement silencieux et ne nécessitent que la lumière du soleil comme source d'énergie. Au cœur du photovoltaïque se trouve un matériau semi-conducteur qui a la capacité de libérer des électrons. Ces électrons sont des particules chargées négativement et constituent la base de la production d'électricité [27].

I.4 L'effet photovoltaïque

Le processus consiste à convertir l'énergie portée par les photons de la lumière en énergie électrique en entrant en collision avec des matériaux semi-conducteurs spécialement traités. Lors de cette collision, les photons transfèrent leur énergie aux électrons présents dans le matériau. Ces électrons sont alors mis en mouvement dans une direction spécifique, générant ainsi un courant électrique qui peut être recueilli par de fins fils métalliques. Ce courant peut être combiné avec celui provenant d'autres dispositifs similaires afin d'atteindre la puissance souhaitée pour une utilisation spécifique. En résumé, il s'agit de convertir l'énergie lumineuse en énergie électrique en utilisant des matériaux semi-conducteurs, permettant ainsi la création d'un courant d'électrons à travers un circuit externe [15.].

Pour permettre le transfert d'un électron de la bande de valence à la bande de conduction, une certaine quantité d'énergie est nécessaire, Les photons absorbés d'énergie supérieure à ce gap peuvent créer une paire d'électron trou, l'électron dans la bande de conduction et le trou dans la bande de valence. Pour obtenir un courant, on sépare l'électron et le trou en créant un champ électrique dans un semi-conducteur, une diode p-n. La zone n comporte un excès d'électron, la zone p un excès de trou, donnant naissance à un champ électrique séparant les charges créées par l'effet photovoltaïque. Une différence de potentiel s'établit aux bornes de la cellule photovoltaïque. [43]

I.5 Générateur Photovoltaïque GPV

En général, une cellule solaire, qui est l'unité de base d'un panneau solaire photovoltaïque, produit une puissance typique de 1,3 W pour une surface de 10 cm². Pour augmenter la puissance de sortie, des cellules solaires identiques sont regroupées pour former un module solaire, également appelé panneau photovoltaïque. La mise en série de plusieurs cellules solaires somme les tensions pour un même courant, tandis que la mise en parallèle somme les courants en conservant la tension. La plupart des panneaux solaires photovoltaïques destinés à un usage général sont composés de 36 cellules en silicium mono ou polycristallin connectées en série pour des applications en 12 V nominales. [39]

L'effet photovoltaïque se manifeste par l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction entre un métal et un semi-conducteur ou entre deux semi-conducteurs lorsque le dispositif reçoit un rayonnement lumineux de longueur d'onde adéquate. Ainsi une cellule photovoltaïque peut convertir l'énergie solaire en énergie électrique en mettant en jeu ce phénomène physique optoélectronique. Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium. Industriellement, les cellules à base de silicium monocristallin atteignent des performances de rendement énergétique de l'ordre de 13 à 14 %. Pour les cellules utilisant du silicium polycristallin, le rendement se situe généralement entre 11 et 12 %. En ce qui concerne le silicium amorphe en films minces, les performances de rendement atteignent environ 7 à 8 % [34].

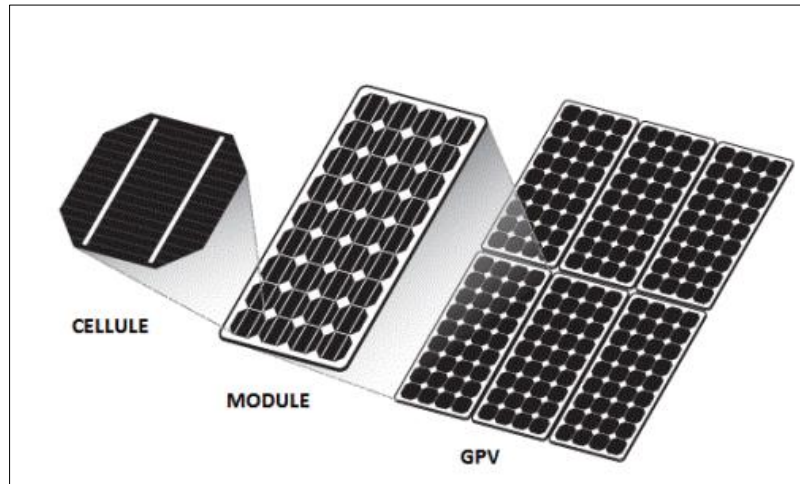


Figure I.2: Composants d'un GPV.

I.6 Modélisation D'une Cellule Photovoltaïque

Le champ PV est constitué de modules connectés en série et en parallèle pour obtenir la puissance souhaitée. Chaque module est lui-même composé de cellules. Pour la modélisation du champ PV, nous partirons donc de l'élément de base qui est la cellule.

De nos jours il existe plusieurs modèles électriques de la cellule : on a le modèle à une diode, à deux diodes, et à trois diodes. Le modèle à une diode offre un bon compromis entre simplicité et précision : il apparaît très adapté à notre étude. Ce modèle est constitué de photo-courant, de diode, de résistance parallèle, et de résistance série comme l'indique la Figure I.3 [30]

L'équation de la caractéristique tension courant de la cellule solaire est donnée par l'équation (I.1).

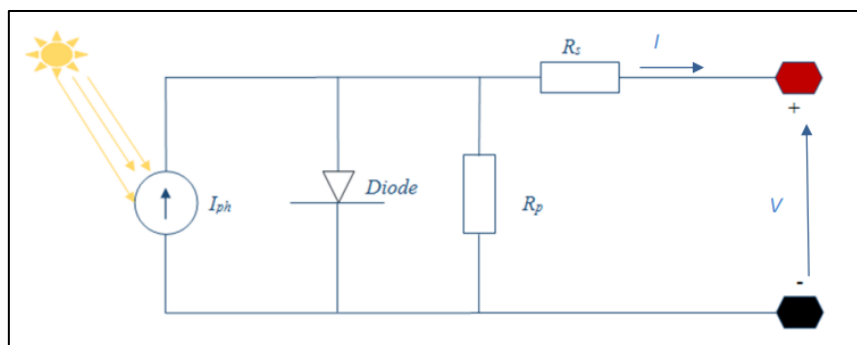


Figure I.3: Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.

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

- La résistance série R_s .
- La résistance shunt R_{sh} .
- Le photo courant I_{ph} :

$$I_{ph} = [I_{sc} + k_i \cdot (T - 298)] \cdot \frac{G}{1000} \quad (I.2)$$

- Le courant de saturation I_0 :

$$I_0 = I_{RS} \cdot \left(\frac{T}{T_n} \right)^3 \exp \left[\frac{q \cdot E_{g0} \cdot \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right)}{n \cdot K} \right] \quad (I.3)$$

- Le courant de saturation inverse de la diode I_{RS} :

$$I_{RS} = \frac{I_{sc}}{e^{\left(\frac{q V_{oc}}{n \cdot N_s \cdot K \cdot T} \right) - 1}} \quad (I.4)$$

- Le facteur d'idéalité de la diode n
- Le courant de la résistance shunt I_{RS} : w

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (I.5)$$

I.7 Grandeurs caractéristiques

- Tension de circuit ouvert V_{CO} (pour $I_{CO} = 0$).

On l'obtient en branchant directement un voltmètre aux bornes de la cellule.

- Courant de court-circuit I_{CC} (pour $V_{CC} = 0$): tension nulle correspondant au courant maximum.

On obtient sa valeur en branchant un ampèremètre aux bornes de la cellule.

- La puissance maximale d'une cellule.

Une cellule PV possède un point pour lequel sa puissance débitée est maximum. Ce point est tangent à une courbe d'iso puissance. On la nomme P_{max} .

- Facteur de forme.

On appelle facteur de forme f le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule P_{max} , dans des conditions d'éclairement, de température et de vitesse de circulation de l'air

ambient donnés, et le produit du courant de court-circuit I_{CC} par la tension de circuit ouvert V_{CO} (la puissance maximale d'une cellule idéale.

$$f = \frac{P_{max}}{V_{CO} \cdot I_{CC}}$$

I.8 Groupement de Cellules Photovoltaïques

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour N_s cellules en série, [Boualem Boukezata,2018] constituant des branches elles-mêmes N_p en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donné par :

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv}$$

Avec:

- P_{PV} : la puissance disponible en sortie du GPV.
- V_{PV} : la tension à la sortie du GPV.
- I_{PV} : le courant de sortie du GPV.

I.9 Implémentation du champ PV sous Simulink

Après avoir considéré que l'équation de la caractéristique tension courant de la cellule solaire est donnée par l'équation :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{n \cdot K \cdot N_s \cdot T} \right) \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (I.6)$$

- Les équations I_0 , I_{RS} , I_{Sh} , I_{Ph} sont représentés respectivement sous Simulink par les Figures I.4, I.5 I.6 et I.7, et la représentation sous Simulink de l'équation (1) est donnée par la Figure I.8.

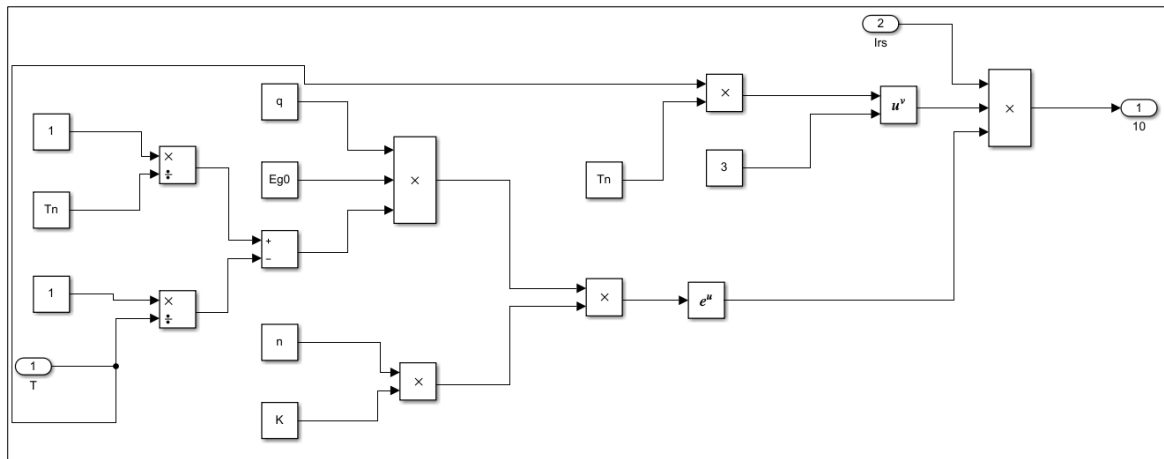


Figure I.4: Schéma du calcul de I_0 sous Simulink.

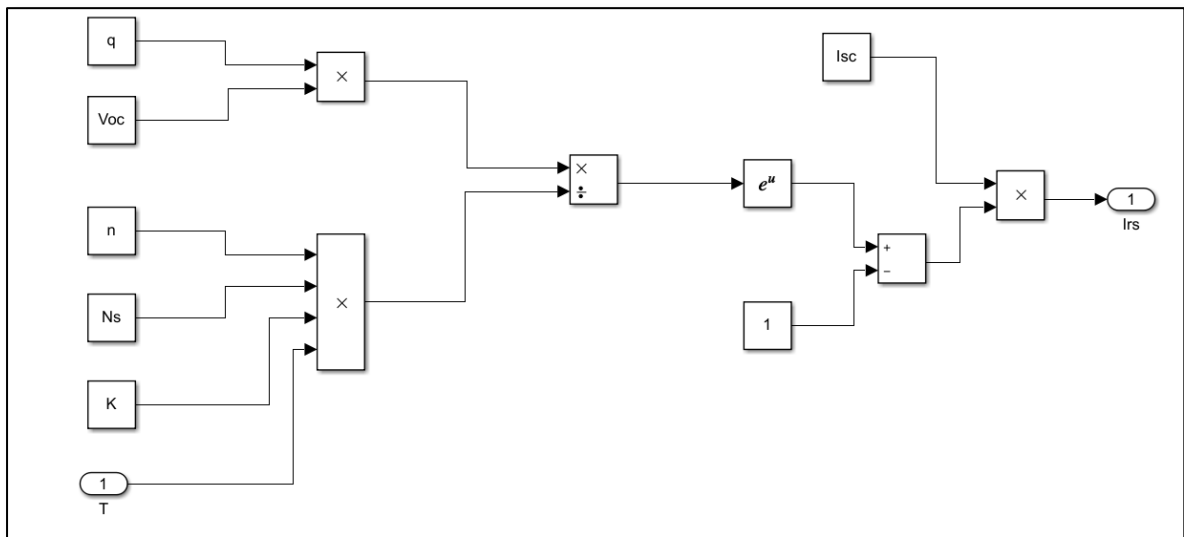


Figure I.5: Schéma du calcul de I_{rs} sous Simulink.

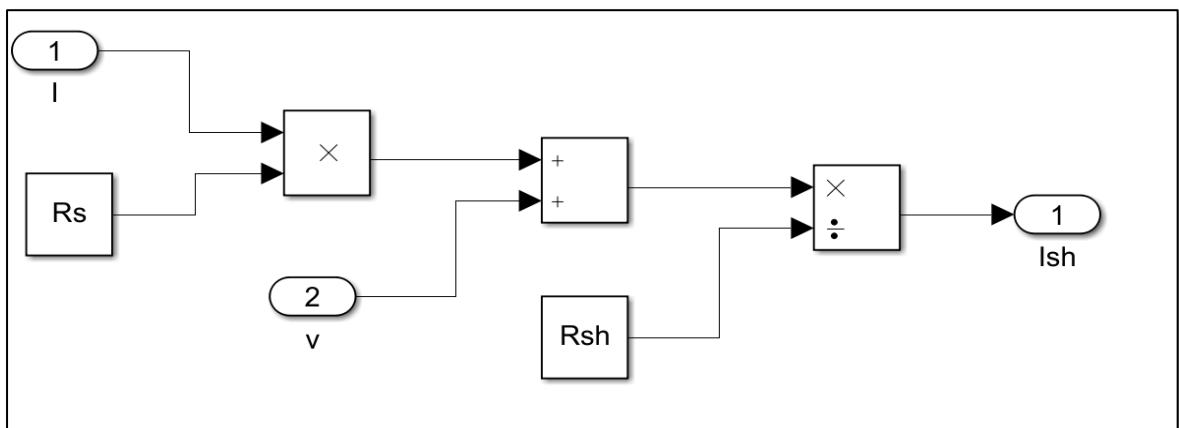


Figure I.6: Schéma du calcul de I_{sh} sous Simulink.

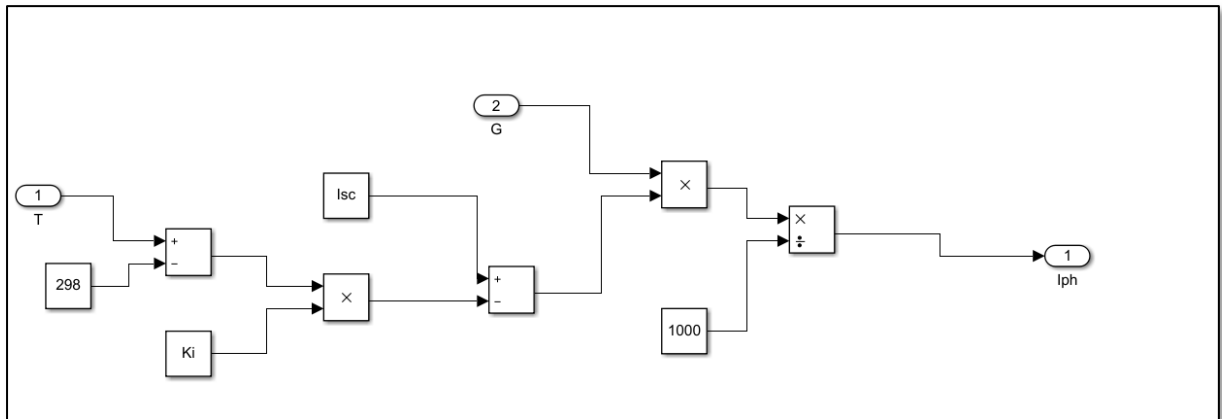


Figure I.7: Schéma du calcul de I_{ph} sous Simulink.

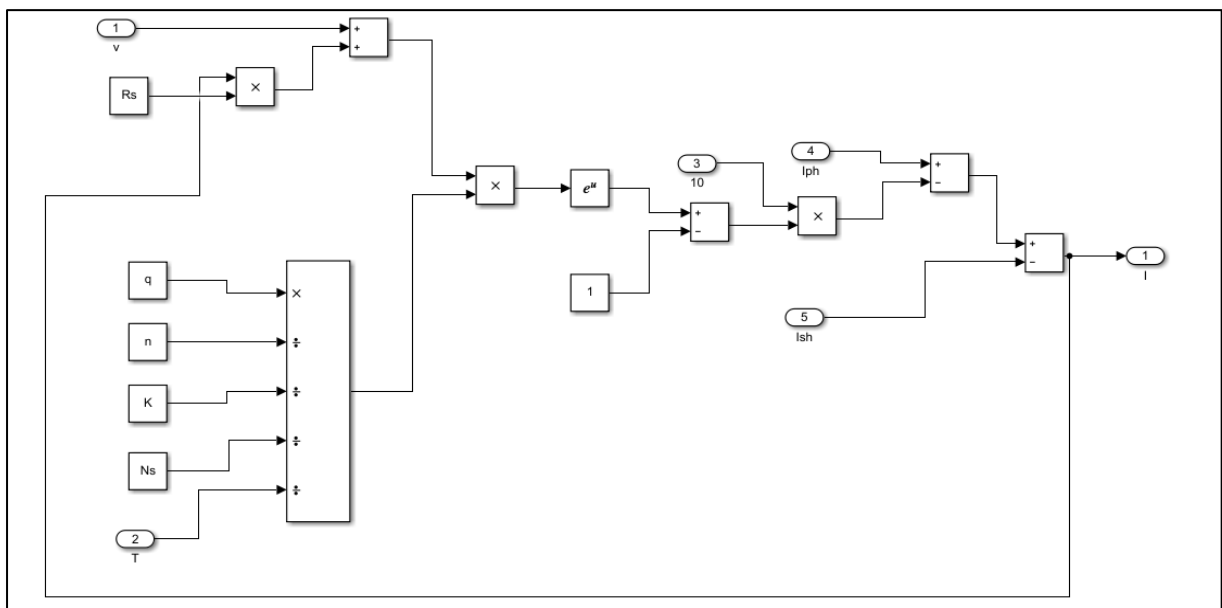


Figure I.8: Schéma du calcul de I sous Simulink.

