

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة عمار ثليجي بالأغواط
UNIVERSITE AMAR TELIDJI LAGHOUAT



كلية التكنولوجيا

FACULTE DE TECHNOLOGIE

قسم الإلكترونيك

DEPARTEMENT ELECTRONIQUE

Mémoire de Master

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Électronique
Option : Instrumentation

Réalisé par : BELACHI Wafa

THEME

Optimisation de la puissance optimale : une nouvelle technique de commande MPPT pour une efficacité améliorée dans les systèmes photovoltaïques durables

Jury de soutenance :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
BELLAKHDAR Aissa	MCA	Présidente
VILBOIS Leila Amal	MAA	Examinateur
BIRANE Mouhoub	MCA	Encadreur

Année Universitaire 2024-2025

REMERCIEMENTS

Avant tout, Je remercie ALLAH pour m'avoir donné la force, la patience et la volonté d'accomplir ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mon encadreur, Birane Mouhoub, pour son accompagnement, ses conseils précieux et sa disponibilité.

Je remercie également les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et pour leurs remarques enrichissantes.

Enfin, mes remerciements vont à tous les enseignants qui m'ont transmis leur savoir tout au long de mon parcours universitaire.

Dédicace

Je voudrais dédier ce travail à :

Moi d'abord, pour mon temps et mes efforts

mes parents, amour infini

mes frères

ma famille

tous mes amis

mes amies proches Samiha et Naziha

tous les professeurs qui m'ont pleinement confié leur

confiance en me guidant et en m'enseignant.

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Introduction Générale :**Error! Bookmark not defined.**

Chapitre I

Généralité sur l'énergie solaire et système photovoltaïque

I.1 Introduction :**Error! Bookmark not defined.**

I.2 Source d'énergie solaire :**Error! Bookmark not defined.**

I.2.1 Energie solaire thermique:**Error! Bookmark not defined.**

I.2.2 Energie solaire photovoltaïque:.....**Error! Bookmark not defined.**

I.3 Composition du rayonnement solaire :**Error! Bookmark not defined.**

I.4. La cellule photovoltaïque(PV) :**Error! Bookmark not defined.**

I.4.1 Historique des cellules photovoltaïque (PV) :.....**Error! Bookmark not defined.**

I.4.2 Le principe de fonctionnement :**Error! Bookmark not defined.**

I.4.3 Types des cellules photovoltaïques (PV) :**Error! Bookmark not defined.**

I.5 Installation de panneaux solaires :**Error! Bookmark not defined.**

I.5.1 Connexion en série :**Error! Bookmark not defined.**

I.5.2 Connexion en parallèle :**Error! Bookmark not defined.**

I.6 Caractéristiques électriques d'un système photovoltaïque : **Error! Bookmark not defined.**

I.7 Courbes P-V et I-V à température et irradiance constantes :**Error! Bookmark not defined.**

I.8 Courbes P-V et I-V avec variations de température et d'irradiance : **Error! Bookmark not defined.**

I.9 Le stockage de l'énergie solaire :**Error! Bookmark not defined.**

I.9.1 Raison du stockage de l'énergie solaire :**Error! Bookmark not defined.**

I.9.2 Durée de stockage possible :**Error! Bookmark not defined.**

I.9.3 Les différentes technologies de stockage :**Error! Bookmark not defined.**

I.9.4 Comparaison des technologies :**Error! Bookmark not defined.**

I.9.5 Avantages concrets du stockage solaire par batterie : ..**Error! Bookmark not defined.**

I.9.6 Coût et rentabilité du stockage de l'énergie solaire :**Error! Bookmark not defined.**

I.9.7 Choisir la technologie de stockage adaptée au besoin : **Error! Bookmark not defined.**

I.10 Les batteries dans les systèmes photovoltaïques :**Error! Bookmark not defined.**

I.10.1 Définition générale :**Error! Bookmark not defined.**

I.10.2 Composition d'une cellule Li-ion :**Error! Bookmark not defined.**

I.10.3 Principe de fonctionnement :**Error! Bookmark not defined.**

I.10.4	Caractéristiques techniques principales :	Error! Bookmark not defined.
I.10.5	Modélisation électrique de la batterie :	Error! Bookmark not defined.
I.10.6	Avantages et inconvénients :	Error! Bookmark not defined.
I.10.7	Types de batteries Li-ion et comparaison :	Error! Bookmark not defined.
I.10.8	Rôle du BMS et intégration au système PV :	Error! Bookmark not defined.
I.11.	Conclusion :	Error! Bookmark not defined.

Chapitre II

Convertisseurs (DC/DC) et techniques des commandes MPPT

II.1	Introduction :	Error! Bookmark not defined.
II.2	Définition :	Error! Bookmark not defined.
II.3	Convertisseur Abaisseur (Buck) :	Error! Bookmark not defined.
II.3.1	Définition :	Error! Bookmark not defined.
II.3.2	Principe de fonctionnement :	Error! Bookmark not defined.
II.3.3	Schéma fonctionnel :	Error! Bookmark not defined.
II.3.4	Relations fondamentales :	Error! Bookmark not defined.
II.3.5	Analyse en mode continu (CCM) :	Error! Bookmark not defined.
II.3.6	Avantages du convertisseur Buck :	Error! Bookmark not defined.
II.4	Convertisseur élévateur (Boost) :	Error! Bookmark not defined.
II.4.1	Définition :	Error! Bookmark not defined.
II.4.2	Principe de fonctionnement du convertisseur Boost (formulation originale) :	Error! Bookmark not defined.
II.4.3	Schéma fonctionnel :	Error! Bookmark not defined.
II.4.4	Etude d'un convertisseur boost :	Error! Bookmark not defined.
II.5	L'onduleur :	Error! Bookmark not defined.
II.5.1	Définition de l'onduleur :	Error! Bookmark not defined.
II.5.2	Caractéristiques principales :	Error! Bookmark not defined.
II.5.3	Types d'onduleurs :	Error! Bookmark not defined.
II.5.4	Applications de l'onduleur :	Error! Bookmark not defined.
II.5.5	Schéma de principe d'un onduleur monophasé :	Error! Bookmark not defined.
II.6	Les Techniques MPPT :	Error! Bookmark not defined.
II.6.1	Les techniques MPPT classiques :	Error! Bookmark not defined.
II.6.2	Les techniques MPPT modernes (intelligentes) :	Error! Bookmark not defined.
II.7	Conclusion :	Error! Bookmark not defined.

Chapitre III

Simulation et résultats

III.1	Introduction :	Error! Bookmark not defined.
-------	----------------------	-------------------------------------

III.2 Générateur Photovoltaïque (PV) :	Error! Bookmark not defined.
III.2.1 Les courbes :	Error! Bookmark not defined.
III.3 Convertisseur Boost :	Error! Bookmark not defined.
III.3.1 Les courbes :	Error! Bookmark not defined.
III.3.2 Calcul Vs théorique :	Error! Bookmark not defined.
III.4 Système PV avec commande MPPT P&O :	Error! Bookmark not defined.
III.4.1 Les courbes :	Error! Bookmark not defined.
III.5 Système PV avec commande MPPT FLC :	Error! Bookmark not defined.
III.5.1 Table de vérité FLC :	Error! Bookmark not defined.
III.5.2 Les courbes :	Error! Bookmark not defined.
III.6 Comparaison des puissances : P&O vs FLC :	Error! Bookmark not defined.
III.7 Conclusion :	Error! Bookmark not defined.
Conclusion Générale :	Error! Bookmark not defined.