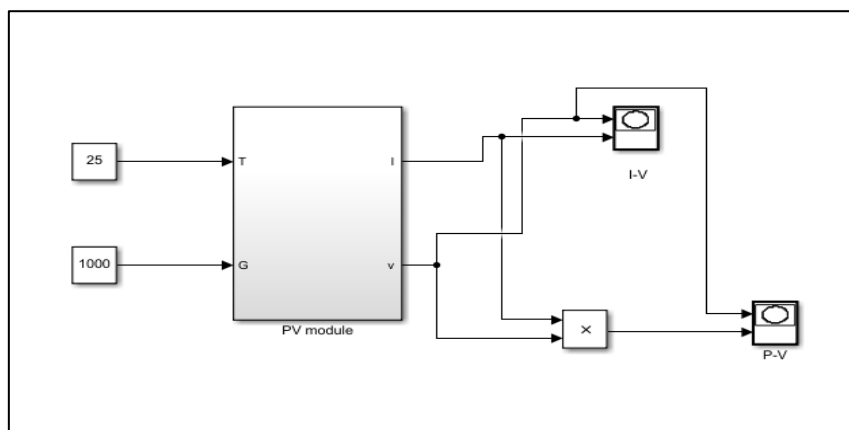


Figure I.9: Schéma du système complet sous Simulink.

Avec :

- $V_{mp} = 26.4 \text{ V}$
- $I_{mp} = 7.58 \text{ A}$
- $V_{oc} = 32.9 \text{ V}$
- $I_{sc} = 8.21 \text{ A}$
- $N_s = 54$
- $N_p = 1$

I.10 Résultats et analyses

Les simulations faites permettent d'obtenir les courbes I-V et P-V du champ PV pour différents éclairagements et températures. Après avoir fixé l'ensoleillement à 1000 W/m^2 et varier la température de 25°C jusqu'à 75°C , les allures obtenues sont présentées en dessous :

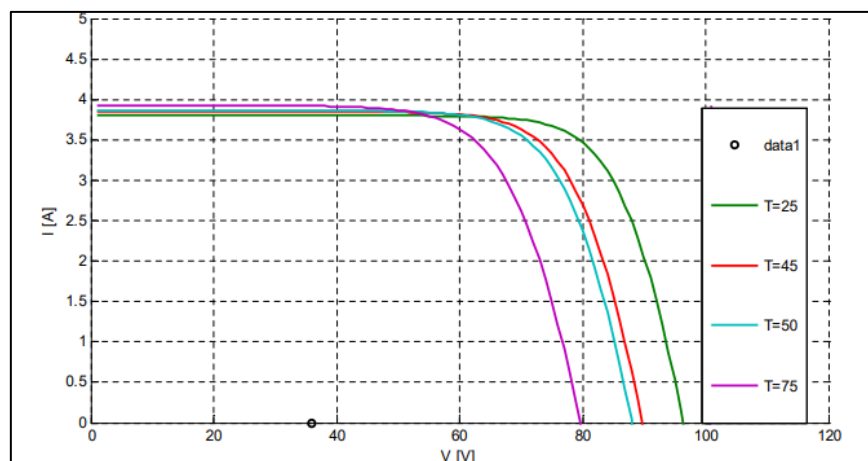


Figure I.10: Influence de la température sur le courant du GPV.

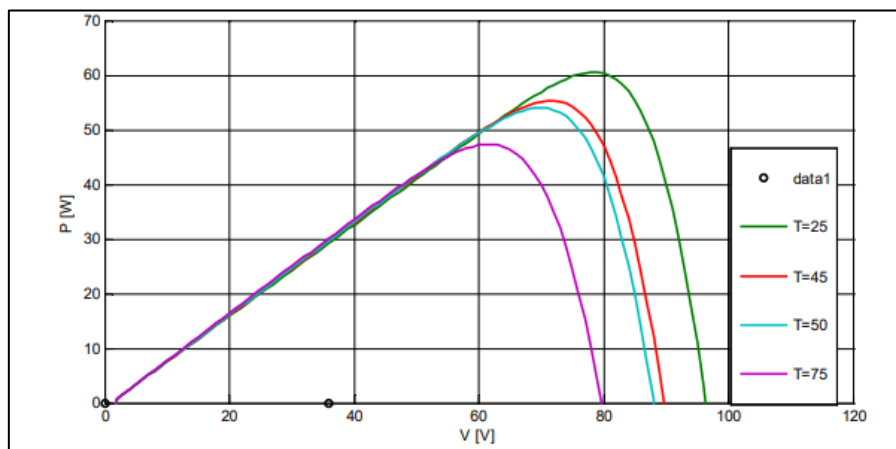


Figure I.11: Influence de la température sur la puissance du GPV.

- On observe que l'augmentation de la température entraîne principalement une diminution de la tension ce qui conduit à une baisse de la puissance du GPV diminue. La Figure I.11 montre qu'une augmentation de la température 25°C à 75°C engendre une chute de puissance de 25%.

On applique une température $T=25^{\circ}\text{C}$ constante et on varie l'ensoleillement (G) de 200 W/m^2 jusqu'à 1500 W/m^2 , les résultats obtenus sont illustrés par les figures suivantes.

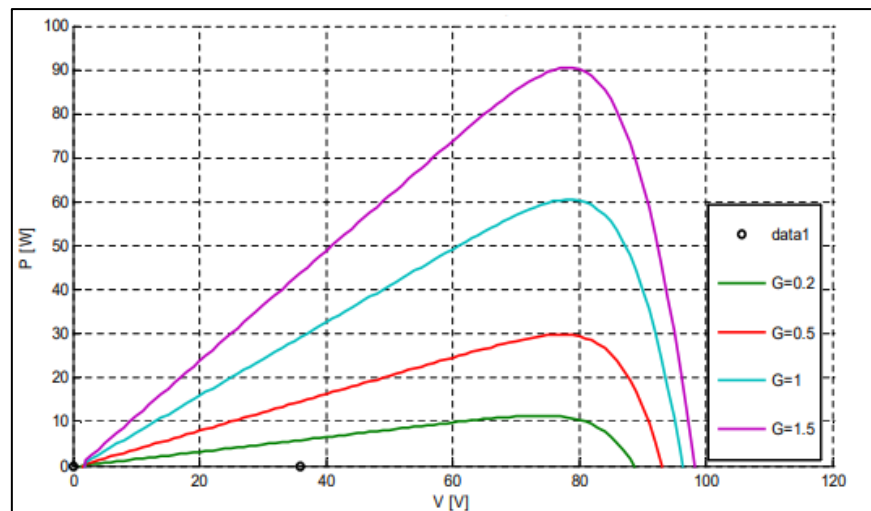


Figure I.12: Caractéristiques de puissance du champ PV pour une variation de l'éclairement.

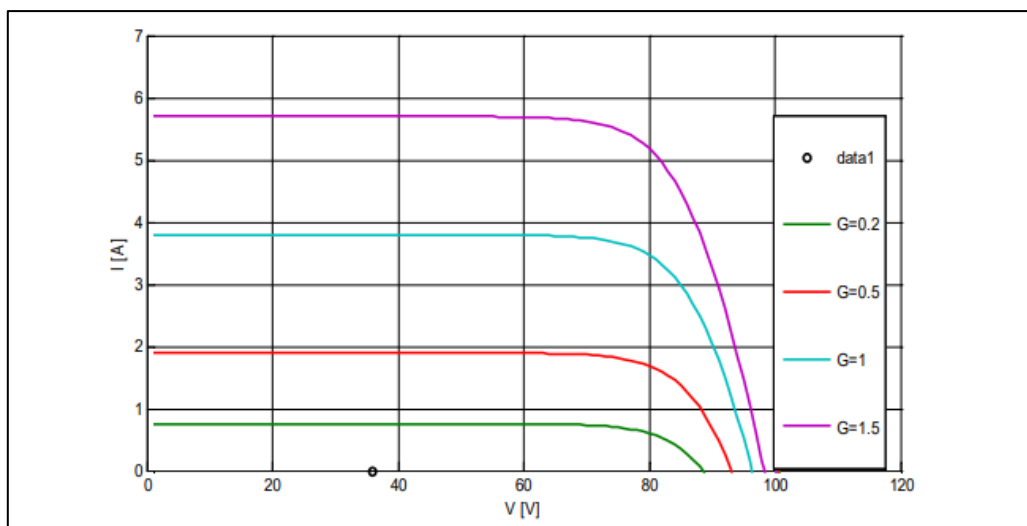


Figure I.13: Caractéristiques de courant du champ PV pour une variation de l'éclairement.

- La courbe courant-tension présente un décalage proportionnel aux variations de l'éclairement solaire. Une augmentation de l'ensoleillement entraîne principalement une augmentation du courant photovoltaïque (PV), ce qui engendre une augmentation de la puissance du PV.

I.11 Conclusion

Nous avons présenté, dans ce chapitre, les éléments et les notions de base d'un système photovoltaïque qui permettront de mieux comprendre le travail présenté dans ce mémoire. Après avoir exposé les diverses utilisations des systèmes photovoltaïques, nous nous sommes penchés sur le processus de conversion de l'énergie solaire en électricité à travers l'effet photovoltaïque. Nous avons présenté les modèles électriques et mathématiques correspondants. Nous avons également examiné l'effet des changements climatiques sur la caractéristique courant-tension ($I=f(V)$) du générateur photovoltaïque (GPV).



Chapitre II : Étude des convertisseurs DC/DC



II.1 Introduction

La conception d'un étage d'adaptation permet aujourd'hui de relier aisément un générateur photovoltaïque (GPV) à une charge de type continue (DC), avec un rendement de conversion très élevé. En réalité, le concept de cet étage correspond à la modélisation des fonctions basiques idéalisées d'un convertisseur à découpage continu-continu (DC/DC). Ce concept est nommé ainsi à cause des liens que le convertisseur crée entre ses quatre grandeurs électriques sur les ports d'entrée et de sortie qui sont ses courants et ses tensions d'entrée et de sortie [5].

Dans ce chapitre on va étudier la modulation de différent type des convertisseurs (DC /DC), et la simulation d'un hacheur survolteur.

II.2 Connexion directe entre la source et la charge

Dans le cas d'une connexion directe, qui est actuellement la méthode la plus couramment utilisée pour l'utilisation terrestre de l'énergie solaire, le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque dépend de l'impédance de la charge à laquelle il est connecté.

Actuellement, ce type d'application peut se résumer à un champ photovoltaïque ayant une tension V_{OPT} fixée par la tension nominale de l'application. Ce choix est principalement lié à la simplicité, la fiabilité et le faible coût de l'opération, (figure II.1). La présence de la diode antiretour est indispensable pour empêcher la circulation d'un courant négatif vers le module PV. [10]

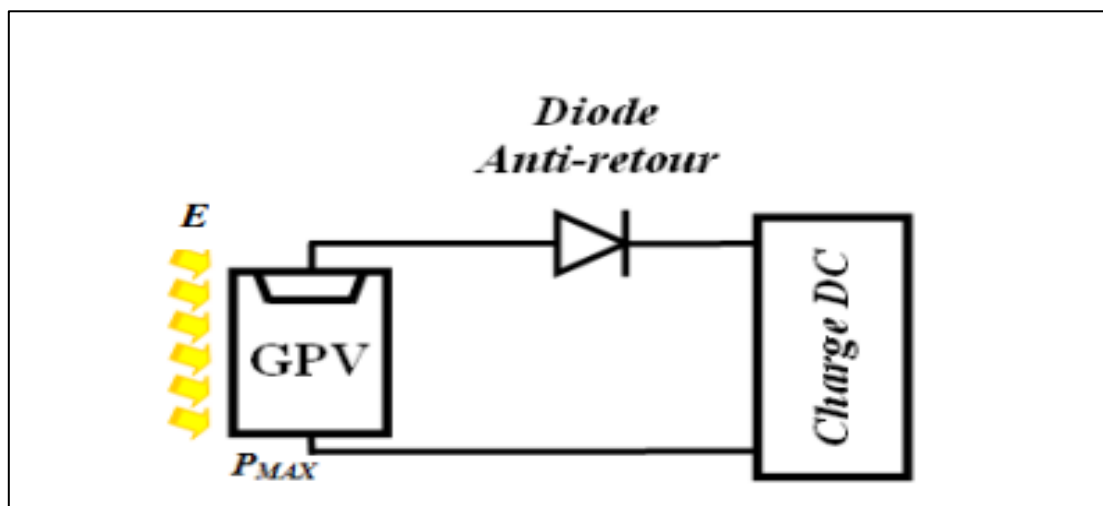


Figure II.1: Principe d'une connexion directe entre un GPV et une charge.

I.3 Étage d'Adaptation entre un Générateur PV et une Charge

Lorsqu'une batterie est connectée à un générateur photovoltaïque, si la tension de la batterie est systématiquement supérieure à la tension de circuit ouvert du générateur (VOC), aucun transfert de Puissance ne peut avoir lieu, l'un des intérêts à introduire un étage d'adaptation, est d'assurer que le transfert d'énergie est toujours possible et qu'il peut s'effectuer dans des conditions de fonctionnement optimales pour la source PV et la charge. Pour cela, il suffit d'effectuer un choix sur l'étage d'adaptation selon ses propriétés de conversion de puissance et la présence d'au moins un degré de liberté lui permettant d'adapter les tensions et les courants autant en valeur qu'en forme entre son port d'entrée et son port de sortie pour respecter au mieux les contraintes d'une part du GPV et d'autre part, de la charge.

L'électronique de puissance largement utilisée dans divers domaines de la conversion d'énergie offre plusieurs solutions potentielles sous forme de convertisseurs statiques (CS).

En résumé, selon l'application et le degré d'optimisation de production souhaités, l'étage d'adaptation entre le GPV et la charge peut être constitué d'un ou plusieurs convertisseurs statiques et permet d'assurer les fonctions suivantes :

Adapter les niveaux de tensions entre la source et la charge dans de grandes proportions si nécessaire (convertisseur Buck, Boost, ...),

Introduire une isolation galvanique (convertisseur Flyback, Forward, ...),

Connecter une charge avec des besoins d'alimentation de type alternative (onduleur). [37]

II.4 Convertisseurs DC-DC

Un Convertisseur DC-DC est un dispositif électrique qui permet de transformer une tension continue de valeur fixe en une tension continue réglable (Figure II .2). Il est constitué d'un interrupteur qui peut être un transistor ou un thyristor.

Il engendre une faible perte de puissance lors de basculement d'un état à un autre Ces convertisseurs garantissent des rendements de conversion d'énergie élevés et peuvent fonctionner à des fréquences élevées. Les caractéristiques dynamiques des convertisseurs DC/DC s'améliorent avec l'augmentation des fréquences de fonctionnement Les fréquences de fonctionnement élevées permettent donc de parvenir à une réponse dynamique plus rapide aux changements rapides dans le courant de charge ou de la tension d'entrée. [11]

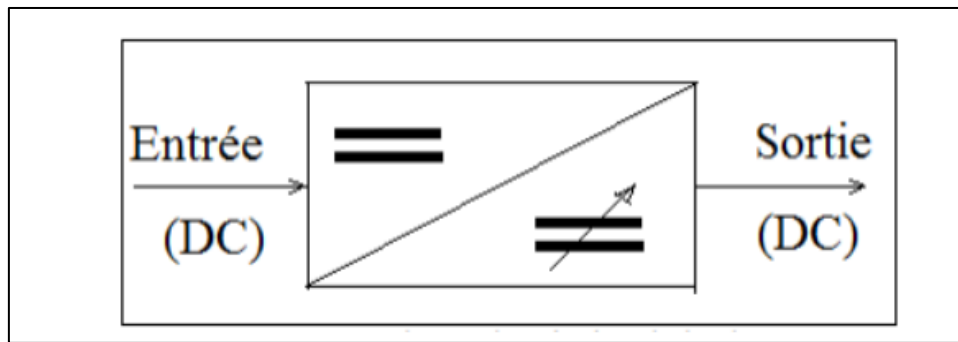


Figure II .2: Schéma de principe d'un hacheur.

Les convertisseurs utilisés dans les systèmes PV pour générer les courants et les tensions souhaités sont :

- Les convertisseurs de type Buck (abaisseurs) dans lesquels $V_s < V_e$.
- Les convertisseurs de type Boost (élevateurs) dans lesquels $V_s > V_e$.
- Les convertisseurs de type Buck-Boost qui peuvent fonctionner en Buck ou en Boost en fonction du rapport cyclique α .

II.5 Convertisseur élévateur (Boost)

La Figure II.3 représente un convertisseur élévateur « Boost » qui convertit la tension continue d'entrée en une tension de sortie plus élevée. Ce convertisseur comprend l'interrupteur (S) l'inductance (L), la diode qui protège S en empêchant le retour du courant et le condensateur C2 qui sert à lisser la tension de sortie. [4]

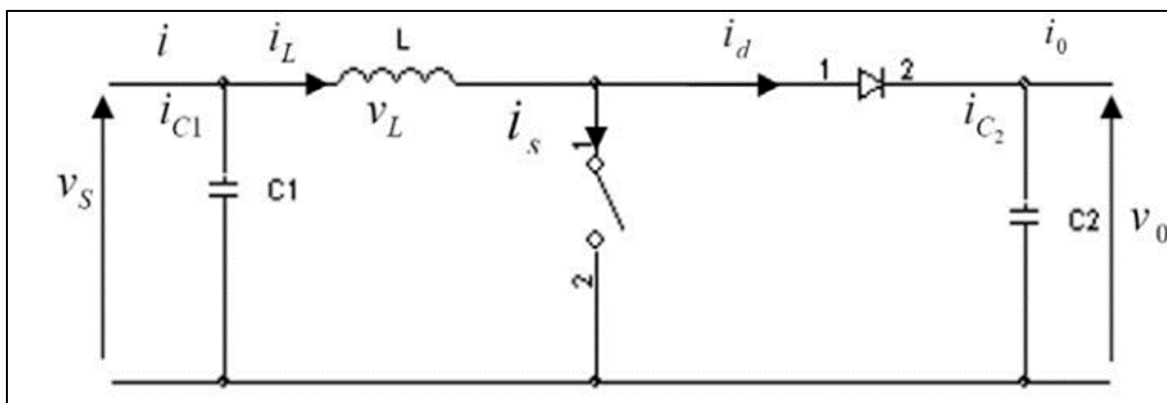


Figure II.3: Convertisseur élévateur (Boost).

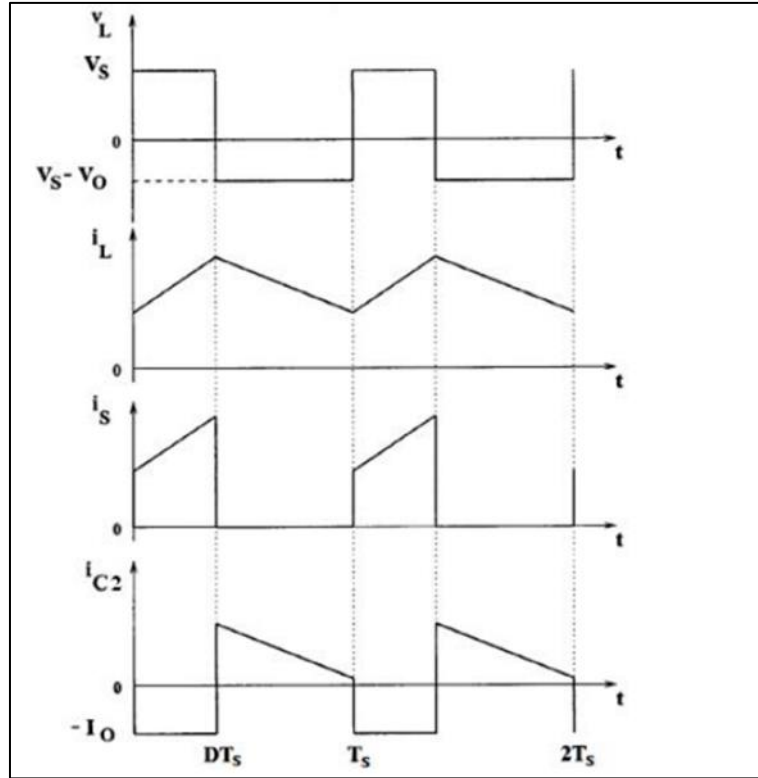


Figure II.4: Tensions et courants d'entrée et de sortie en D et T_s pour un Boost.

Selon la Figure II .4 , S se ferme et la diode est polarisée en inverse pour Pour $t \in [0, D.T_s]$, L se charge et le courant délivré par la source commence à augmenter progressivement. Pendant cet intervalle de temps on a:

- $i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_L(t)}{dt} = i(t) - i_L(t)$
- $i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_O(t)}{dt} = -i_O(t)$
- $v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_S(t)$

(II.1)

Pour $t \in [D.T_s, T_s]$, S est ouvert et L libère la tension emmagasinée qui s'ajoute à celle de la source pour alimenter la charge. On obtient l'ensemble suivant d'équations :

- $i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_S(t)}{dt} = i(t) - i_L(t)$
- $i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_O(t)}{dt} = i_L(t) - i_O(t)$
- $v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = v_S(t) - v_O(t)$

(II.2)

➤ A partir des équations (II.1) et (II.2), on peut écrire l'équation suivante

$$v_s) DT_s = (v_0 - v_s) * (1 - D) * T_s \quad (\text{II.3})$$

➤ Le rapport de conversion $M(D)$ s'écrit sous la forme suivante :

$$\bullet \quad M(D) = \frac{v_s}{v_0} = \frac{1}{1-D} \quad (\text{II.4})$$

II.6 Convertisseur abaisseur (Buck)

Le convertisseur DC/DC abaisseur, montré dans la Figure II.5, convertit la tension de la source V_s en une tension plus basse V_o .

Ce convertisseur est constitué d'un commutateur S , de la diode D , qui protège S , et du filtre inductif L . Lorsque l'interrupteur S est fermé, le courant $i(t)$ circule vers la charge à travers l'inductance L qui se charge au fur et à mesure que le courant $i(t)$ augmente durant $t \in [0, D.T_s]$, lorsque l'interrupteur S s'ouvre, l'inductance L libère l'énergie emmagasinée sous forme magnétique à la charge et la diode D est en état de conduction afin de protéger l'interrupteur, ce durant $t \in [D.T_s, T_s]$ La tension et le courant de sortie sont en fonction du rapport cyclique et de la fréquence.[4]

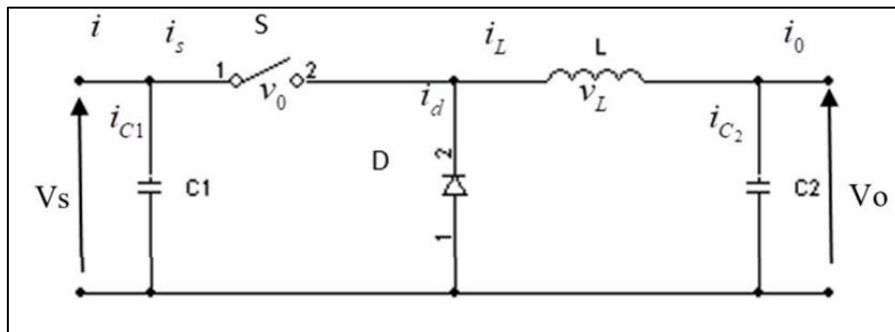


Figure II .5 : Circuit électrique du Hacheur abaisseur.

- Pour étudier le convertisseur abaisseur et extraire son modèle mathématique, on analyse le fonctionnement du circuit équivalent pour S ouvert et fermé.
- Pour $t \in [0, D.T_s]$, S est fermé:

$$\begin{aligned} \bullet \quad i_{c1}(t) &= C_1 \frac{dv_s(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ \bullet \quad i_{c2}(t) &= C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t) \end{aligned} \quad (\text{II.5})$$

- Pour $t \in [D.T_s, T_s]$, S est ouvert:

- $i_{c1}(t) = C_1 \frac{dv_s(t)}{dt} = i(t)$
- $i_{c2}(t) = C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_L(t) - i_o(t)$
- $v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -v_o(t)$

(II.6)

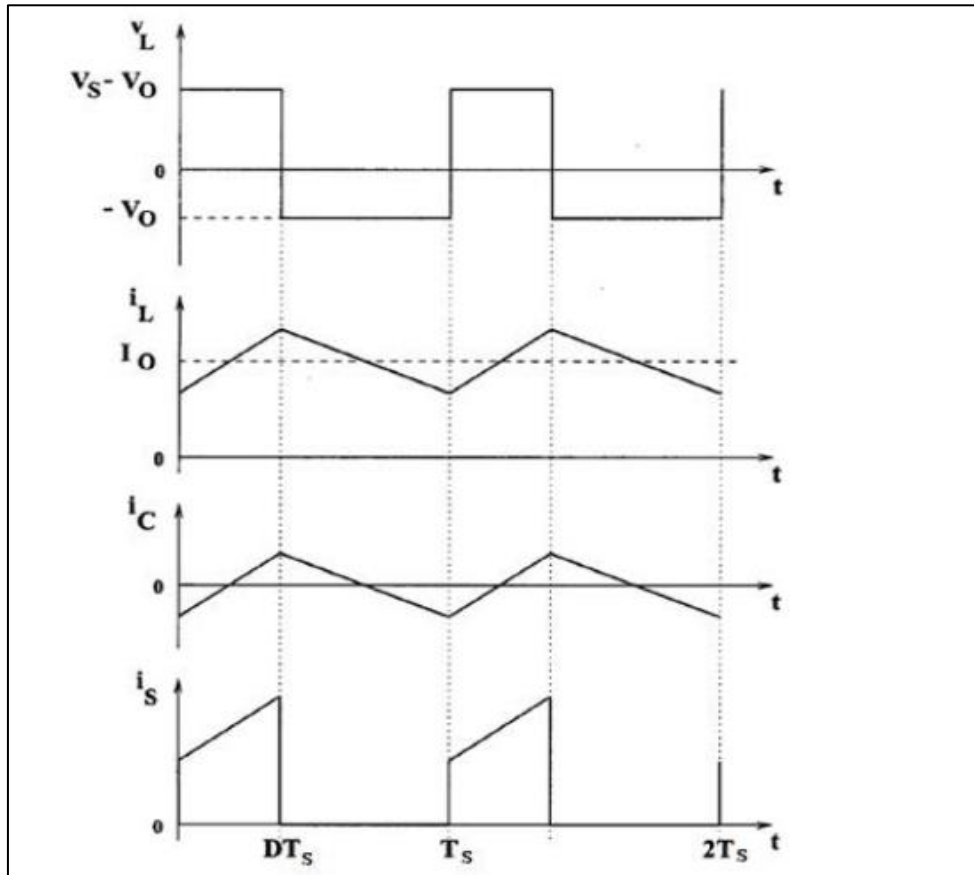


Figure II.6: Forme d'ondes des tensions et des courants d'entrée et de sortie du « Buck » en fonctions du rapport cyclique D et la période T_s .

La Figure II.6 représente les formes d'ondes des courants inductif, capacitif, et de commutation. L'expression de la tension moyenne d'inductance peut être facilement dérivée de la forme d'onde sur la Figure II.4 La tension moyenne d'inductance est égale à zéro en régime permanent :

$$V_L(t) = D(V_S - V_O) + (1-D) \cdot (-V_O) = 0 \quad (II.7)$$

- La relation de la tension d'entrée V_s et de sortie V_o en fonction du rapport cyclique D est donnée par l'équation (II.7):

$$(V_s - V_o) D T_s = V_o (1 - D) T_s \quad (\text{II.8})$$

- A partir de l'équation (II.7), le rapport de conversion de l'hacheur dévolteur est donné par la forme suivant :

$$M(D) = V_s/V_o = D \quad (\text{II.9})$$

- Le rapport de conversion $M(D)$ varie proportionnellement avec le rapport cyclique de commutation D .

II.7 Convertisseur élévateur - abaisseur (Buck-Boost)

Le convertisseur dévolteur-survolteur, montré dans la Fig II.7, combine les propriétés des deux convertisseurs précédents pour convertir une tension continue d'entrée à une tension de sortie de valeur souhaitée.

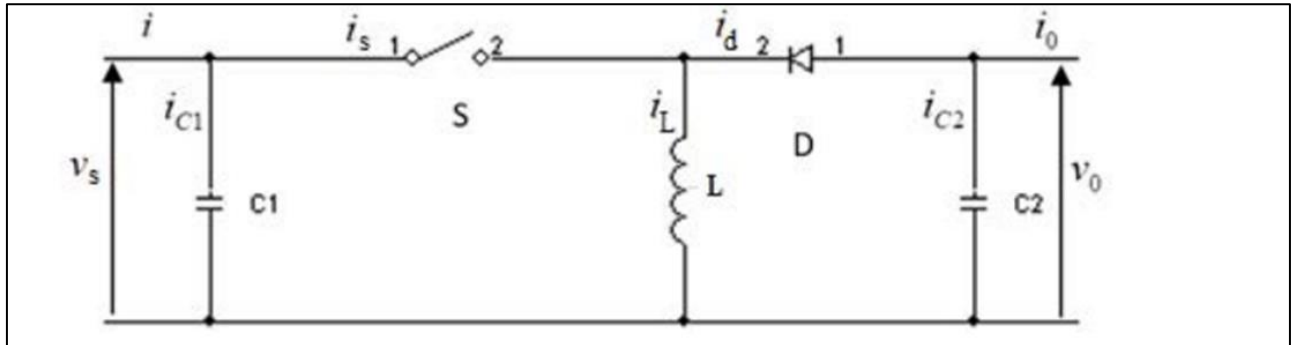


Figure II.7: Circuit équivalent du convertisseur Buck-Boost.

Selon la Fig.II.7, S est en état de conduction durant l'intervalle $t \in [0, D.T_s]$ L'inductance L se charge et on a :

$$\begin{aligned} \bullet \quad i_{c1}(t) &= C_1 \frac{dv_s(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\ \bullet \quad i_{c2}(t) &= C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ \bullet \quad v_L(t) &= L \frac{di_L(t)}{dt} = v_s(t) \end{aligned} \quad (\text{II.10})$$

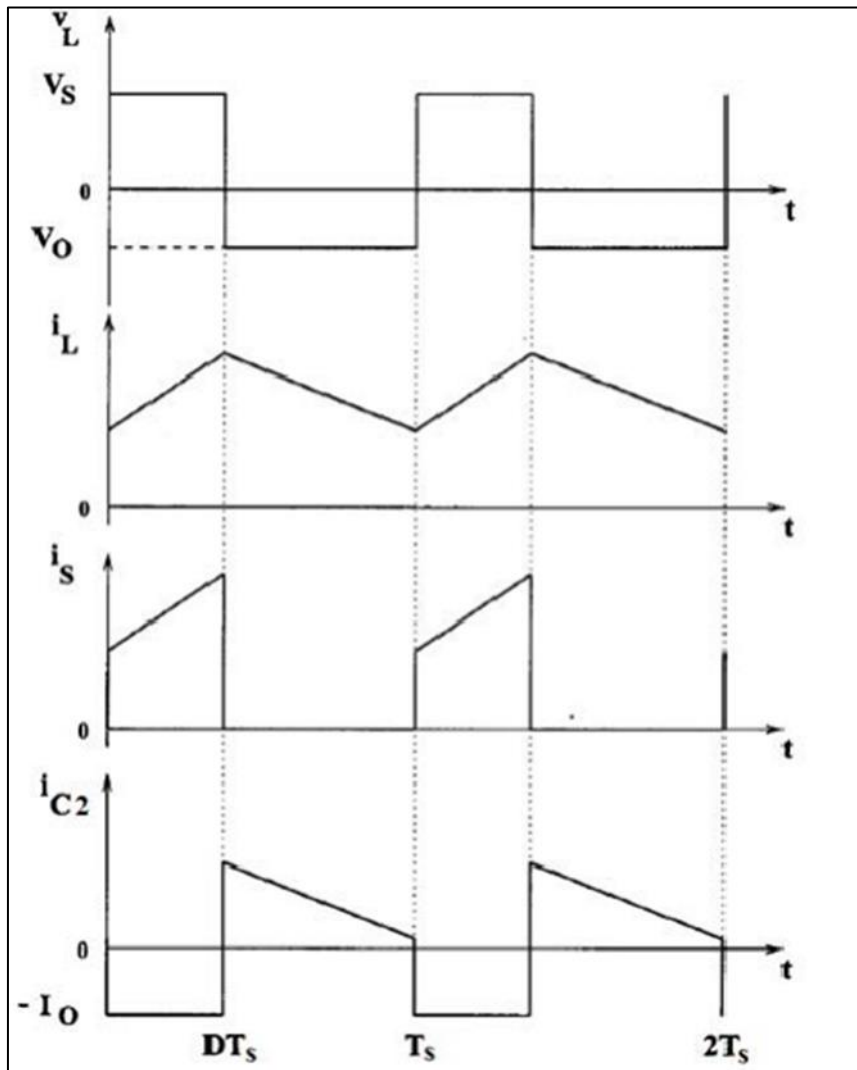


Fig.II .8: Tensions et courants du convertisseur Buck-Boost.

L'interrupteur S s'ouvre au début de l'intervalle $t \in [D.T_s, T_s]$. Le courant délivré par L circule à travers la diode pour alimenter la charge. Puisque le courant est forcé à traverser la charge, la tension de sortie. V_O du convertisseur dévolteur-survolteur est négative par rapport à la masse et sa valeur peut être supérieure ou inférieure à la tension d'entrée V_S . [45] On a l'ensemble d'équations suivant :

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad i_{c1}(t) &= C_1 \frac{dv_s(t)}{dt} = i(t) - i_L(t) \\
 \bullet \quad i_{c2}(t) &= C_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\
 \bullet \quad v_L(t) &= L \frac{di_L(t)}{dt} = v_s(t)
 \end{aligned}
 \tag{II.11}$$

- En régime permanent, le rapport de conversion de convertisseur Buck-Boost s'écrit ainsi :

$$(v_s) DT_s = v_0 * (1 - D) * T_s \tag{II.12}$$

- Le rapport de conversion $M(D)$ s'écrit sous la forme suivante :

$$M(D) = VS/V_0 = D/(1 - D) \tag{II.13}$$

II.8 Implémentation du hacheur Boost sous Simulink

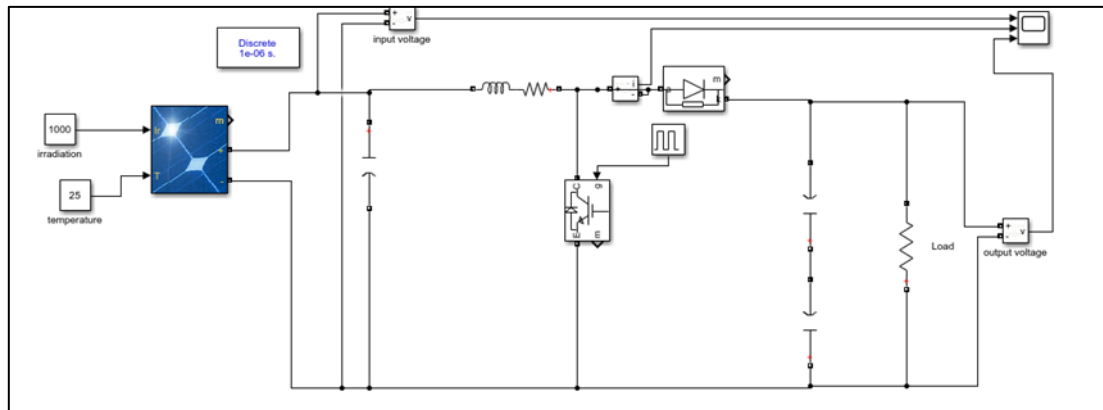


Figure II.9: Simulation de le hacheur boost.

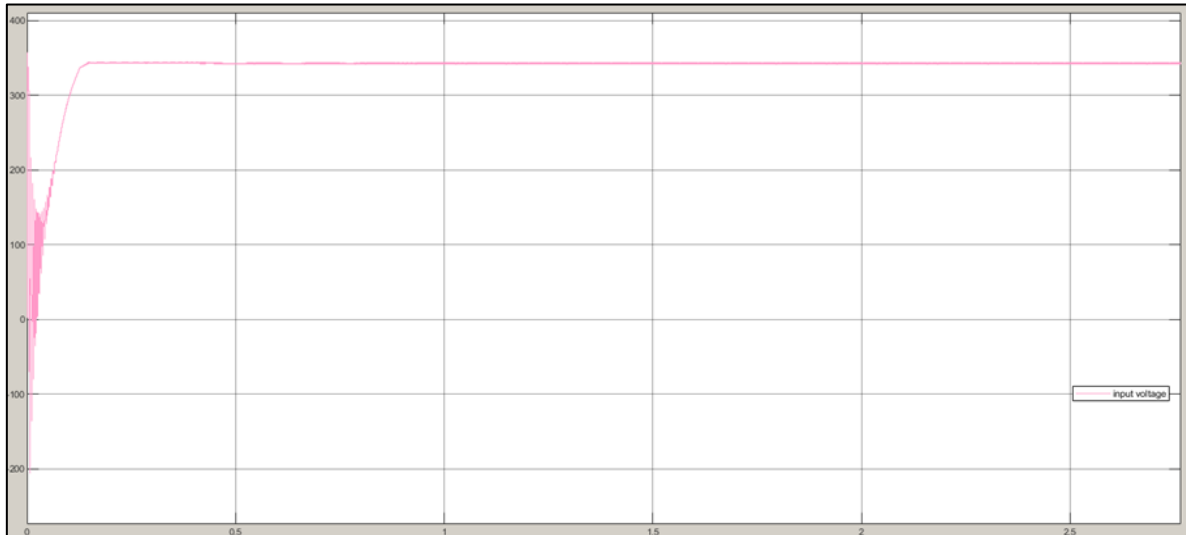
Avec :

Tableau 1I.1 : Les valeurs qui caractérisent le hacheur Boost.