Symboles :	Unités :
<ul style="list-style-type: none"> ➤ I ➤ V ➤ Rs ➤ Rsh ➤ Iph ➤ I0 ➤ K ➤ Vmp ➤ Imp ➤ FF ➤ PV ➤ GPV ➤ N ➤ M ➤ DC ➤ DC/DC ➤ Boost ➤ Ve ➤ Vs ➤ MPPT ➤ P&O ➤ FLC ➤ SOC ➤ P ➤ I-V ➤ P-V ➤ Dcy ➤ G ➤ T ➤ PWM ➤ Isc ➤ Voc 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Courant (A) ➤ Tension (V) ➤ La résistance série (ohm) ➤ La résistance shunt (ohm) ➤ La photo courant (A) ➤ Le courant de saturation (A) ➤ La constante de Boltzmann (J/K) ➤ La tension maximale du module sous conditions standards (V) ➤ Le courant maximal sous conditions standards (A) ➤ Facteur de forme ➤ Système photovoltaïque ➤ Générateur photovoltaïque (W/m2) ➤ Nombre de modules dans le panneau en série. ➤ Nombre de modules dans le panneau en parallèle. ➤ Courant continu (A) ➤ Convertisseur courant continu/courant continu ➤ Convertisseur élévateur ➤ Tension d'entrée (V) ➤ Tension de sortie (V) ➤ Poursuite du point de puissance Maximale ➤ Perturbation et observation ➤ Commande par logique floue ➤ état de charge (des batteries) ➤ Puissance (W) ➤ Courbe courant-tension ➤ Courbe puissance-tension ➤ Rapport cyclique ➤ Irradiance solaire (W/m2) ➤ Température (°C) ➤ modulation de largeur d'impulsion ➤ courant de court-circuit ➤ tension de circuit ouvert

Liste des Figures

Figures	page
Figure. I.1 Panneau solaire thermique	5
Figure. I.2 différents Composantes du rayonnement solaire recus sur plan incliné	6
Figure. I.3 Le principe de la cellule photovoltaïque(PV).	8
Figure. I.4 Les différents panneaux solaires photovoltaïques.	10
Figure. I.5 De la cellule solaire au système photovoltaïque.	10
Figure. I.6 Branchement de panneaux en série	11
Figure. I.7 Branchement de panneaux en parallèle	11
Figure. I.8 Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire	12
Figure. I.9 Caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïque (PV)	13
Figure. I.10 Courbe P-V du panneau photovoltaïque (PV)	14
Figure. I.11 Courbe I-V du panneau photovoltaïque (PV)	14
Figure. I.12 Courbe P-V a différentes irradiances du panneau photovoltaïque (PV)	15
Figure. I.13 Courbe I-V a différentes températures du panneau photovoltaïque (PV)	16
Figure. I.14 Schéma de la batterie lithium-ion.	19
Figure. I.15 Principe de fonctionnement de la batterie.	20
Figure. I.16 Modèle de circuit équivalent pour les cellules Li-ion	21
Figure. I.17 Comparaison entre les batteries NMC et LFP	22
Figure. II.1 convertisseur DC/DC	26
Figure. II.2 schéma du circuit du convertisseur Buck	27
Figure. II.3 schéma du circuit du convertisseur Boost	29
Figure. II.4 états d'ouverture et fermeture de l'interrupteur	30
Figure. II.5 Forme d'onde de convertisseur boost conduction continue	32
Figure. II.6 Caractéristique statique réelle en conduction continue d'un Hacheur parallèle	34
Figure. II.7 Schéma d'onduleur monophasé	38
Figure. II.8 Algorithme MPPT basé sur la commande P&O	39
Figure. II.9 Structure classique d'un FLC	44
Figure. III.1 simulation de générateur PV	50
Figure. III.2 courbes P-V et I-V de Température constante (25°C)	

Et Irradiation = 1000 W/m ²	50
Figure. III.3 courbes P-V et I-V de Irradiation constante (1000 W/m ²), Températures : 25°C, 30°C, 35°C, 45°C	51
Figure. III.4 courbes P-V et I-V Température constante (25°C), Irradiations : 1, 0.7, 0.5, 0.3, 0.1 kW/m ²	52
Figure. III.5 simulation de convertisseur boost	53
Figure. III.6 courbe de tension de sortie	53
Figure. III.7 courbe de rapport cyclique	54
Figure. III.8 Simulation de Système PV avec commande MPPT P&O	56
Figure. III.9 courbe de rapport cyclique	57
Figure. III.10 courbe de courant de sortie	57
Figure. III.11 courbe de tension de sortie	58
Figure. III.12 courbe de puissance	58
Figure. III.13 Simulation de Système PV avec commande MPPT FLC	59
Figure. III.14 courbe de courant de sortie	60
Figure. III.15 courbe de tension de sortie	61
Figure. III.16 courbe de puissance	61
Figure. III.17 courbes de comparaison entre les deux méthodes	62

Liste des tableaux

Tableau	page
Tableau I.1 : comparaison par les différents technologies de stockage	18
Tableau III.1 : Tableau de variation de Dcy et son impact sur Vs	54
Tableau III.2 : Table de vérité FLC	59

Introduction Générale

Introduction Générale :

Dans un monde confronté à des défis énergétiques, économiques et environnementaux croissants, la durabilité des ressources devient un enjeu majeur pour l'humanité. L'exploitation intensive des énergies fossiles, bien qu'elle ait permis un développement rapide, provoque aujourd'hui des effets néfastes tels que le réchauffement climatique, la pollution atmosphérique et la raréfaction des ressources. La transition vers les énergies renouvelables s'impose donc comme une nécessité pour garantir un avenir énergétique propre et durable.

Parmi ces sources, l'énergie solaire occupe une place privilégiée grâce à son abondance, sa gratuité et sa disponibilité quasi universelle. La conversion photovoltaïque permet de transformer directement le rayonnement solaire en électricité, offrant une solution adaptée aux régions à fort ensoleillement. Au cours de la dernière décennie, des avancées significatives dans les matériaux photovoltaïques, tels que les cellules à haut rendement et les panneaux bifaciaux, ont permis d'améliorer considérablement la production énergétique. De plus, l'intégration de systèmes de stockage et de micro-réseaux intelligents renforce la fiabilité et l'efficacité de l'énergie solaire, même dans des zones isolées ou soumises à des conditions climatiques variables. Cependant, la performance des systèmes photovoltaïques reste limitée par les variations du rayonnement, de la température et des conditions climatiques.

Pour améliorer le rendement global, il est essentiel d'adopter des techniques de contrôle capables d'ajuster en temps réel le fonctionnement du système. Les algorithmes de suivi du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking – MPPT) permettent d'extraire la puissance optimale du générateur photovoltaïque. Les méthodes classiques, telles que Perturb and Observe (P&O) et Incremental Conductance, sont simples à mettre en œuvre mais présentent certaines limites, notamment des oscillations et une lenteur de convergence. Pour y remédier, des approches intelligentes comme la logique floue (Fuzzy Logic Control – FLC) ou des stratégies hybrides combinant techniques traditionnelles et intelligence artificielle ont été développées afin d'améliorer la rapidité et la stabilité du suivi.