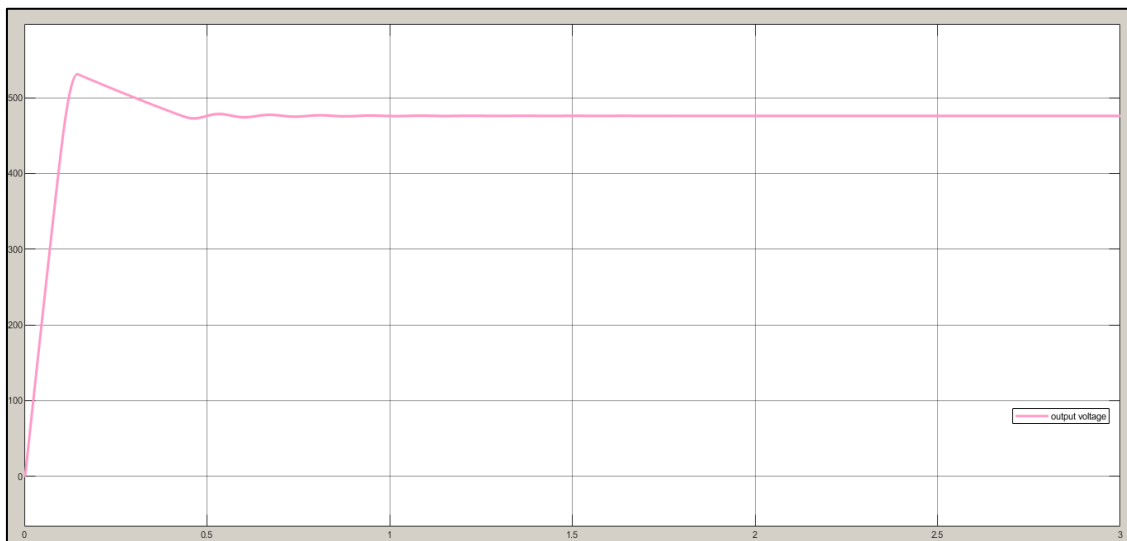
C1	L	C2	R
100e-6 (F)	5e-3 (H)	100e-3 (F)	50 (ohms)

II.9 Résultats et analyses

Les résultats de simulation du convertisseur survolteur représentent par les figures (II.9) et (II.11) Ces figures représentent les tensions d'entrée et de sortie de le hacheur survolteur Ces résultats montrent que la tension de sortie du hacheur survolteur est supérieure à celle d'entrée. Donc le hacheur survolteur a effectué correctement son rôle.



Figures II.10: Résultats de simulation de la tension d'entrée du hacheur survolteur



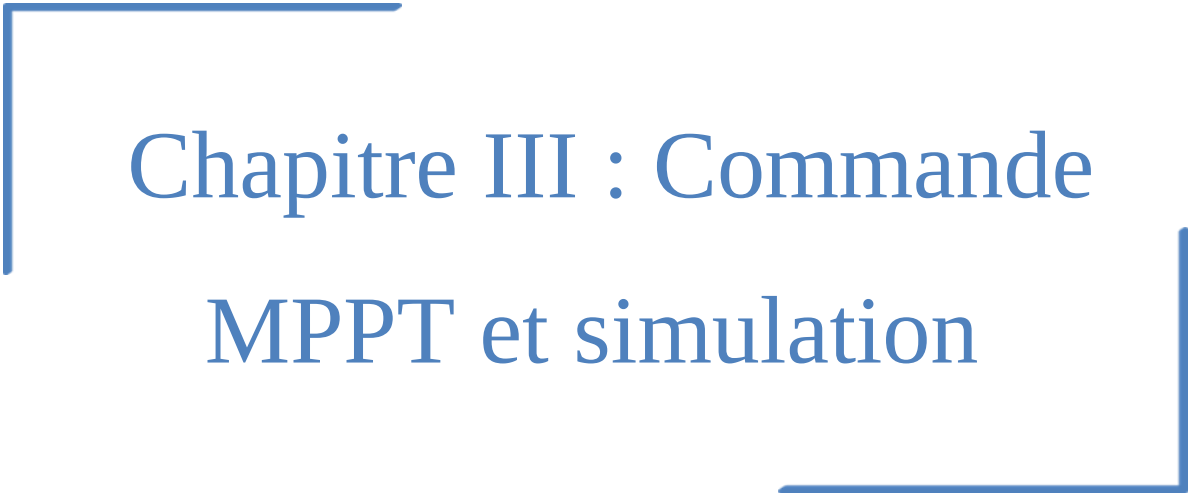
Figures II.11: Résultats de simulation de la tension de sortie de le hacheur survolteur.

On a:

- $V_{in} = 363V$
- $V_{out} = 500V$
- $PWM = 10KHZ$
- $D=0.274$

II.10 Conclusion

Les convertisseurs DC-DC sont largement utilisés dans de nombreuses applications industrielles. À mesure que les sources d'énergie renouvelables sont devenues plus populaires, l'utilisation de convertisseurs est devenue plus importante. Par conséquent, trois types de convertisseurs DC-DC, tels que les convertisseurs boost, buck et buck-boost, sont étudiés dans cette étude. Le logiciel de simulation électrique simule des circuits, avec succès. Dans l'étude, les modèles et le circuit de simulation électrique du boost sont présentés en détail. Les résultats montrent que les modèles de convertisseurs boost sont vérifiés avec des simulations électriques.



Chapitre III : Commande MPPT et simulation

III.1 Introduction

Des lois de commandes spécifiques ont été développées pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont n'éte modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature « Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « Maximum Power Point Tracking » en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ces commandes vise à trouver le point de puissance maximal tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge afin de transférer la puissance maximale possible [21].

III.2 Principe De La Commande MPPT

Les systèmes PV se comportent comme une source intermittente, leur puissance dépend de la température et de l'éclairement. Dans le cas du système PV raccordé au réseau, on travaille au point de puissance maximale MPP aux fins de maximisation du rendement. Mais ce MPP varie toujours en fonction de l'irradiation, de la dérive des paramètres, de la température, du non uniformité du rayonnement, etc. Ainsi, il est nécessaire de mettre en œuvre un algorithme qui permet de trouver en temps réel ce point de puissance maximale, et c'est là que l'algorithme MPPT intervient. [11]

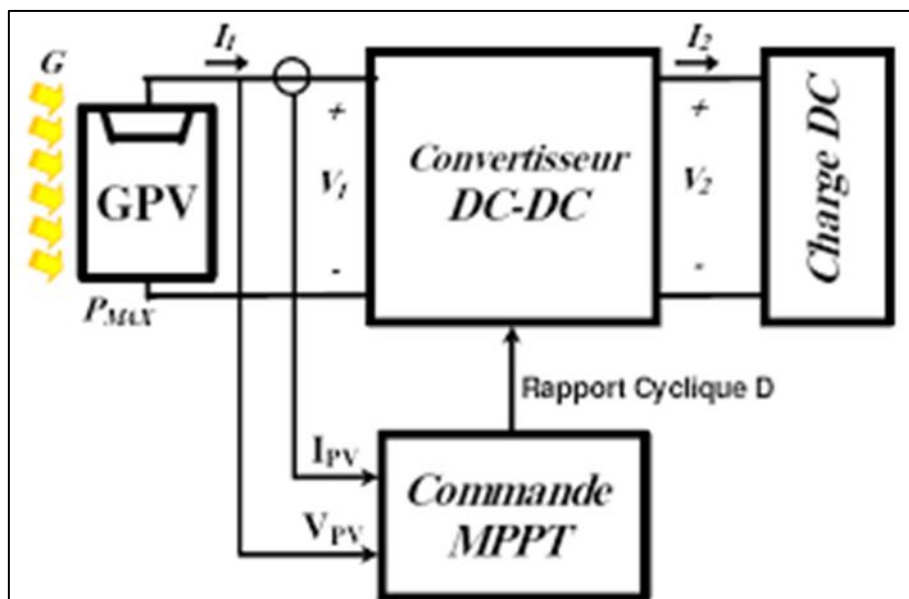


Figure. III.1 : Chaîne de conversion d'énergie solaire.

III.3 Différents types de commandes MPPT

Si l'on veut poursuivre le point PPM réel, il serait nécessaire d'obtenir de l'information sur la puissance réelle extraite du module PV. Cela peut être réalisé en mesurant la tension V_{pv} à la sortie du panneau et le courant I_{pv} qu'il fournit. En utilisant la formule de la puissance électrique ($P = V_{pv} \cdot I_{pv}$), différents algorithmes de contrôle peuvent être utilisés pour suivre le PPM du module PV. Trois implémentations de commande MPPT sont envisageables :

- Commande MPPT à implantation analogique. Elle se caractérise par une simplicité dans la conception et une grande dynamique vis à vis de son équivalente numérique et aussi des diverses perturbations. Elle peut être complètement réalisée avec des composants analogiques et logiques sans qu'aucun calcul ne soit nécessaire. L'autre avantage de cette commande est sa capacité de fonctionner à des fréquences de découpages élevées. Elle peut dépasser facilement le 1MHz. Cela permet donc de réduire considérablement la taille des composants passifs (capacités et inductances) constituant le convertisseur d'énergie.
- Commande MPPT à implantation mixte logique et analogique qui est basé sur l'addition d'un filtre nommé LFR (loss free resistor). Ce concept a été développé par S. Singer dans le cas général de source de puissance fortement non linéaire.
- Commandes MPPT à implantation numérique faisant intervenir que des composants digitaux. La pièce principale de ces commandes est un microcontrôleur. Elles sont souvent incluses avec diverses fonctions notamment des protections. L'algorithme implanté est plus ou moins lourd selon la précision du système, la robustesse et la rapidité de la boucle de commande.

Ainsi, parmi les nouvelles MPPT publiées récemment, on peut citer la commande MPPT de type numérique proposée par M. Matsui. Celle-ci est basée sur la mesure des tensions de sortie et d'entrée d'un convertisseur de type boost. En effet, connaissant le lien entre les grandeurs d'entrée et de sortie d'un convertisseur statique en fonction de son rapport cyclique, une fois les mesures effectuées, on peut calculer la valeur du rapport cyclique permettant de faire la meilleure adaptation source- charge. Ces types de commande sont valables en basses fréquences et puissances élevées. Leur inconvénient se manifestent lorsque la fréquence de système de conversion augmente, elles peuvent induire alors des erreurs sur la détermination du rapport cyclique optimal. De ce fait, elles peuvent entraîner des pertes importantes en rendement. [8]

III.4 Classification Des Commandes MPPT Selon Le Type De Recherche

- **MPPT Indirect** : Les méthodes indirectes sont basées sur la courbe de la caractéristique du générateur photovoltaïque. Le principe est de constituer une table correspondant aux tensions optimales pour une température et un ensoleillement donné. La tension du GPV est comparée à cette table afin d'ajuster le rapport cyclique du système pour se rapprocher au maximum de la valeur optimale. Ces méthodes de commande sont simples à mettre en œuvre, mais elles requièrent une grande capacité de mémoire pour stocker les données.
- **MPPT Direct** : La détermination du point de fonctionnement est généralement basée sur la mesure du courant et de la tension. Dans la littérature, la méthode la plus répandue est appelée « Perturbe & Observe ». Son principe consiste à agir sur le rapport cyclique pour faire déplacer le point de fonctionnement du GPV. [2]

III.5 Algorithmes de recherche du point de puissance maximale (MPPT)

L'objectif d'exploiter un algorithme MPPT est de garantir dans toutes les conditions d'environnement climatique (en particulier le rayonnement solaire et la température) l'extraction de la puissance maximale des modules PV. Ceci est réalisé en faisant correspondre le point de puissance maximale (MPP) du PV avec la tension et le courant de fonctionnement du convertisseur de puissance. Lors de l'augmentation ou de la diminution de la température ou/et de l'irradiation, l'énergie solaire varie en fonction de ces changements atmosphériques, le point de puissance maximale évolue donc et correspond à une tension et un courant particulier. L'objectif de la plupart des techniques MPPT est d'atteindre le courant et la tension PV qui correspondent au point de puissance maximale sous différentes température et irradiation. Les paragraphes suivants décrivent les divers algorithmes MPPT documentés dans la littérature.

Dans tous les cas, la capture des grandeurs électriques I et V puis la multiplication de ces deux grandeurs aboutissent à la détermination de la puissance réelle du générateur PV.

III.6 Méthode basée sur la tension du circuit ouvert

La relation quasi linéaire entre la tension du point de puissance maximale V_{mpp} et la tension du circuit ouvert V_{co} du générateur PV, sous différents niveaux d'éclairement et de température, a donné lieu à la méthode V_{co} fractionnaire

$$V_{mpp} = K_1 \cdot V_{co}$$

Où K_1 est une constante de proportionnalité. Comme k est en fonction des caractéristiques du générateur PV utilisé, elle doit généralement être calculée à l'avance en déterminant empiriquement V_{mpp} et V_{co} pour un générateur photovoltaïque spécifique à différents niveaux d'éclairement et de température. Le facteur K_1 est généralement compris entre 0,71 et 0,78. Une fois que K est connue, V_{mpp} peut être calculée à l'aide de l'équation avec la mesure périodique de V_{co} pour chaque arrêt instantané du convertisseur de puissance. Toutefois, cela entraîne des inconvénients, notamment la perte temporaire de puissance. Pour éviter cela, l'utilisation des cellules pilotes est envisageable, à partir desquelles la tension V_{co} peut être obtenue. Ces cellules pilotes doivent être soigneusement choisies pour représenter exactement les caractéristiques du générateur PV. [13]

III.7 Méthode basée sur le courant de court-circuit

Il apparaît que le courant du point de puissance maximale I_{mpp} a une relation approximativement linéaire avec le courant de court circuit I_{sc} , comme le montre l'équation suivante :

$$I_{mpp} = K_2 I_{sc}$$

Où K_2 est une constante de proportionnalité. Comme dans la technique précédente, K_1 doit être déterminée en fonction du générateur PV utilisé. La constante K_1 est généralement fixée entre 0,78 et 0,92. La mesure du courant de court-circuit I_{sc} pendant le fonctionnement est également une contrainte. En pratique, un interrupteur supplémentaire doit être rajouté à l'entrée du convertisseur de puissance pour court-circuiter le générateur PV périodiquement, de telle sorte que le courant I_{sc} peut être mesuré en utilisant un capteur de courant. Cela peut augmenter le nombre de capteur de mesure et surtout le coût. Dans le cas d'un convertisseur élévateur, l'interrupteur de puissance du convertisseur peut être mis à contribution pour court-circuiter le générateur PV. [8]

III.8 Algorithme basé sur la perturbation et l'observation (P&O)

L'algorithme P&O est couramment utilisé parmi les techniques de MPPT en raison de sa structure simple et de sa facilité de mise en œuvre sur un FPGA (Field Programmable Gate Array). Le principe de fonctionnement de l'algorithme P&O est brièvement expliqué dans l'organigramme illustré dans la Figure III.8. Supposons que le générateur PV fonctionne à un instant donné, et qu'il soit en dehors du MPP. La tension de fonctionnement du générateur PV

subit une petite perturbation ΔV et par la suite, le changement engendré sur la puissance ΔP est mesuré. Si $\Delta P > 0$

Le point de fonctionnement a approché le MPP, et donc, la prochaine perturbation doit avoir lieu dans la même direction que la précédente (même signe algébrique). Si, au contraire, $\Delta P < 0$, le système s'est éloigné du MPP, par conséquent, la prochaine perturbation doit être pratiquée dans le sens opposé (signe algébrique opposé).

Un inconvénient de l'algorithme P&O est sa tendance à se stabiliser avec une faible précision au point de puissance maximale (MPP). Il oscille donc en continu autour du MPP, suite au changement du signe de la perturbation pour chaque ΔP mesurée. [32]. Il a été également prouvé que cet algorithme peut diverger lors de changements rapides d'irradiation. En effet, il ne différencie pas entre les variations de puissance ΔPP mesurées, qui sont induites par sa propre perturbation et celles provoquées par des évolutions brusques d'irradiation.

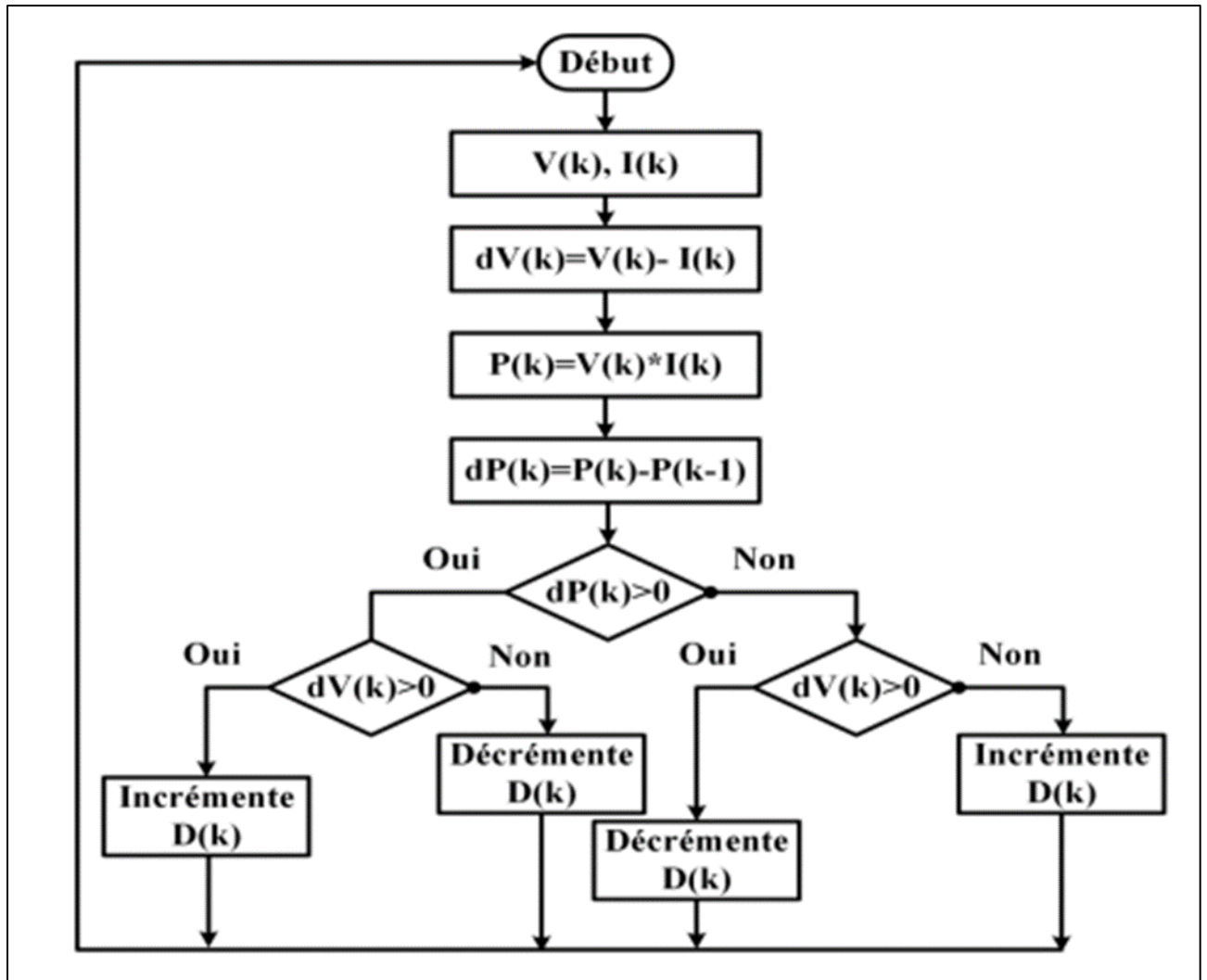


Figure III.2: Organigramme de l'algorithme P & O.

Lorsqu'une fluctuation rapide de l'irradiation apparaît, l'algorithme P&O dévie du MPP, ce problème est illustré sur la figure III.3. En supposant que le point de fonctionnement à un instant donné se trouve au point A, lorsque l'irradiation augmente rapidement, l'algorithme prend la fausse direction et se dirige vers le point B. Par la suite, il continue de suivre le point MPP périodiquement jusqu'à ce qu'il atteigne le point C. [38] Ce problème est déclenché parce que l'algorithme MPPT de type P&O ne discrimine pas les variations de puissance dues à l'évolution de l'irradiation ou à l'incrément de la perturbation au point de fonctionnement. Par conséquent, pour résoudre ce problème dans les cas les plus défavorables des changements climatiques, une nouvelle technique basée sur la logique floue sera proposée dans la section qui suit.

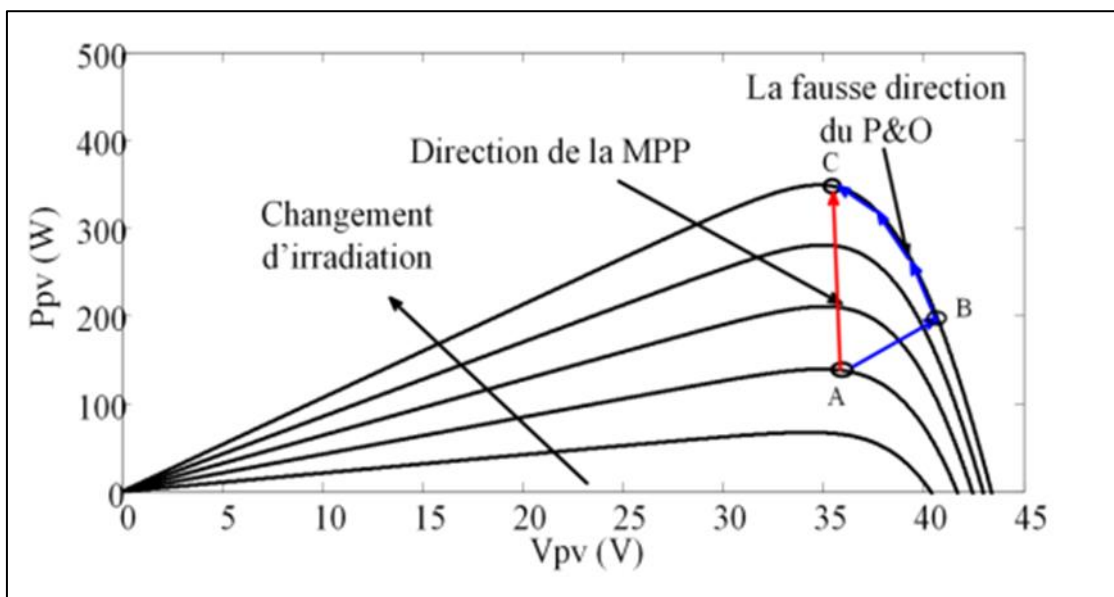


Figure III.3: Algorithme P&O sous l'évolution rapide d'irradiation.

III.9 Méthode basée sur les réseaux de neurones artificiels (ANN)

Un réseau de neurones artificiels s'inspire des neurones biologiques et se compose de neurones interconnectés. Il aborde de manière novatrice les problèmes de perception, de mémoire, d'apprentissage et de raisonnement. Chaque neurone artificiel est un processeur élémentaire qui reçoit des entrées provenant de neurones connectés en amont. Chaque entrée est associée à un poids qui détermine la force de l'interconnexion. De plus, chaque neurone a une sortie unique qui se ramifie pour alimenter d'autres neurones en aval. [12]

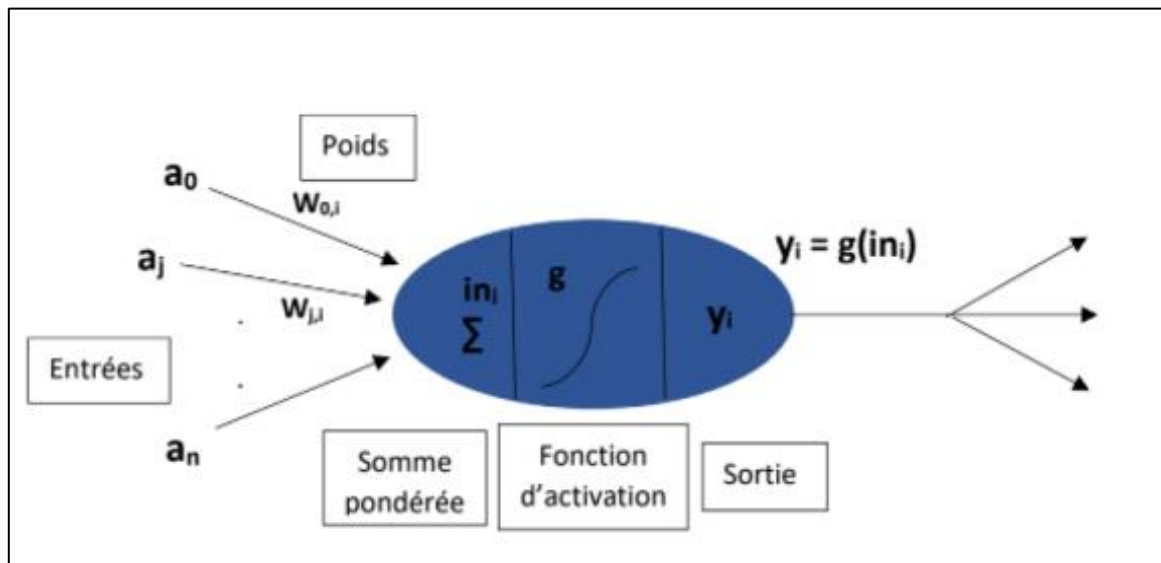


Figure III.4: Forme d'un neurone artificiel.

III.10 Conception du réseau de neurones Deep Learning

Contrairement aux réseaux neuronaux traditionnels, qui sont relativement peu profonds, le deep learning utilise des réseaux neuronaux avec plusieurs couches cachées. Ces couches

Supplémentaires permettent au réseau de capturer des représentations hiérarchiques et complexes des données, ce qui améliore les performances de modélisation et de prédiction. L'un des avantages du deep learning est sa capacité à apprendre automatiquement des caractéristiques pertinentes à partir des données brutes. Dans les méthodes traditionnelles d'apprentissage automatique, les caractéristiques devaient être extraites manuellement par des experts. Avec le deep learning, le réseau neuronal est capable d'apprendre des caractéristiques abstraites à différents niveaux de représentation, en évitant ainsi la nécessité d'une ingénierie de caractéristiques laborieuse. [31]

- **Fonctionnement :**

Pour la commande du point de puissance maximale (MPPT) à l'aide d'un réseau de neurones Deep Learning, une structure couramment utilisée est le réseau de neurones à rétropropagation (backpropagation neural network). Voici une structure typique pour la commande MPPT :

- Couche d'entrée (input layer) : Cette couche reçoit les données d'entrée, telles que la tension, le courant, l'irradiance solaire, la température, etc. Chaque nœud dans cette couche représente une caractéristique spécifique du système.
- Couches cachées (hidden layers) : Les couches cachées sont responsables de l'apprentissage des relations complexes entre les caractéristiques d'entrée et la sortie souhaitée (la puissance maximale). Le nombre de couches cachées peut varier en fonction de la complexité du problème et de la capacité du réseau à capturer les motifs.
- Neurones dans les couches cachées : Chaque couche cachée contient un certain nombre de neurones, également appelés unités de traitement. Le nombre de neurones dans chaque couche cachée peut être ajusté pour trouver un bon équilibre entre la complexité du modèle et la capacité d'apprentissage.
- Couche de sortie (output layer) : La couche de sortie représente la sortie du réseau, qui est généralement la valeur estimée de la puissance maximale. Cette couche peut contenir un seul neurone pour prédire la puissance maximale ou plusieurs neurones pour prédire différentes variables de sortie.
- Couche de sortie (output layer) : La couche de sortie représente la sortie du réseau, qui est généralement la valeur estimée de la puissance maximale. Cette couche peut contenir un seul neurone pour prédire la puissance maximale ou plusieurs neurones pour prédire différentes variables de sortie.

Une fois que le réseau de neurones est construit et entraîné, il peut être utilisé pour prédire la puissance maximale en fonction des données d'entrée en temps réel. Cette prédiction peut ensuite être utilisée pour ajuster les paramètres du système photovoltaïque et maintenir le point de puissance maximale. [33]

III.11 Résultats et analyses

Après avoir vu les différents algorithmes de la technique MPPT on a choisi de faire la simulation avec deux commandes.

III.11.1 Simulation avec la commande P&O

Afin d'améliorer la connexion entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge, et d'obtenir la puissance maximale, je présente la méthode P&O, qui est l'une des techniques de commande MPPT. Cette méthode est basée sur la modélisation de l'algorithme et les résultats des tests.

L'idée fondamentale est de calculer les paramètres ΔP et ΔV afin de se rapprocher de la zone de puissance maximale (PPM). Dans cette étude, on analyse la conception et la simulation d'une commande MPPT numérique basée sur la méthode de "perturbation et observation", qu'on a appliquée au générateur photovoltaïque (GPV).

- **Simulation sous des conditions climatiques variables**

Les figures ci-dessous illustrent les résultats obtenus du fonctionnement de la puissance du GPV sous une température variable $T = [20\ 23\ 25\ 25\ 26\ 27\ 28\ 25\ 24\ 22\ 22]$ et un éclairement variable $G = [0\ 250\ 400\ 500\ 600\ 700\ 800\ 1000\ 1000\ 1000\ 900\ 800\ 700\ 800\ 900\ 1000]$

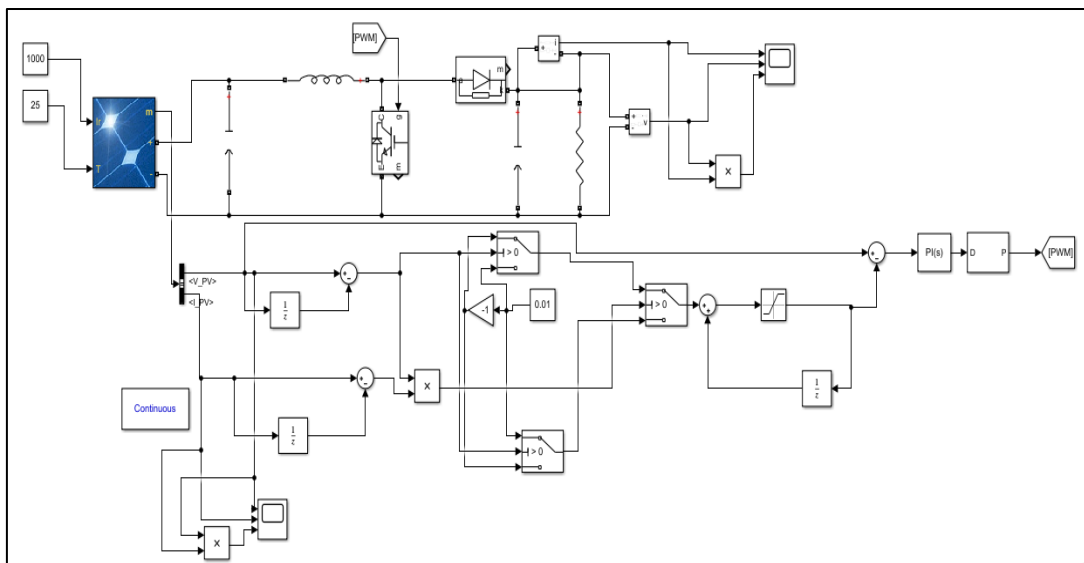


Figure III.5 : Simulation avec la méthode P & O.

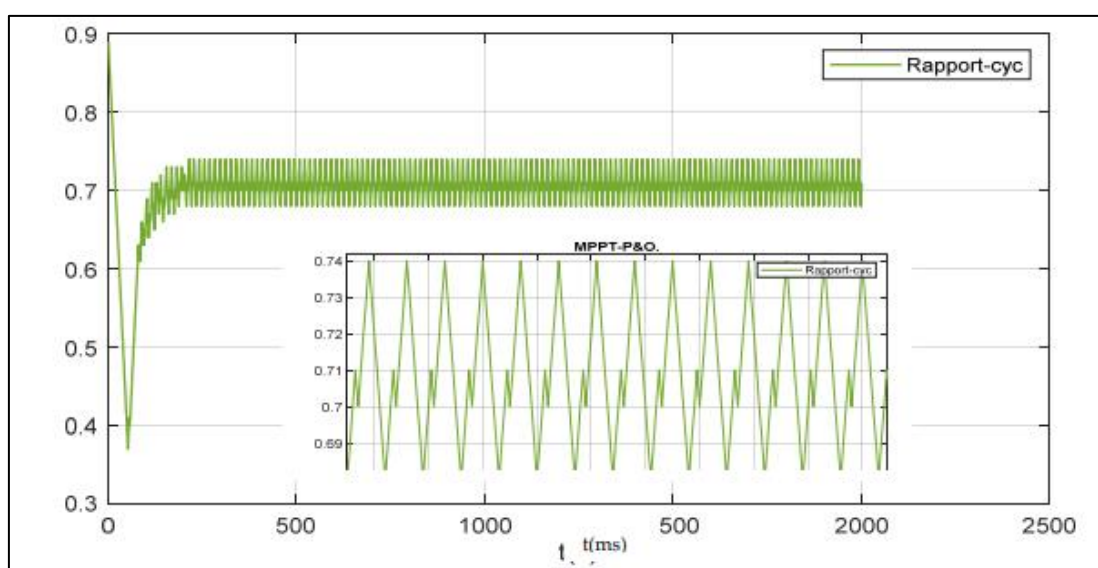


Figure III.6: Courbe de rapport cyclique.

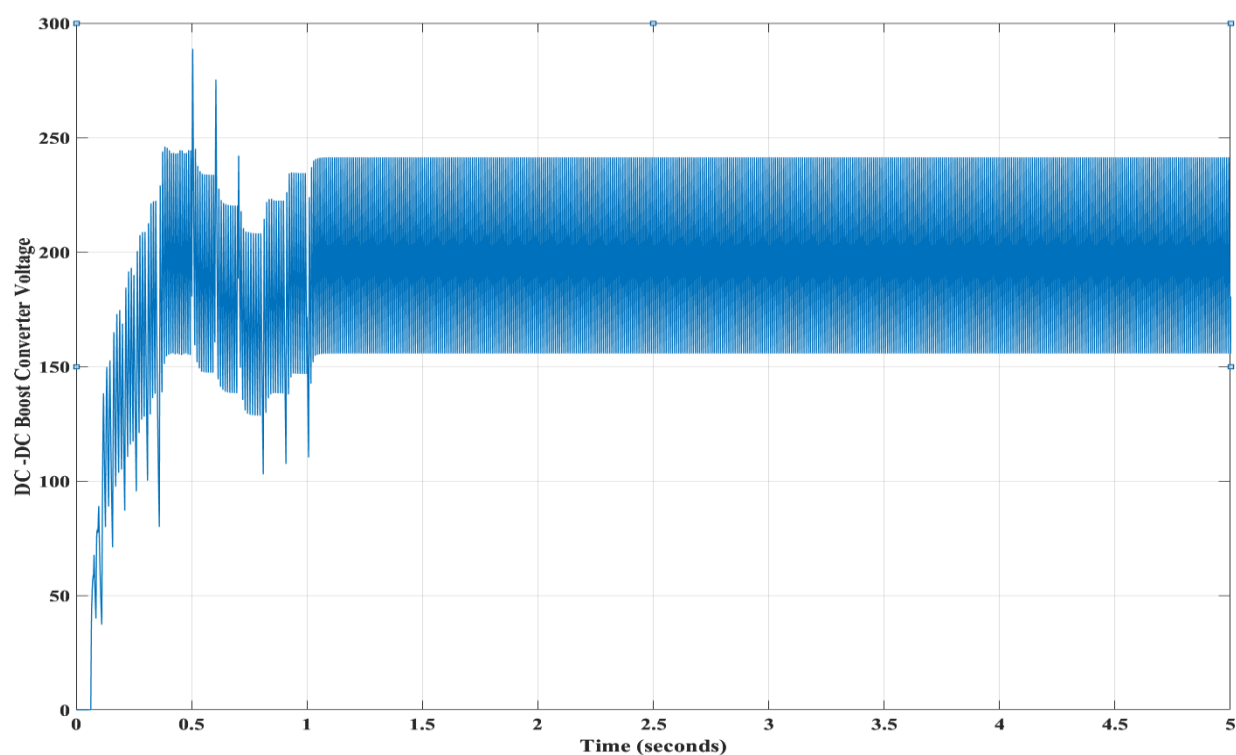


Figure III.7: Tension du sortie DC/DC boost.