L'objectif de ce mémoire est d'étudier et de comparer les performances de différentes stratégies MPPT, en mettant en œuvre une approche hybride associant méthodes classiques et intelligentes. Le système étudié comprend un convertisseur DC/DC de type Boost et un banc de batteries assurant la continuité de l'alimentation. Des modélisations et simulations sous MATLAB/SIMULINK permettront d'évaluer la réactivité, la stabilité et le rendement des algorithmes proposés dans des conditions variables d'ensoleillement. Ce travail s'inscrit dans

une démarche visant à optimiser la conversion photovoltaïque et à contribuer au développement de solutions énergétiques plus efficaces et durables.[45; 46; 47]

Chapitre I

Généralité sur l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïque

I.1 Introduction :

Les énergies renouvelables contribuent à réduire la dépendance aux combustibles fossiles, responsables d'émissions polluantes. Parmi elles, l'énergie solaire occupe une place centrale grâce à l'abondance et à la disponibilité quasi inépuisable du rayonnement solaire.

Issue des réactions de fusion nucléaire au cœur du Soleil, elle parvient sur Terre sous forme de rayonnements électromagnétiques couvrant un large spectre. Dans le domaine énergétique, l'« énergie solaire » désigne principalement :

le solaire photovoltaïque, qui convertit directement la lumière solaire en électricité ;

le solaire thermique, qui capte la chaleur pour fournir de la chaleur utile ou produire de l'électricité via le solaire thermodynamique.

L'énergie solaire est aussi à l'origine de phénomènes naturels tels que la photosynthèse, le cycle de l'eau et les vents, soutenant ainsi la majorité des formes de vie et d'autres sources d'énergie. Grâce à son potentiel considérable, elle représente un pilier de la transition énergétique et reste au centre de nombreux travaux de recherche visant à améliorer l'efficacité et la durabilité des technologies solaires [1; 20; 21; 22].

I.2 Source d'énergie solaire :

I.2.1 Energie solaire thermique:

Le rayonnement solaire est à l'origine de l'énergie solaire thermique, qui est captée pour chauffer un fluide caloporteur (liquide ou gaz). Cette énergie peut être utilisée directement pour produire de l'eau chaude sanitaire, du chauffage, ou d'autres applications thermiques. Elle peut également être convertie en énergie électrique en produisant de la vapeur d'eau qui entraîne des alternateurs. L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie renouvelable qui exploite le rayonnement émis par le Soleil. Il existe également une autre forme d'énergie solaire notable, l'énergie solaire photovoltaïque, qui utilise l'effet photoélectrique pour convertir les photons solaires en électricité [2].



Figure. I.1 Panneau solaire thermique [25].

I.2.2 Energie solaire photovoltaïque:

L'énergie photovoltaïque est une source d'énergie renouvelable reposant sur la conversion directe du rayonnement solaire en électricité. Cette transformation est rendue possible grâce à l'effet photovoltaïque, un processus observé dans certains matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, capables de produire un courant électrique sous l'effet de la lumière solaire [3].

I.3 Composition du rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est constitué de plusieurs composantes :

- Le rayonnement direct (ou rayonnement en faisceau) : il s'agit du rayonnement solaire qui atteint la surface terrestre directement, sans être dévié par l'atmosphère. Son intensité est élevée, mais il est fortement dépendant des conditions météorologiques (ciel dégagé).
- Le rayonnement diffus : c'est la partie du rayonnement solaire qui est dispersée par les particules atmosphériques, les molécules d'air et les nuages. Il peut atteindre une surface même lorsqu'elle est ombragée.
- L'albédo (rayonnement réfléchi) : c'est la fraction du rayonnement solaire qui est réfléchi par la surface terrestre (neige, sable, végétation, etc.) vers les modules photovoltaïque. Il varie selon la nature et la couleur du sol [4].

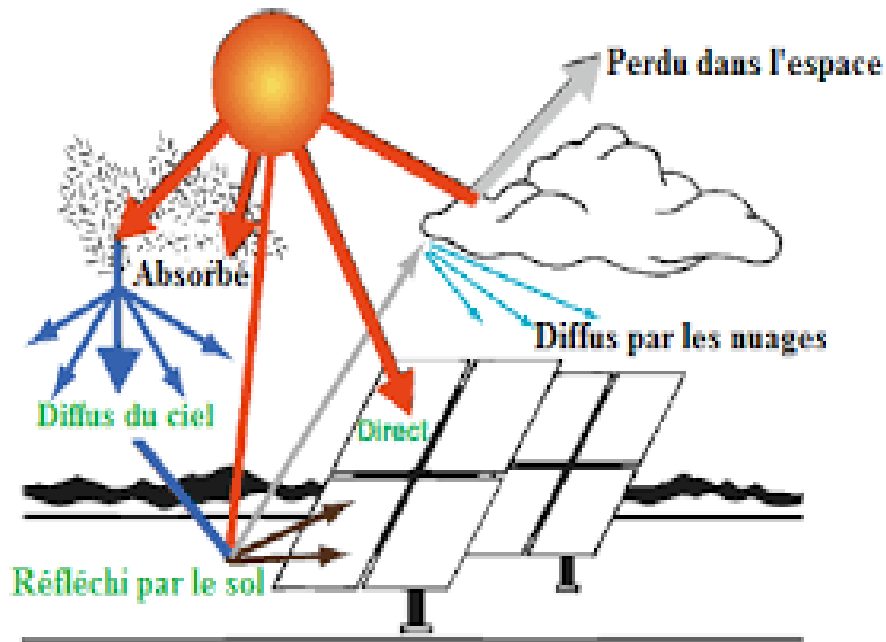


Figure. I.2 différents Composantes du rayonnement solaire recus sur plan incliné [5].

I.4. La cellule photovoltaïque(PV) :

I.4.1 Historique des cellules photovoltaïque (PV) :

La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui convertit l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique. Elle fut découverte en 1839 par le physicien français Antoine Becquerel. Ce n'est que dans les années 1960, avec l'essor des satellites spatiaux, que les cellules photovoltaïques ont commencé à avoir des applications concrètes. Par la suite, les panneaux solaires, constitués d'assemblages de cellules, ont commencé à apparaître sur les toits vers la fin des années 1980. Depuis le début du XXIe siècle, le développement du photovoltaïque n'a cessé de croître, notamment à travers les grands parcs de production d'électricité [6].

I.4.2 Le principe de fonctionnement :

Le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque repose sur les propriétés des semi-conducteurs. Lorsqu'ils sont percutés par les photons de la lumière, ces matériaux mettent en mouvement un flux d'électrons.

Les photons sont des particules élémentaires qui transportent l'énergie solaire à une vitesse de 300 000 km/s. Albert Einstein les appelait les « grains de lumière » dans les années 1920. Lorsqu'ils frappent un semi-conducteur comme le silicium, ils arrachent des électrons aux

atomes de ce matériau. Ces électrons se mettent alors en mouvement de manière désordonnée, cherchant des « trous » pour se repositionner.