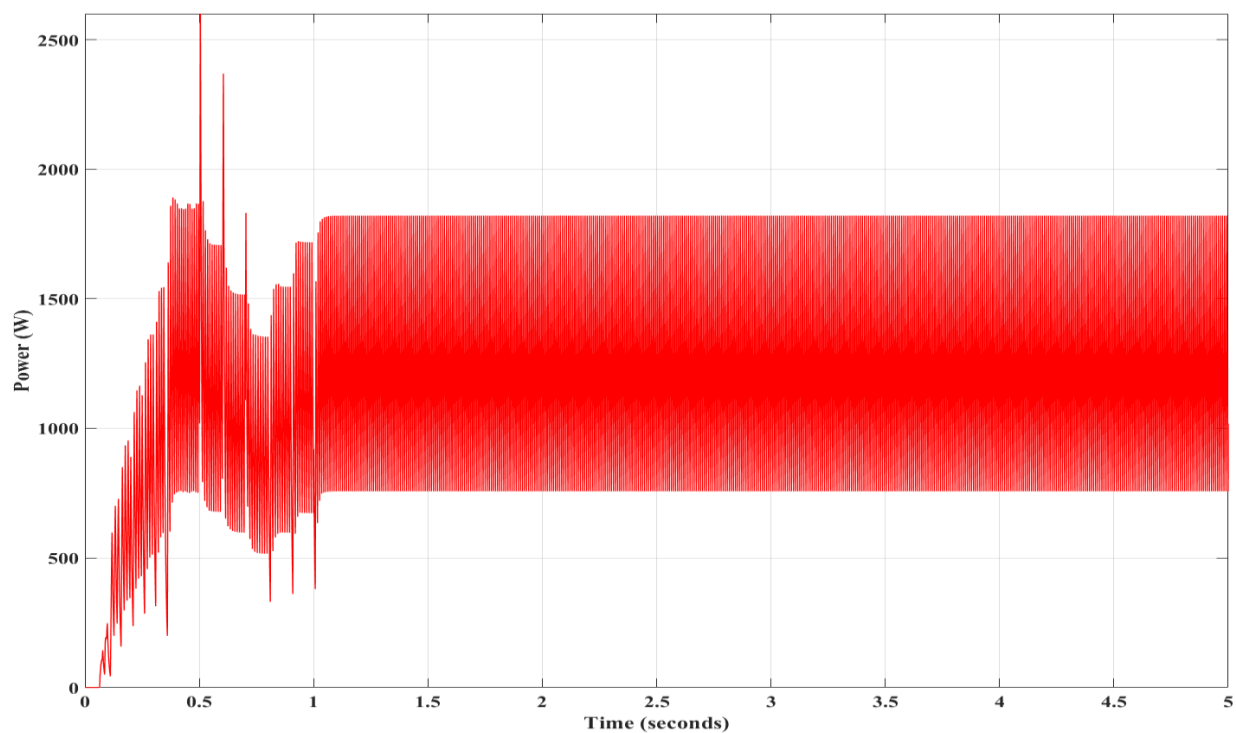


Figure III.8: Puissance de sortie DC/DC boost.

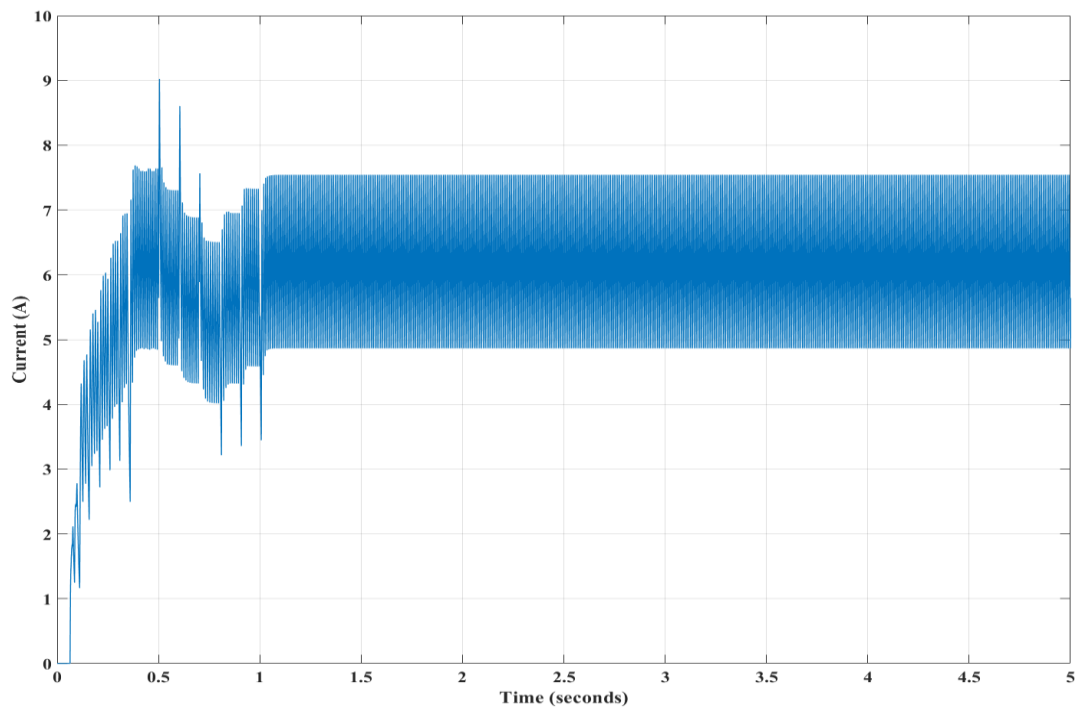


Figure III.9: Courant de sortie du DC/DC boost.

- **Simulation sous des conditions climatiques stables :**

Afin de mesurer les performances du système photovoltaïque avec la commande MPPT de type P&O, on a effectué une simulation du fonctionnement d'un ensemble comprenant un générateur photovoltaïque (GPV), un convertisseur Boost et une charge, dans des conditions atmosphériques constantes (éclairement de **1000 W/m²** et température de **25°C**).

Les figures ci-dessous présentent les résultats de simulation du fonctionnement du système photovoltaïque avec la commande MPPT "perturbation et observation".

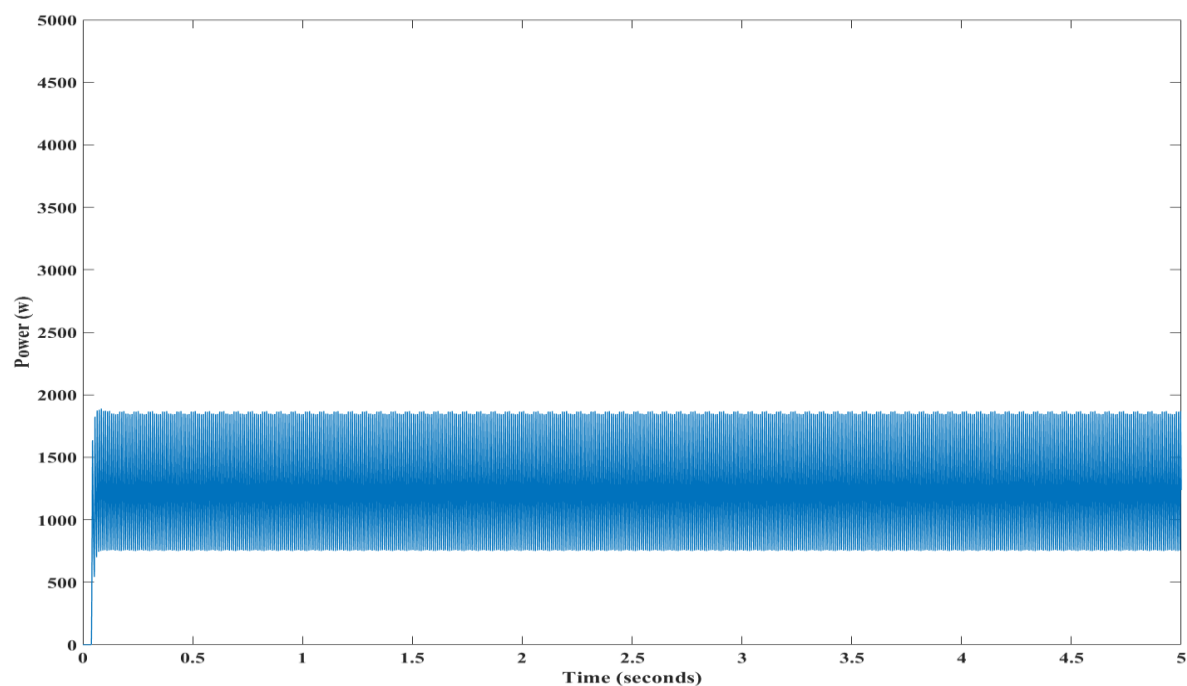


Figure III.10: Puissance de sortie DC/DC boost.

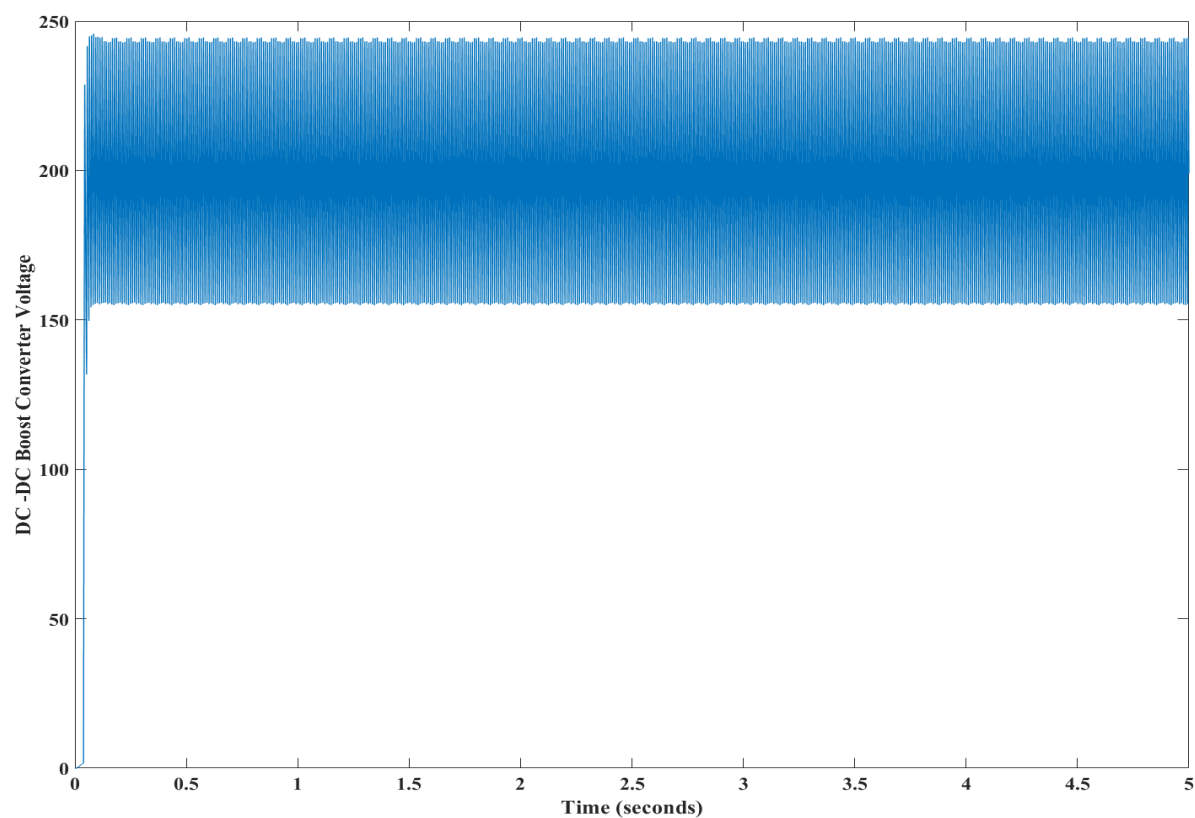


Figure III.11: Tension du sortie DC/DC boost.

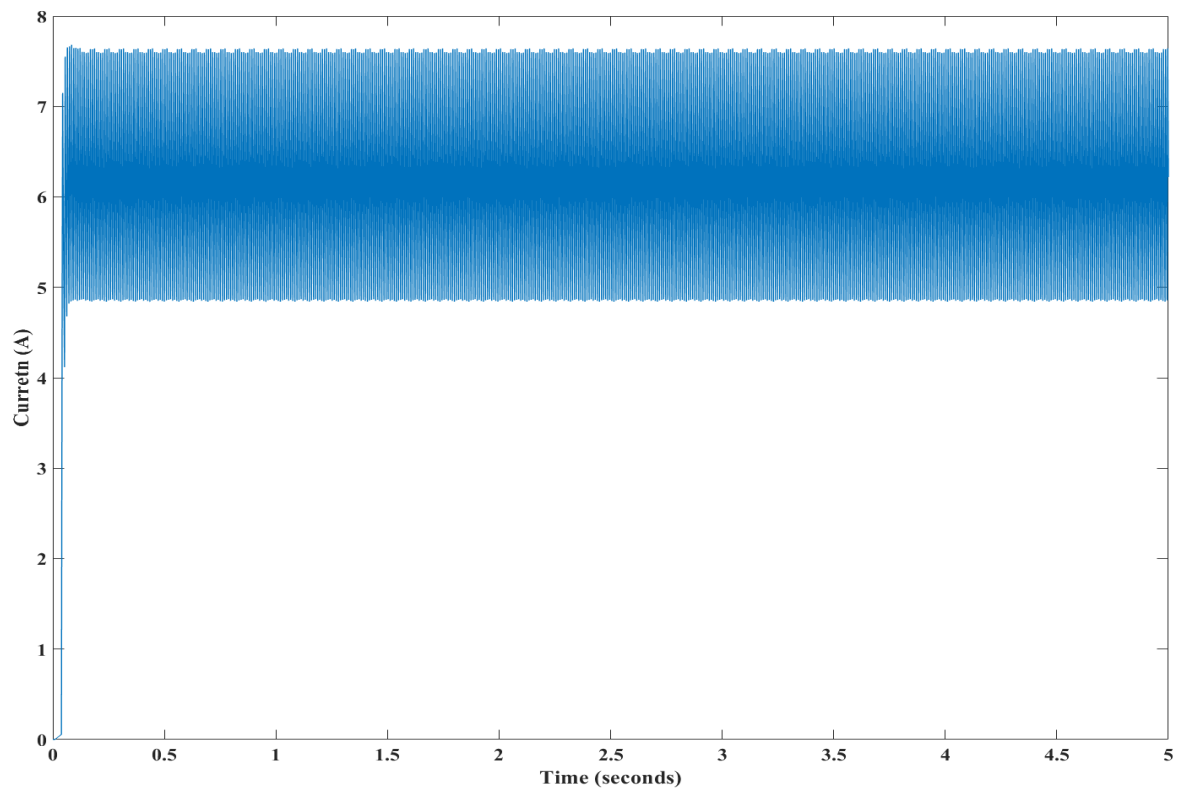


Figure III.12: Courant de sortie du DC/DC boost.

- **Analyse des résultats de P&O :**

Les résultats obtenus révèlent que, même en commençant la simulation avec des conditions initiales nulles, la commande P&O a permis de retrouver le point de puissance maximale du panneau.

Une caractéristique significative concerne les oscillations présentes sur la courbe. L'utilisation de la commande P&O, le rapport cyclique représenté dans la Figure III.6 atteint jusqu'à 0,74 avec de fortes oscillations, ce qui conduit à des oscillations agressives de la puissance du PV.

En observant les courbes des différents cas de simulation, il est constaté que le hacheur survolteur génère une tension de sortie V_s supérieure à celle du générateur photovoltaïque.

Lorsque l'irradiation varie, on observe que le rapport cyclique change en fonction de l'éclairement afin de poursuivre le PPM.

III.11.2 Simple Neural network ;

Un réseau de neurones artificiels est un système de traitement de données inspiré des neurones biologiques. [McCulloch, W]. Ils ont modélisé un neurone simple en utilisant des circuits électriques en 1943, mais la technologie était limitée à l'époque. ANN a fait des progrès significatifs depuis lors. Il a une capacité exceptionnelle à tirer un sens de données complexes. Il peut également détecter des tendances et des modèles dans des données trop complexes pour être classées par des techniques humaines ou informatiques [Grosan, C]. Un ANN formé peut analyser les informations qui ont été fournies et fournir des projections et des réponses aux problèmes ultérieurs. ANN adopte une approche différente de la résolution de problèmes que les algorithmes de prédiction conventionnels. Ils sont comme le cerveau de êtres humains, et ils s'adaptent à des situations qui n'ont pas de solutions algorithmiques claires et sont capables de gérer des données imprécises. Ils sont utilisés dans diverses applications contenant des données non pertinentes, telles que la robotique, le traitement du signal, la reconnaissance de formes et les applications financières. Cet avantage leur permet d'exceller dans certains domaines que les ordinateurs conventionnels trouvent souvent difficiles [18]. Les étapes de la conception d'un NN consiste à collecter des données (entrées, sorties). Obtenir plus de données améliore les performances de NN. Dans notre cas, de nombreux rayonnements et températures solaires et leurs rapports cycliques correspondants sont pris en compte. Les échantillons sont obtenus en faisant varier les entrées d'irradiance et de température du générateur photovoltaïque et en obtenant les valeurs des rapports cycliques. Avec l'apprentissage supervisé, on a utilisé des

données étiquetées, c'est-à-dire un ensemble de données déjà connues, pour déterminer un algorithme d'apprentissage.

III.11.3 Simulation avec le neural network : a 2 entrées, 4 couches cachées et une sortie :

Un Deep Neural Network, ou réseau de neurones profond, se distingue par une particularité : il est composé d'au moins deux couches. Ceci lui permet de traiter les données de manière complexe, en employant des modèles mathématiques avancés [Schmidhuber, J]. La génération d'un réseau de neurones sur Matlab n'est pas aussi compliquée que le réseau lui-même ; on explique étape par étape en ce qui suit comment le générer. Dans la fenêtre de commande de Matlab, on lance la commande : `nftool`. Une fenêtre s'ouvre :

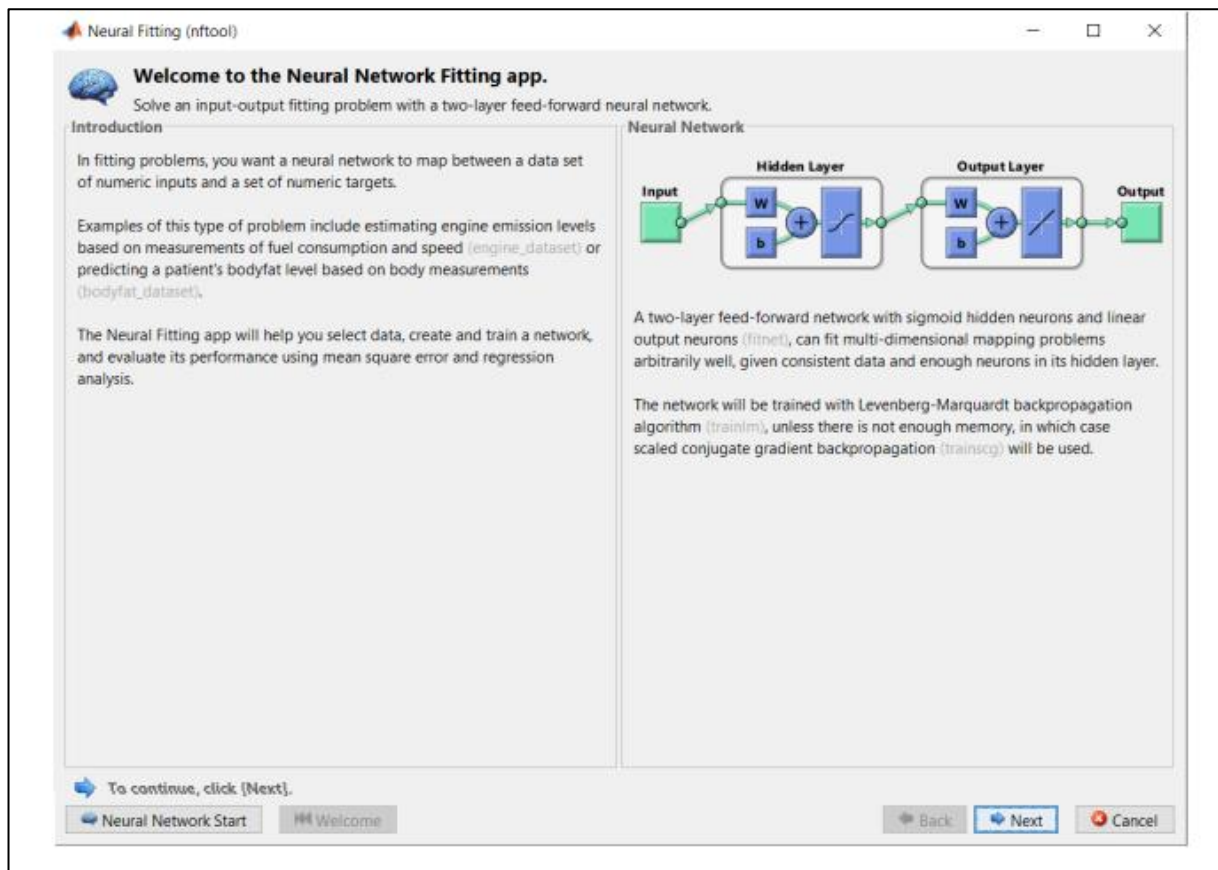


Figure III.13: Face avant de la commande.

La deuxième fenêtre permet d'entrer les valeurs d'entrées et des sorties lui correspondant que l'on dispose. On parle des valeurs d'échantillonnage selon lesquelles le réseau de neurones développera un certain algorithme pour lier toutes entrées à la sortie. Ensuite, je passe à définir

la structure du réseau. Comme nous l'avons défini, nous utiliserons 4 neurones. Dans la couche cachée, ce nombre peut être modifié jugeant la performance du réseau après.

Une fois la structure de réseau définie, on procède à l'étape de trainage ou d'apprentissage par l'algorithme de Levenberg-Marquardt.

- La présentation du schéma général de cette commande :

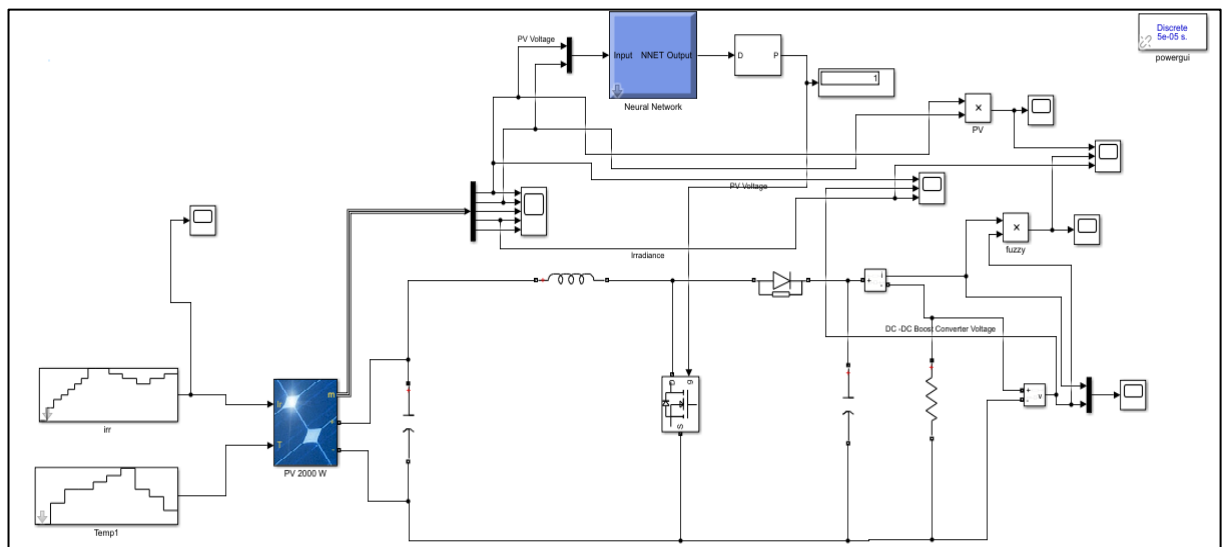


Figure III.14: Schéma de simulation pour la commande MPPT par DNN.

- On passe à la simulation du schéma final, et on observe l'évaluation des grandeurs :

➤ Résultat de simulation avec des conditions variables

➤ $T = [20 \ 23 \ 25 \ 25 \ 26 \ 27 \ 28 \ 25 \ 24 \ 22 \ 22]$

Avec un temps de $[0 \ .1 \ .2 \ .3 \ .4 \ .5 \ .6 \ .7 \ .8 \ .9 \ 1]$ Seconds

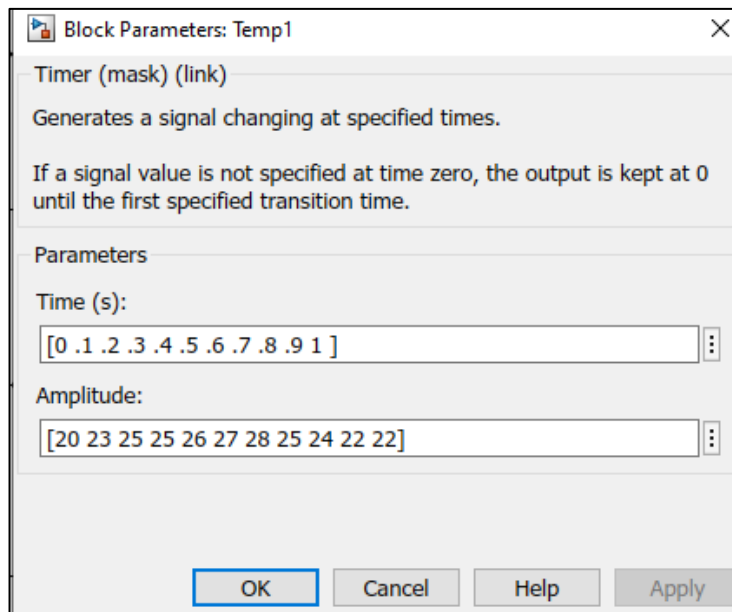


Figure III.15: Valeurs variables de Température.

Et une Irradiation variable :

➤ $G = [0 \ 250 \ 400 \ 500 \ 600 \ 700 \ 800 \ 1000 \ 1000 \ 1000 \ 900 \ 800 \ 700 \ 800 \ 900 \ 1000]$

Avec un temps de $[0 \ 0.05 \ 0.1 \ .15 \ .2 \ .25 \ .3 \ .35 \ 0.4 \ .45 \ .5 \ .6 \ .7 \ .8 \ 0.9 \ 1]$ Seconds

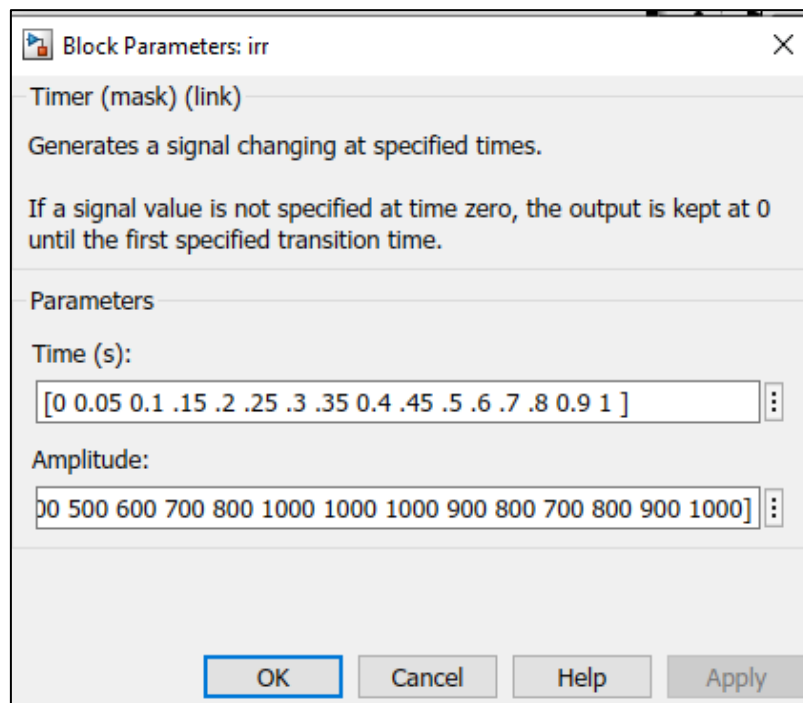


Figure III.16: Valeurs variables de l'Irradiation.

- Variation de courant du hacheur Boost.

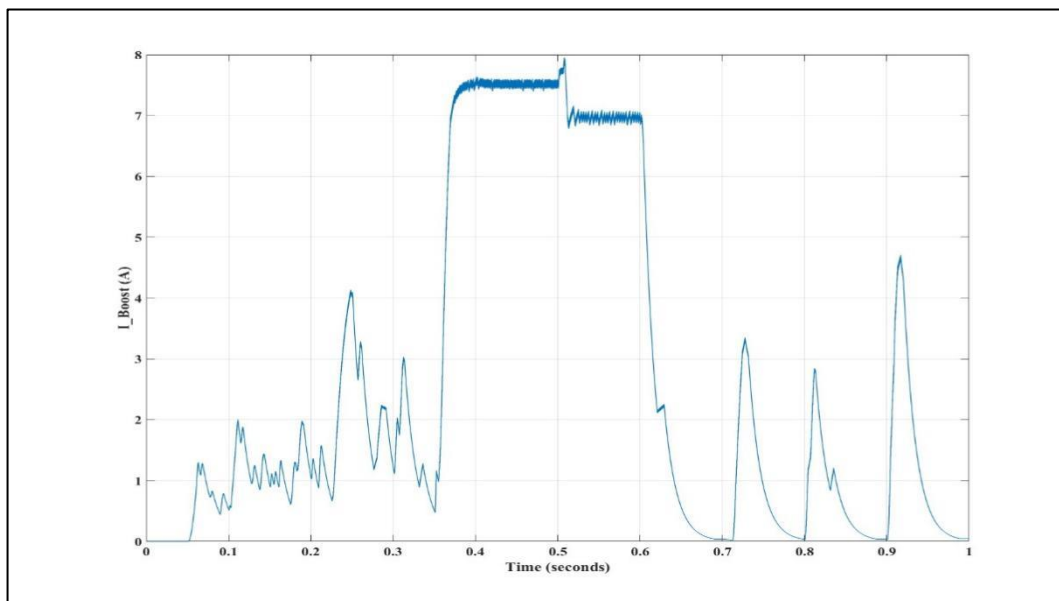


Figure III.17: Variation de courant de l'hacheur Boost.

- Variation de la puissance de le hacheur Boost

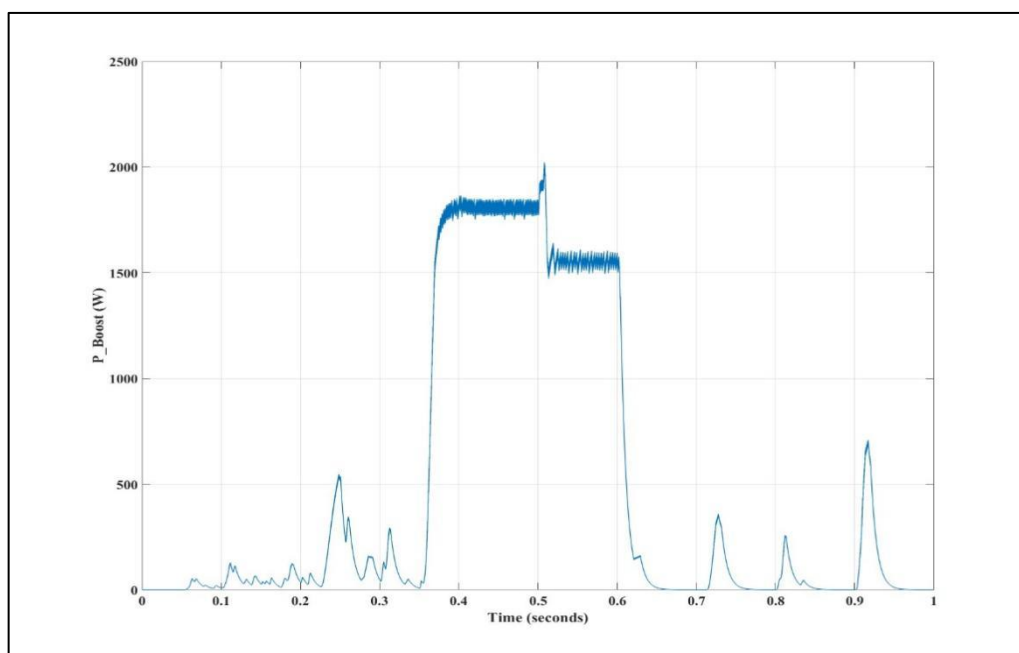


Figure III.18: Variation de la puissance du hacheur Boost.

- Variation de la tension du hacheur Boost

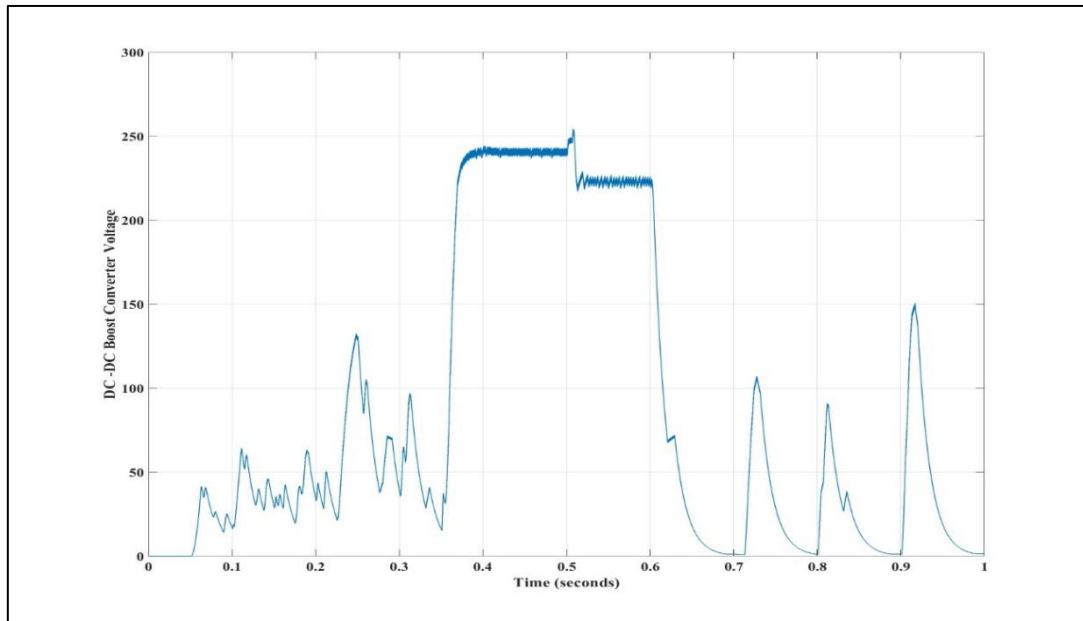


Figure III.19 : Variation de la tension du hacheur Boost

- ✚ Résultat de simulation avec des conditions fixes

- $T = 25^\circ$
- $G = 1000 \text{ W/m}^2$
- Variation de courant de l'hacheur Boost.