* Mais pour produire un courant électrique, il faut que tous ces électrons se déplacent dans le même sens. Pour cela :

* On utilise deux types de silicium dopé :

- La face exposée au soleil est dopée avec des atomes de phosphore (ayant plus d'électrons que le silicium).

- L'autre face est dopée avec des atomes d'un élément ayant moins d'électrons (comme le bore).

* Cela crée une jonction P-N :

- Le côté riche en électrons devient la borne négative (N).

- Le côté pauvre en électrons devient la borne positive (P).

- Un champ électrique se forme entre les deux.

* Lorsque les photons excitent les électrons :

- Les électrons migrent vers la zone N grâce au champ électrique.

- Les trous migrent vers la zone P.

- Les contacts électriques récupèrent les électrons dans chaque zone.

- Un courant continu est ainsi créé et envoyé dans un circuit extérieur sous forme d'énergie électrique.

* Enfin, une couche anti-reflet est appliquée pour éviter que les photons soient trop réfléchis par la surface et se perdent [6 ; 23 ; 24].

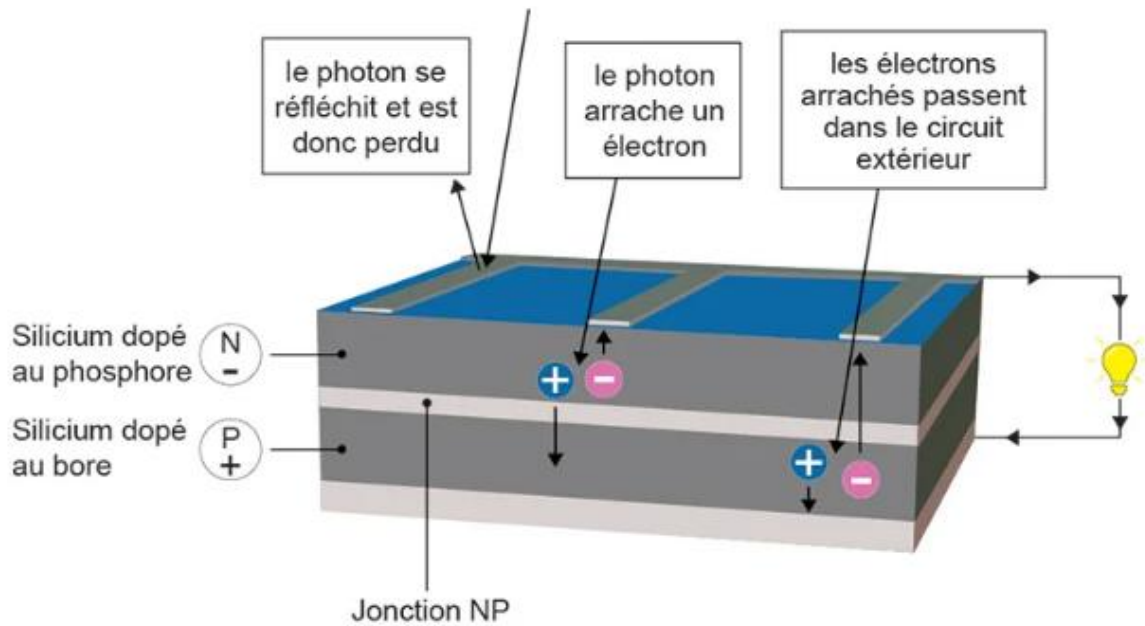


Figure. I.3 Le principe de la cellule photovoltaïque(PV) [6].

I.4.3 Types des cellules photovoltaïques (PV) :

L'énergie solaire photovoltaïque repose principalement sur trois grandes familles de cellules solaires, chacune possédant ses propres caractéristiques techniques et avantages selon le contexte d'utilisation. Il s'agit des cellules mono-cristallines, poly-cristallines et à couches minces.

I.4.3.1 Cellules mono-cristallines :

Ces cellules sont issues d'un unique cristal de silicium, ce qui leur confère une structure homogène. Elles se distinguent par leur couleur noire uniforme et leur efficacité élevée.

* Rendement estimé :

- entre 20 % et 27 %

* Avantages :

- Excellente efficacité énergétique.
- Bon comportement en cas de faible ensoleillement.
- Longue durée de fonctionnement.

* Inconvénients :

- Coût de production relativement élevé.
- Performance affectée en présence d'ombres.

I.4.3.2 Cellules poly-cristallines :

Élaborées à partir de multiples cristaux de silicium fondus ensemble, ces cellules présentent un aspect bleu tacheté. Leur processus de fabrication est plus simple et moins coûteux.

* Rendement moyen :

- entre 15 % et 20 %

* Avantages :

- Prix plus accessible que les mono-cristallines.
- Fabrication plus rapide.
- Bon rapport qualité/prix.

* Inconvénients :

- Rendement inférieur.
- Sensibilité accrue aux variations climatiques.

I.4.3.3 Cellules à couches minces :

Ces cellules utilisent des matériaux semi-conducteurs déposés en fines couches sur divers supports (verre, plastique, etc.). Elles regroupent plusieurs technologies comme le silicium amorphe (a-Si), le CdTe, et le CIGS.

* Rendement typique :

- entre 10 % et 13 %, jusqu'à 16 % dans certains cas.

* Avantages :

- Légèreté et flexibilité.
- Coûts de fabrication réduits.
- Bonne performance à haute température et en lumière diffuse.

* Inconvénients :

- Efficacité plus faible.
- Durabilité moindre comparée aux cellules en silicium cristallin [7 ; 35].

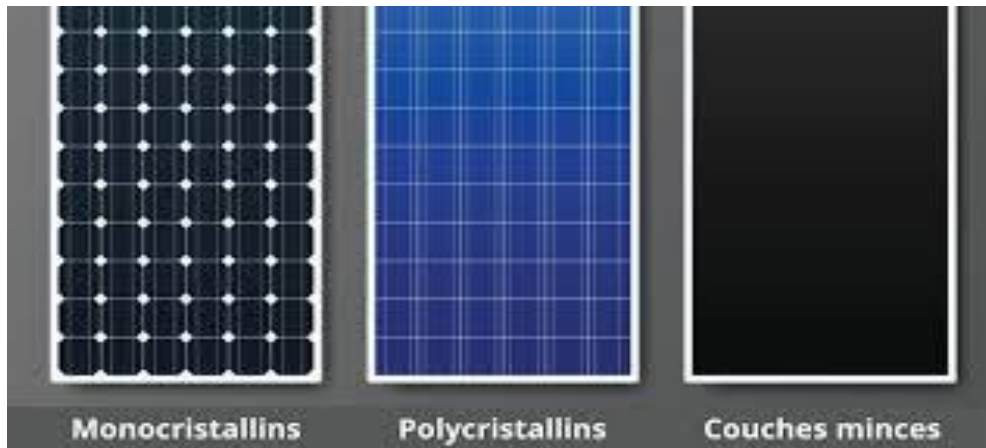


Figure. I.4 Les différents panneaux solaires photovoltaïques [8].