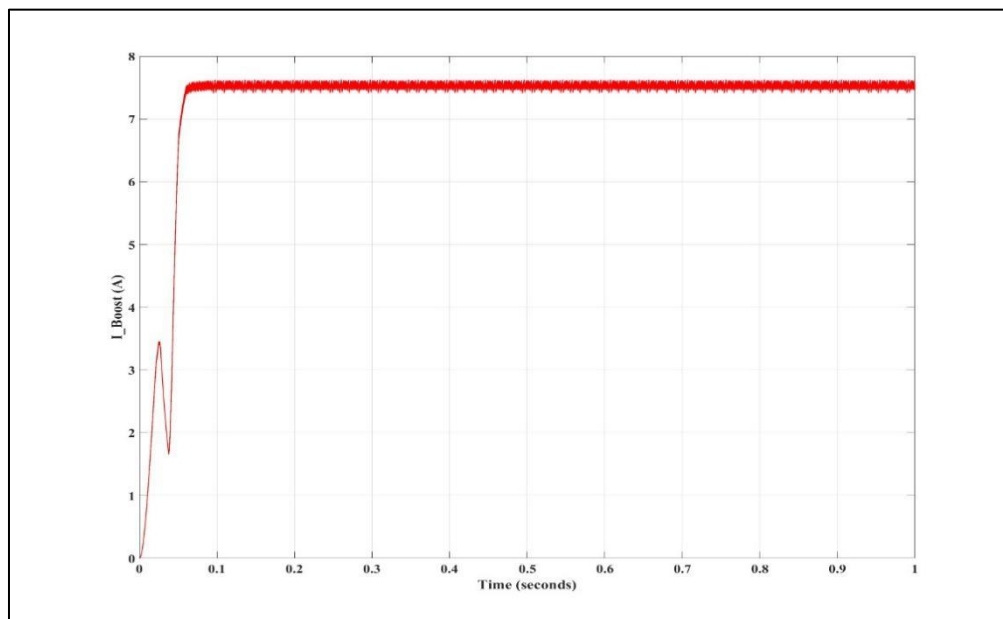


Figure III.20 : Variation de courant du hacheur Boost

- Variation de la puissance du hacheur Boost

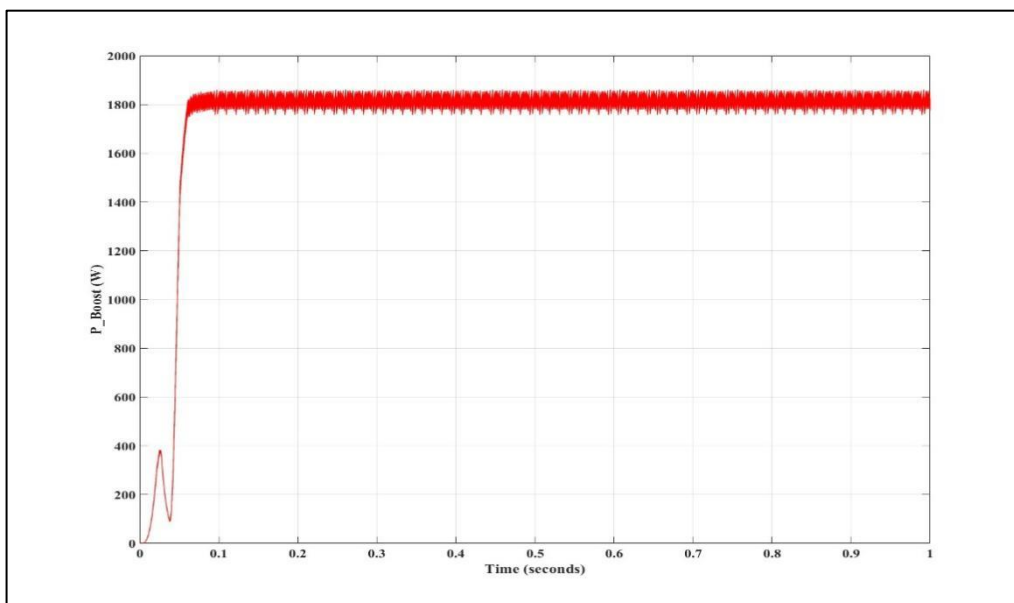


Figure III.21 : Variation de la puissance du hacheur Boost

- Variation de la tension du hacheur Boost

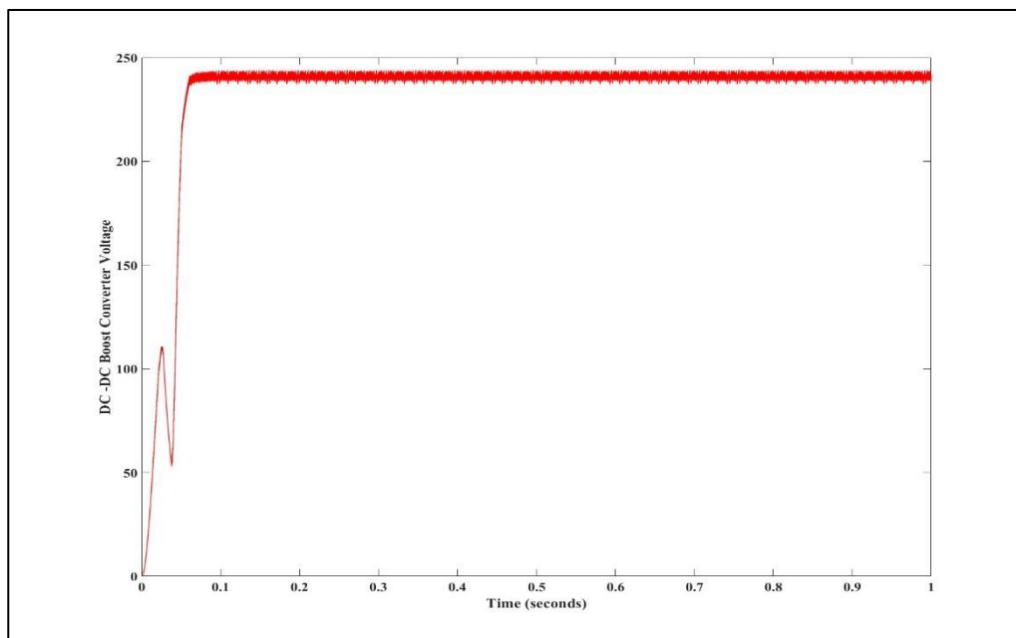


Figure III.22 : Variation de la tension de l'hacheur Boost

- **Analyse des résultats de DNN :**

La puissance de sortie est très proche de celle à la sortie du panneau. La différence entre les deux puissances est limitée dans quelques watts. Ces pertes sont dues à la commutation et la conduction du transistor A chaque changement d'irradiation, le contrôleur ANN a pu poursuivre la puissance maximale après un temps de réponse court.

- **Comparaison des deux méthodes :**

Étant donné que notre projet a étudié deux commandes de la méthode MPPT : celle de la méthode de perturbation et observation et celle des réseaux de neurones, il est pertinent de procéder à une comparaison directe de ces deux méthodes afin d'identifier leurs avantages et leurs inconvénients.

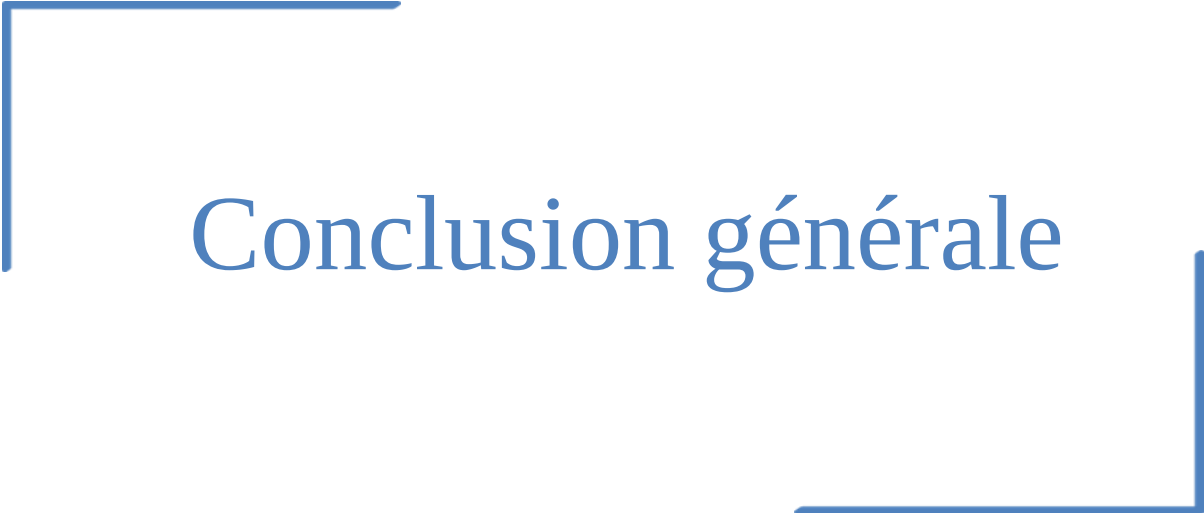
Nous constatons que les deux méthodes ont pu poursuivre la puissance du panneau solaire malgré les variations climatiques. Cependant, pour des valeurs non optimales, la méthode P&O génère une puissance plus élevée que la méthode d'ANN. Ces valeurs semblent exagérées par rapport aux valeurs théoriques correspondantes.

Néanmoins, nous constatons que la méthode P&O présente des oscillations lors du passage d'une valeur d'irradiation à une autre, tandis que l'ANN n'affiche pas de telles oscillations. Cela est dû à la conception de l'ANN, qui fournit le rapport cyclique précis pour les valeurs d'entrée de température et de rayonnement en temps réel, permettant ainsi une estimation précise de la puissance du système. Par conséquent, nous pouvons affirmer que le système basé sur l'ANN est plus stable que celui utilisant la méthode P&O.

Il convient de noter qu'en augmentant l'intervalle de perturbation, on peut réduire le temps de réponse de la méthode P&O. Cependant, cette augmentation affecte négativement la précision du système en régime permanent, ce qui est préjudiciable pour cette méthode en raison de sa modeste précision qu'elle offre.

III.12 Conclusion

Ce chapitre présente l'ANN basé sur MPPT pour obtenir une puissance maximale pour le système dans toutes les conditions atmosphériques et compare les résultats avec la méthode P&O conventionnelle. Pour trouver lequel des algorithmes donne les meilleures performances. Les entrées ANN sont des paramètres électriques obtenus à partir du générateur photovoltaïque dans des conditions atmosphériques changeantes et la sortie est le rapport cyclique du convertisseur élévateur. Le convertisseur DC-DC est utilisé pour suivre le MPP du générateur photovoltaïque. Ces techniques sont simulées avec Simulink/Matlab. Les résultats de la simulation permettent de conclure que le MPPT basé sur ANN donne de meilleures performances en termes de réponse dynamique et rapide, moins d'oscillations à l'état stable sous une irradiation solaire à changement rapide. Au contraire, la technique P&O ne parvient pas à suivre le MPP lorsque l'irradiation change rapidement.

A large, blue, L-shaped bracket graphic that frames the title 'Conclusion générale' on the left and bottom sides.

Conclusion générale

La demande mondiale de l'énergie continue d'augmenter, et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie. Pour cela nous recherchons d'autre moyenne et ressources pour produire l'énergie qui peut satisfaire la demande. Parmi ces sources l'énergie solaire photovoltaïque, est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite.

Afin d'améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques, différents algorithmes de commandes MPPT ont été étudiées pour la poursuite du point maximum de puissance. Dans cet objectif, ce travail est une contribution pour la compréhension et la mise en place d'une commande MPPT permettant de traquer la puissance maximale à tout moment et sous différentes conditions atmosphériques.

Pour ce faire, on a commencé par introduire le lecteur pas à pas au domaine des systèmes photovoltaïques en rappelant quelques notions sur le rayonnement solaire, l'énergie solaire et l'énergie photovoltaïque.

Nous avons attaqué la modélisation d'un système photovoltaïque en commençant par le générateur photovoltaïque. On a observé les caractéristiques du générateur photovoltaïque (GPV) ainsi que ses performances sous l'influence de quelques paramètres atmosphériques tels que la température et l'ensoleillement, en le simulant sur Matlab/Simulink. Nous avons introduit la modélisation des convertisseurs DC/DC. Ensuite, on a détaillé le modèle du convertisseur Boost, qui représentait l'étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge. Et on a effectué la simulation de cet hacheur en remarquant que la tension de sortie était supérieure à la tension d'entrée.

Quant à la partie de commande MPPT, faisant objet de cette étude, elle a été bien détaillée dans le chapitre III. Nous avons présenté le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes classifications des commandes MPPT. Nous avons également détaillé les différentes méthodes MPPT rencontrées le plus souvent dans la littérature. L'existence de plusieurs types de commandes MPPT montre que ce domaine de recherche est en perpétuelle évolution et qu'il est difficile de trouver une ou plusieurs solutions universelles.

En outre, ce travail a présenté les différents algorithmes des réseaux de neurones et a argumenté le choix de l'algorithme de Deep Learning. En plus de la méthode des réseaux de neurones, l'algorithme P&O a également été expliqué. Cette dernière méthode reste la plus classique et la plus utilisée dans la production. La suite de ce projet a porté sur la simulation et la comparaison des deux méthodes précédemment mentionnées dans l'environnement Matlab/Simulink.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.



Références bibliographiques

- [1] A. Labouret-Michel Villos, "Energie solaire photovoltaïque", édition Dunod, Paris, 2006.
- [2] Abdelhak Aziz ; Propriétés électriques des composants électroniques minéraux et organiques. Conception et modélisation d'une chaîne photovoltaïque pour une meilleure exploitation de l'énergie solaire ; thèse de doctorat ; Université Toulouse ;2006.
- [3] Akassewa Tchapo Singo ; « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome » ; thèse de doctorat ; Université Henri Poincaré, Nancy-I ;2010.
- [4] AOUCHICHE NEDJMA ; « Conception d'une commande MPPT optimale à base d'intelligence artificielle d'un système photovoltaïque » ; thèse de doctorat ; université de Bourgogne Franche-Comté ; 2020.
- [5] Arias, M., Vázquez, A., & Sebastián, J. (2012). An overview of the AC-DC and DC-DC converters for LED lighting applications. *automatika*, 53(2), 156-172.
- [6] Aste, N., Del Pero, C., & Leonforte, F. (2017). Active refrigeration technologies for food preservation in humanitarian context—A review. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 22, 150-160.
- [7] ATIA Tarek, A. A. A. Modélisation des convertisseurs statiques Dc-Dc pour des applications Dans les énergies renouvelables (En utilisant MATLAB/Simulink).
- [8] Boualem BOUKEZATA ; « Etude et commande d'une chaine de conversion d'énergie d'un système solaire photovoltaïque » ; thèse de doctorat ; UNIVERSITE FERHAT ABBAS ;2018 ; SETIF.
- [9] Bratcu, A. I., Munteanu, I., Bacha, S., Picault, D., & Raison, B. (2010). Cascaded dc–dc converter photovoltaic systems: Power optimization issues. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(2), 403-411.
- [10] C. Cabal, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque », Thèse de doctorat, Université de Toulouse III, 2008.
- [11] Cédric Abbezzot ; « Système Inertiel de Stockage d'Energie couplé au générateur Photovoltaïque et piloté par un simulateur temps réel » ; thèse de doctorat ; UNIVERSITE DE CORSE-PASCAL PAOLI ;2014.
- [12] Claude Touzet ; LES RESEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS, INTRODUCTION AU CONNEXIONNISME ; thèse de doctorat ;1999.
- [13] Cuong Hung Tran ; « Améliorations d'une chaîne de conversion de l'énergie solaire en électricité autonome en vue d'application dans les pays en voie de développement » ; thèse de doctorat ; L'UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE ;2019.

- [14] Elgharbaoui, E., Essadki, A., & Nasser, T. (2014, November). MPPT commands for a photovoltaic generator using the Incremental Conductance Method and the fuzzy logic command. In 2014 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM) (pp. 1-6). IEEE.
- [15] Fonash, S. (2012). Solar cell device physics. Elsevier.
- [16] Grosan, C.; Abraham, A. Intelligent Systems: A Modern Approach; Intelligent Systems Reference Library; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2011.
- Huijbregts, M. A., Rombouts, L. J., Hellweg, S., Frischknecht, R., Hendriks, A. J., Van de Meent, D., ... & Struijs, J. (2006). Is cumulative fossil energy demand a useful indicator for the environmental performance of products
- [17] Laughton, C. (2010). Solar domestic water heating: The earthscan expert handbook for planning, design and installation. Routledge.
- [18] Maarouf, M. Aplicación de redes neuronales para la resolución de problemas complejos de confiabilidad y riesgo. Ph.D. Thesis, Universidad de las palmas, Gran Canaria, 2016.
- [19] Manganiello, P., Balato, M., & Vitelli, M. (2015). A survey on mismatching and aging of PV modules: The closed loop. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62(11), 7276-7286.
- [20] McCulloch, W.; Pitts, W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bull. Math. Biophys. 1943, 5, 115–133.
- Pepeene, R. D. (2018). Macroscopic and Microscopic surface features of Hydrogenated silicon thin films.
- [21] Ram, J. P., Babu, T. S., & Rajasekar, N. (2017). A comprehensive review on solar PV maximum power point tracking techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 67, 826-847.
- [22] Rojey, A. (2008). Énergie & climat : réussir la transition énergétique. Editions Technip.
- [23] Sampaio, P. G. V., & González, M. O. A. (2017). Photovoltaic solar energy: Conceptual framework. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 74, 590-601.
- [24] Schmidhuber, J. (2015). Deep learning in neural networks: An overview. Neural networks, 61, 85-117.
- SERONT, C. I., & L'OCCASION, D. R. (2021). Investir dans l'énergie renouvelable pour des collectivités saines, vertes et équitables.
- [25] Subudhi, B., & Pradhan, R. (2012). A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems. IEEE transactions on Sustainable Energy, 4(1), 89-98.
- [26] Vaillancourt, K., Labriet, M., Loulou, R., & Waaub, J. P. (2008). The role of nuclear energy in long-term climate scenarios: An analysis with the World-TIMES model. Energy Policy, 36(7), 2296-2307.
- [27] Vidaurre Puyol, A. (2012). Solar blimp.

- [28] J-C. Sabonnadière, “Nouvelles technologies de l’énergie 1- Les énergies renouvelables”, Hermès - Lavoisier, 2006.
- [29] Jimmy Royer, Thomas Djiako ; le pompage photovoltaïque ; Université d’Ottawa ; Canada ;1998.
- [30] Kety, K., Amou, K.A., Sagna, K., Tepe, K., Lare, Y. and Napo, K. (2016) Modélisation et simulation d’un générateur photovoltaïque: Cas du module polycristallin Ecoline LX-260P installé au dispensaire de Sévagan (Togo). *Revue des Energies Renouvelables*, 19, 633-645.
- [31] Liu, F., Li, B., Wang, Q., et al. (2018). "A Deep Learning Method for Photovoltaic Array MPPT Based on Neural Network." *IEEE Access*, 6, 72406-72416.
- [32] M. F. Shraif, “Optimisation et mesure de chaîne de conversion d’énergie photovoltaïque en énergie électrique”, Thèse Université Paul Sabatier, Toulouse 2002.
- [33] Naseer, A., Li, Y., Zhang, L., et al. (2019). "Deep Convolutional Neural Network Based Maximum Power Point Tracking of Photovoltaic System Under Partial Shading Conditions." *Energies*, 12(8), 1444.
- [34] Olivier Gergaud ; « Modélisation énergétique et optimisation économique d’un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » ; thèse de doctorat ; l’ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE de CACHAN ;2002.
- [35] P. Cumunel, Braun.J-P, Labouret. A, ‘cellules solaires’, édition dunod Paris 2001.
- [36] S. Pétion « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques » Thèse de doctorat, université de Toulouse 2009.
- [37] SAHRAOUI Hamza ; « Modélisation Et Commande Des Convertisseurs DC-DC Utilisés Dans Les Systèmes Photovoltaïques » ; thèse de doctorat ; L’UNIVERSITÉ DE Batna 2 Faculté de Technologie ;2016.
- [38] Thomas Mambrini « Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d’implantation et en fonction des différentes technologies » ; thèse de doctorat ; Université PARIS-SUD ;2014.
- [39] YAMINA AZZOUG « Commande de la charge d’une batterie dans une installation photovoltaïque » Maitrise en génie électrique, Université du Québec trois rivières2018.
- [40] Z Yang, Q Duan, J Zhong, M Mao, Z Xun, Analysis of improved PSO and perturb & observe global MPPT algorithm for PV array under partial shading condition, *Proceedings of the 29th Chinese control and decision conference (CCDC)*. IEEE (2017) 549–553.

- [41] Durukan, I. K., Bayal, Ö., Kurtuluş, G., Baş, Y., Gültekin, A., Öztürk, M. K., ... & Özbay, E. (2015). Examination of the temperature related structural defects of InGaN/GaN solar cells. *Superlattices and Microstructures*, 86, 379-389. f.
- [42] H. Rezzouk, « Simulation et implémentation d'algorithmes de recherche du point de maximum de puissance pour un système PV sur un circuit FPGA », Mémoire de Magister, Université de Jijel 2010.
- [43] Hajar Doubabi ; « Contribution à l'amélioration de l'efficacité d'une chaîne de conversion photovoltaïque » ; thèse de doctorat ; Université de Reims Champagne-Ardenne ;2021.
- [44] J. Bernard, énergie solaire, calculs et optimisation, édition 2004.
- [45] J. Ferrieux, f. Forest, « alimentations à découpage convertisseurs à résonance : principes composants modélisation ». Paris, France: Dunod, 1999