I.5 Installation de panneaux solaires :

Un système de panneaux solaires est composé de plusieurs modules photovoltaïques, chacun composé de plusieurs cellules photovoltaïques. Pour que les panneaux solaires d'un système photovoltaïque fonctionnent, plusieurs modules photovoltaïques doivent être connectés en série ou en parallèle, selon les besoins du système [19].

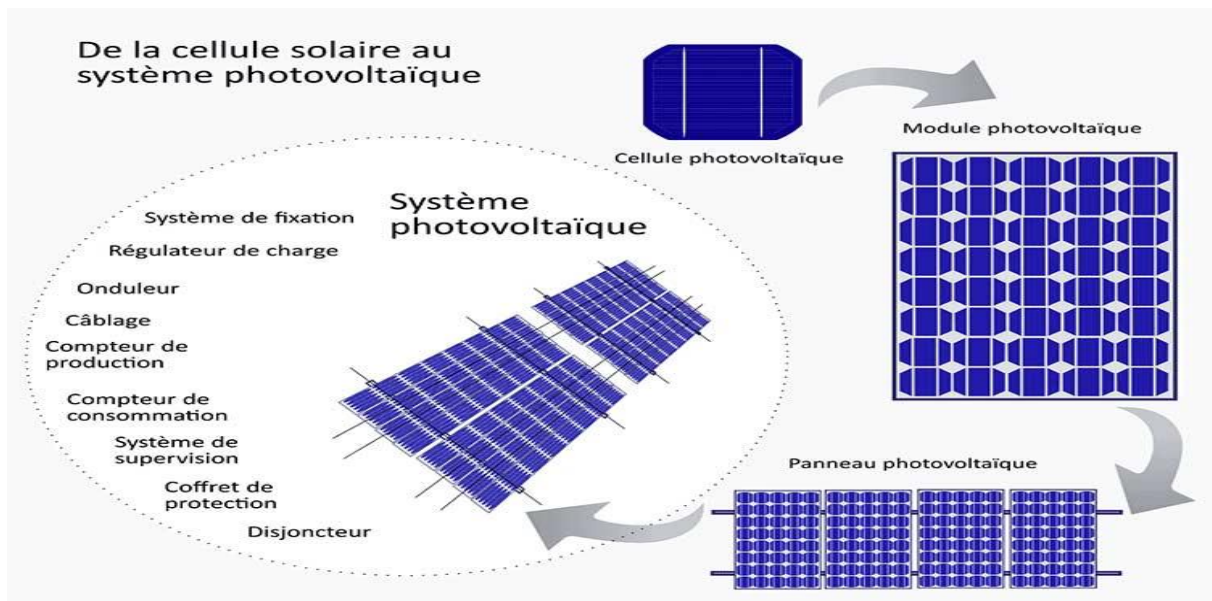


Figure. I.5 De la cellule solaire au système photovoltaïque [19].

I.5.1 Connexion en série :

La connexion en série consiste à additionner les tensions tout en maintenant la même intensité de courant si les modules photovoltaïques ont la même intensité. En revanche, si les intensités diffèrent, l'intensité la plus faible est retenue et la connexion s'effectue en reliant les bornes négatives d'un module aux bornes positives de l'autre module, et ainsi de suite [19].

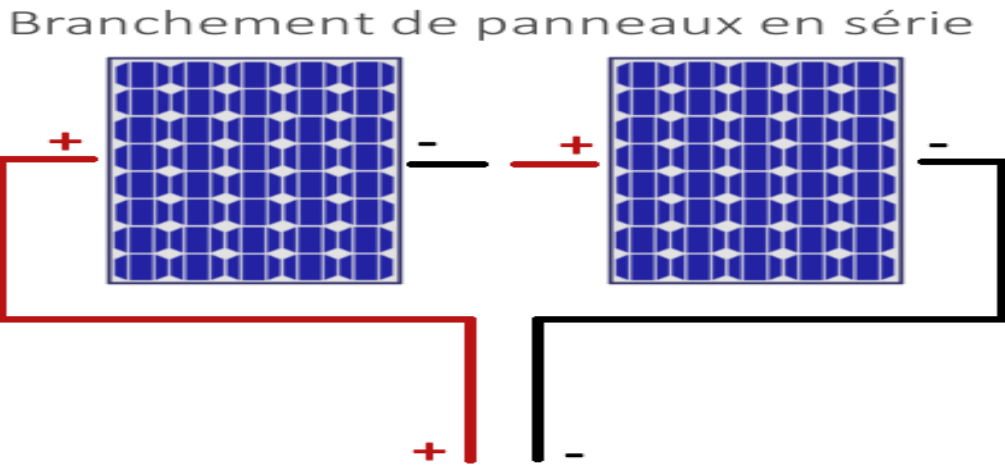


Figure. I.6 Branchement de panneaux en série [19].

I.5.2 Connexion en parallèle :

Le raccordement en parallèle est l'opposé du raccordement en série, où les courants s'additionnent tout en pouvant avoir des intensités différentes, tandis que la tension reste constante. Le raccordement entre les unités doit se faire avec la même tension afin d'éviter un court-circuit. L'objectif de ce type de connexion est d'obtenir une intensité de courant élevée. Le branchement se fait en connectant ensemble les bornes positives entre elles et les bornes négatives entre elles [19].

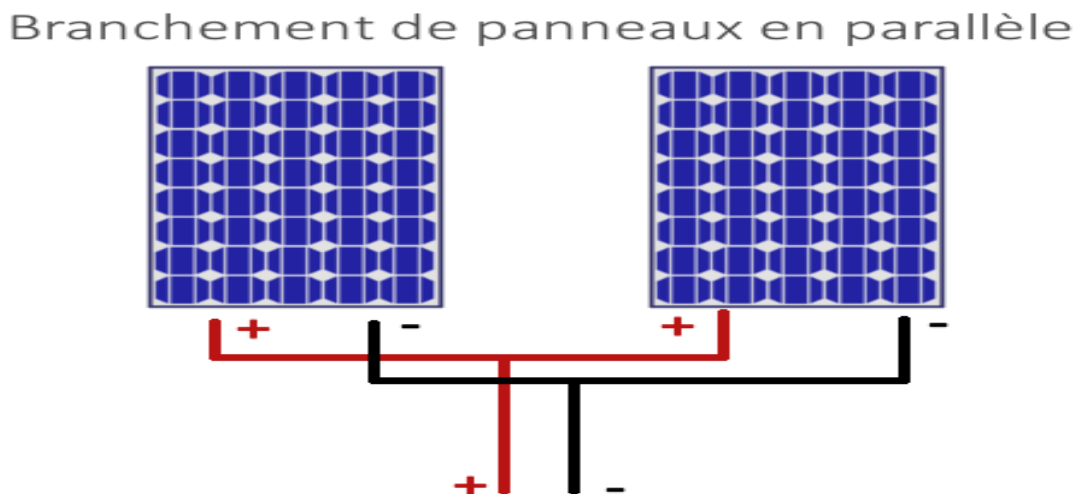


Figure. I.7 Branchement de panneaux en parallèle [19].

I.6 Caractéristiques électriques d'un système photovoltaïque :

A- circuit :

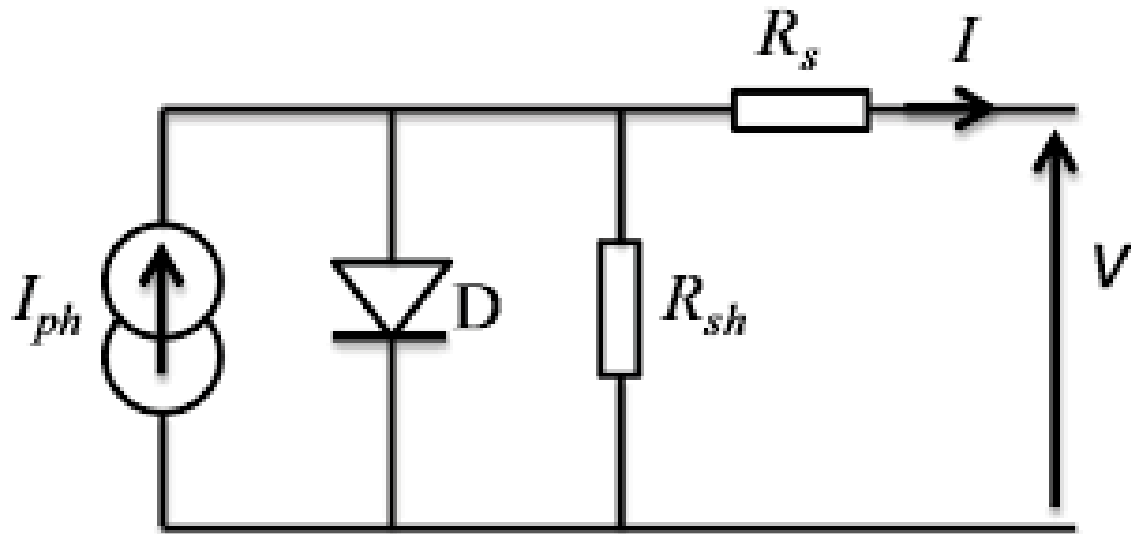


Figure. I.8 Schéma du circuit électrique équivalent d'une cellule solaire [9].

I ; V : Le courant et la tension du GPV.

R_s ; R_{sh} : La résistance série et parallèle.

I_0 : le courant de saturation inverse.

I_{ph} : la photo courant.

q : La charge de l'électron = $1,6 \cdot 10^{-19}$ C.

T : La température de fonctionnement en Kelvin.

n : Le facteur de qualité de la cellule.

K : La constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K.

$$I = I_{ph} - I_D - \frac{V - R_s I}{R_{sh}} \quad (I.1)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V + R_s I}{nkT} \right)} - 1 \right] - \frac{V - R_s I}{R_{sh}} \quad (I.2)$$

Généralement, la résistance parallèle (R_{sh}) est très grande par rapport à la résistance série (R_s), son effet est donc très faible de telle sorte que l'on peut la négliger.

$$I = I_{ph} - I_0 \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{nkT} \right) - 1 \right] \quad (I.3)$$

B- caractéristiques électrique nominales :

* Un système photovoltaïque se caractérise par plusieurs grandeurs électriques fondamentales qui définissent ses performances :

1- La puissance maximale (P_{max}) : c'est la puissance délivrée par le module au point de fonctionnement optimal, appelée aussi Maximum Power Point (MPP). Elle est donnée par la relation :

$$P_{max} = V_{mp} \times I_{mp} \quad (I.4)$$

2- La tension en circuit ouvert (V_{oc}) : tension maximale mesurée lorsque le module n'est pas connecté à une charge.

3- Le courant de court-circuit (I_{sc}) : courant mesuré lorsque les bornes du module sont connectées directement l'une à l'autre (court-circuit).

4- Le facteur de remplissage (Fill Factor, FF) : indicateur de la qualité du module photovoltaïque, défini par :

$$FF = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{sc}} \quad (I.5)$$

5- Le rendement (η) : rapport entre la puissance électrique générée et l'énergie solaire incidente, exprimé en pourcentage :

$$\eta = \frac{P_{max}}{G \times A} \times 100 \quad (I.6)$$

6- Les coefficients de température : ils indiquent l'impact de la température sur les performances du module, en particulier sur la tension et la puissance maximale.

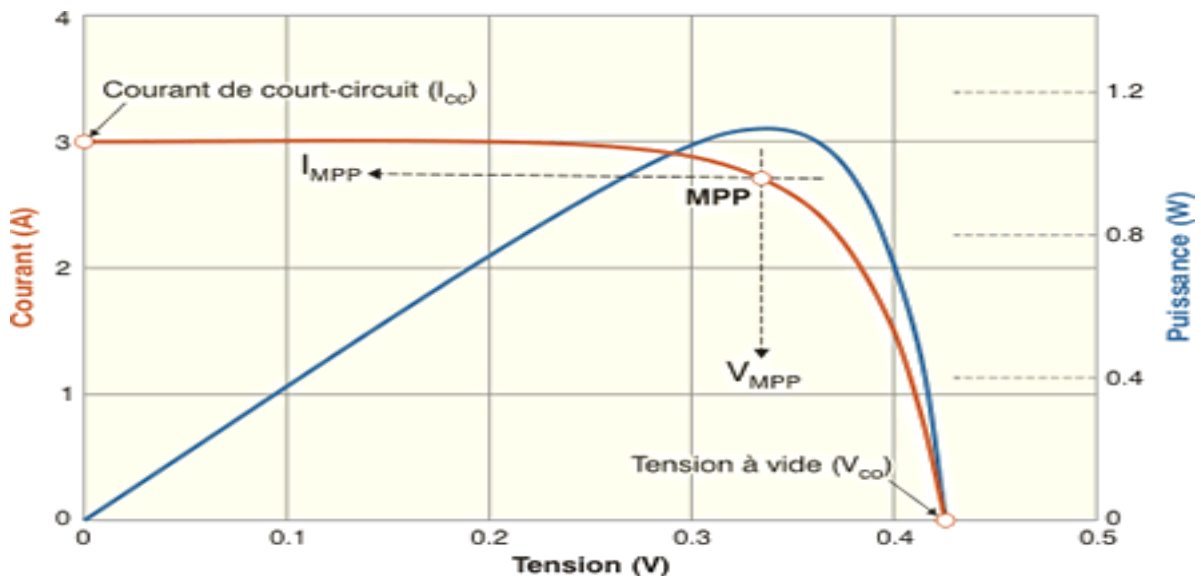


Figure. I.9 Caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïque (PV) [10].

Les courbes caractéristiques I-V (courant-tension) et P-V (puissance-tension) permettent de visualiser le comportement du panneau photovoltaïque et d'identifier le point de fonctionnement optimal (MPP). Ce dernier varie en fonction des conditions d'ensoleillement et de température, ce qui justifie l'utilisation de techniques de suivi du MPP telles que le MPPT [11].

I.7 Courbes P-V et I-V à température et irradiance constantes :

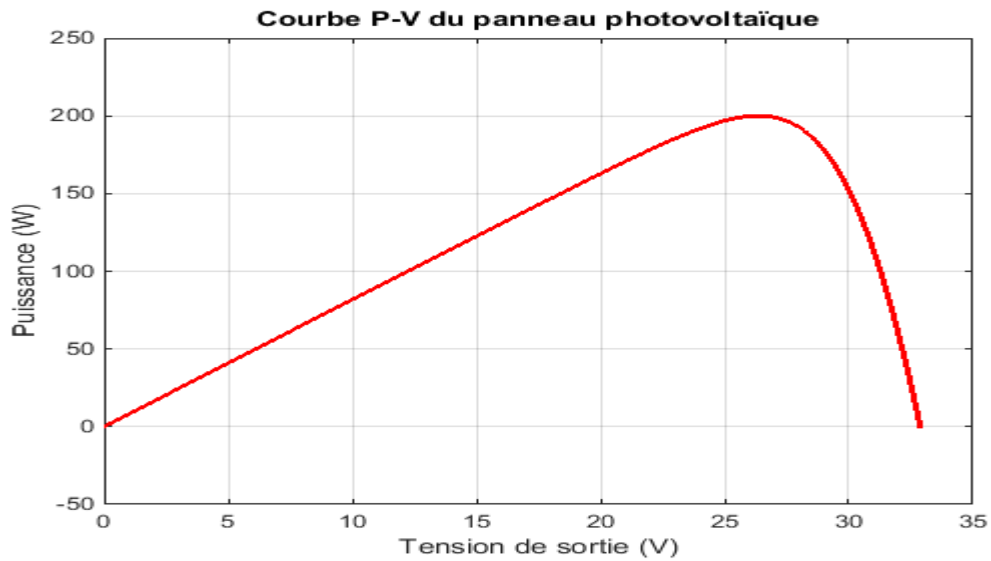


Figure. I.10 Courbe P-V du panneau photovoltaïque (PV).

Remarque : La courbe P-V est obtenue pour les mêmes conditions ($G = 1000 \text{ W/m}^2$, $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$) ; la puissance maximale atteinte est d'environ 200 W au point ($V_{mp} \approx 26,4 \text{ V}$, $I_{mp} \approx 7,58 \text{ A}$).

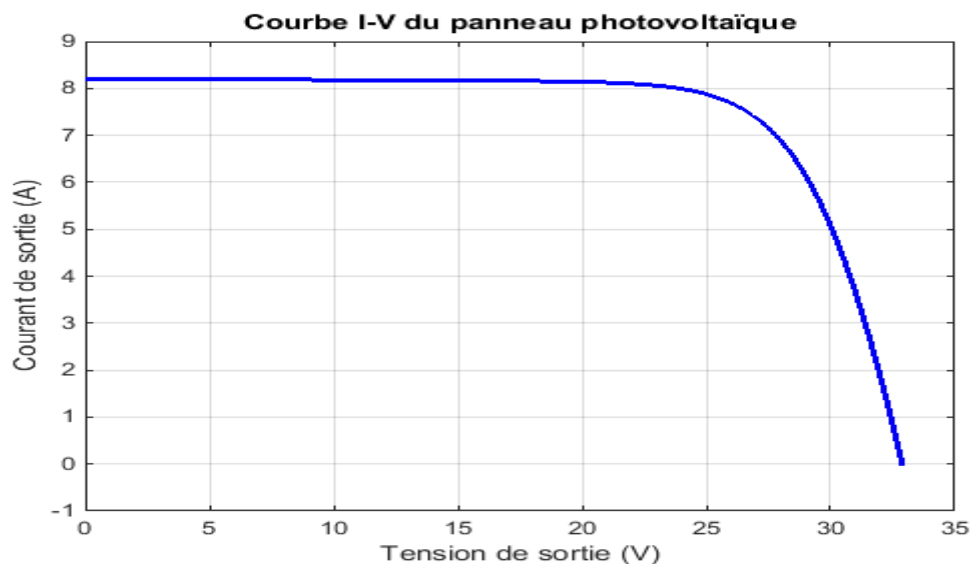


Figure. I.11 Courbe I-V du panneau photovoltaïque (PV).

Remarque : La courbe I-V est tracée pour un panneau photovoltaïque soumis à une irradiance de 1000 W/m^2 et une température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ (STC), avec un courant de court-circuit $\approx 8,21 \text{ A}$ et une tension en circuit ouvert $\approx 32,9 \text{ V}$.

I.8 Courbes P-V et I-V avec variations de température et d'irradiance :

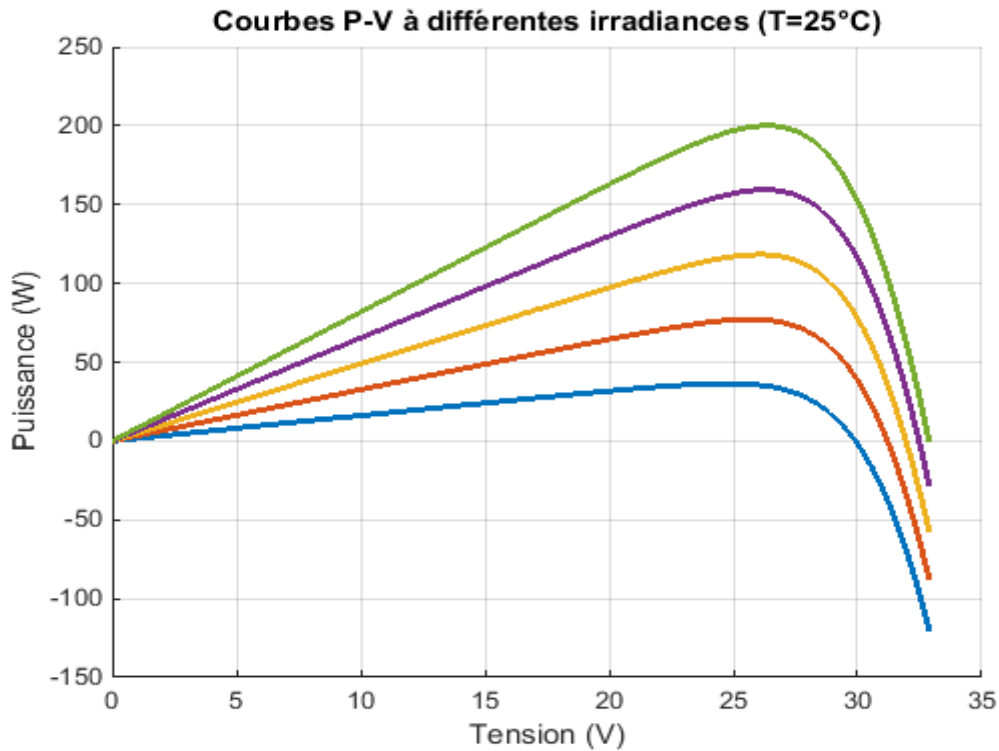
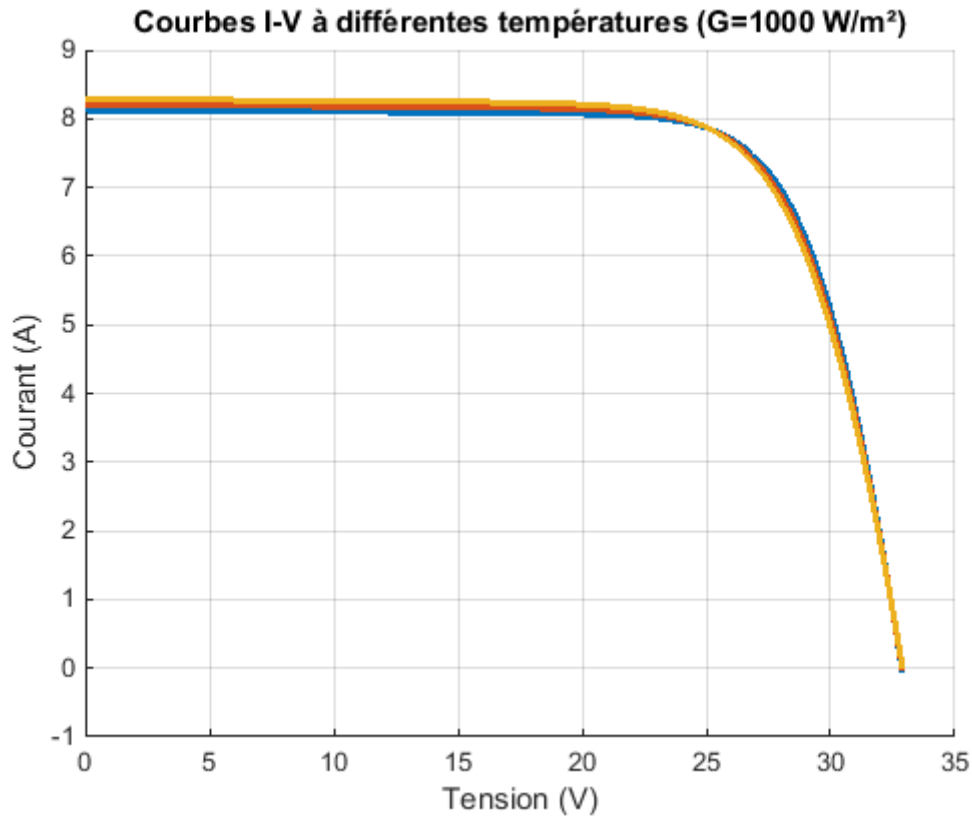


Figure. I.12 Courbe P-V à différentes irradiances du panneau photovoltaïque (PV).
Remarque : Les courbes P-V sont tracées à une température constante de 25 °C, sous différentes irradiances : 200, 400, 600, 800 et 1000 W/m², afin de montrer l'influence de l'irradiance sur la puissance générée.



Remarque : Les courbes I-V sont obtenues pour un panneau photovoltaïque soumis à une irradiance constante de 1000 W/m^2 , avec des températures de $0 \text{ }^\circ\text{C}$, $25 \text{ }^\circ\text{C}$ et $50 \text{ }^\circ\text{C}$ afin d'illustrer l'effet de la température sur le courant et la tension.

Figure. I.13 Courbe I-V a différentes températures du panneau photovoltaïque (PV).

I.9 Le stockage de l'énergie solaire :

I.9.1 Raison du stockage de l'énergie solaire :

L'énergie solaire est par nature intermittente, car elle dépend de l'ensoleillement disponible. Le stockage permet de lisser cette variabilité en assurant une alimentation continue, même la nuit ou lors des journées nuageuses. Il joue également un rôle critique en cas de coupures de courant, garantissant ainsi la fiabilité et la stabilité du système photovoltaïque [28].

I.9.2 Durée de stockage possible :

La durée pendant laquelle l'énergie peut être stockée dépend fortement de la technologie choisie. Par exemple, les systèmes de batteries modernes peuvent maintenir l'énergie pendant plusieurs jours, bien que des pertes soient inévitables lors du stockage et de la restitution. En moyenne, une batterie solaire bien dimensionnée peut couvrir jusqu'à cinq jours sans ensoleillement direct [28].

I.9.3 Les différentes technologies de stockage :

a. Le stockage thermique :

Ce type de stockage repose sur l'accumulation de chaleur dans des matériaux comme l'eau ou les sels fondus :

- * Principe : l'énergie solaire chauffe un fluide qui est conservé dans un réservoir isolé.
- * Restitution : cette chaleur est ensuite utilisée pour produire de la vapeur qui fait tourner une turbine.
- * Avantages :
 - Faible coût et faible impact environnemental.
 - Permet une grande capacité de stockage énergétique.
- * Inconvénients :
 - La chaleur se dissipe progressivement.
 - Moins adapté à une utilisation électrique directe, car la conversion chaleur-électricité n'est pas toujours efficace.

b. Le stockage mécanique :

Il utilise l'énergie excédentaire pour créer un mouvement ou de la pression :

- * Volant d'inertie : emmagasine l'énergie sous forme de rotation mécanique.
- * Pompage-turbinage : pompe de l'eau vers un réservoir en hauteur et la libère pour produire de l'électricité.
- * Air comprimé : stocke de l'air sous pression dans des réservoirs souterrains, qui est ensuite libéré pour faire tourner des turbines.
- * Avantages :
 - Réactivité rapide.
 - Bonne durée de vie.
- * Inconvénients :
 - Infrastructures coûteuses.
 - Densité énergétique plus faible.

c. Le stockage électrochimique (batteries) :

Le plus utilisé dans les systèmes photovoltaïques résidentiels et industriels. Plusieurs types existent :

* Batteries au plomb-acide : économiques mais lourdes, sensibles à la température, durée de vie limitée.

* Batteries Ni-Cd / Ni-MH : assez stables, mais moins performantes que le lithium.

* Batteries lithium-ion : la solution la plus avancée actuellement.

le lithium-ion est privilégié

- Excellente densité énergétique.
- Faible maintenance.
- Durée de vie plus longue.
- Profondeur de décharge élevée (jusqu'à 80 % ou plus).
- Faible encombrement [28].

I.9.4 Comparaison des technologies :

Technologie	Avantages	Inconvénients
Thermique	écologique, économique	Conversion indirecte, pertes thermiques
Mécanique	Durable, rapide	Volume nécessaire, coût élevé
Batteries Li-ion	Efficace, compacte, fiable	Prix d'achat plus élevé

Tableau I.1 comparaison par les différents technologies de stockage

I.9.5 Avantages concrets du stockage solaire par batterie :

- Permet une autonomie de plus de 12 heures sans soleil.
- Réduction significative de la consommation de carburant (dans les systèmes hybrides).
- Faibles émissions de CO₂.
- Pas de bruit ni de maintenance complexe.
- Amélioration du rendement global du système solaire.

I.9.6 Coût et rentabilité du stockage de l'énergie solaire :

Malgré un coût initial relativement élevé, notamment pour les batteries lithium-ion, le stockage solaire s'avère rentable sur le long terme. Grâce à leur efficacité, leur durabilité, et leur faible besoin en maintenance, ces systèmes permettent de réduire les dépenses d'exploitation, surtout dans les installations isolées ou hybrides. Cette solution contribue également à diminuer la dépendance aux générateurs thermiques et à limiter les émissions polluantes.

I.9.7 Choisir la technologie de stockage adaptée au besoin :

Le choix du système de stockage dépend principalement de plusieurs facteurs :

- La durée de stockage souhaitée.
- La disponibilité de l'espace et du budget.
- Le type d'application (résidentielle, industrielle, site isolé, etc.).
- Le besoin en autonomie et la fréquence d'utilisation [28].

I.10 Les batteries dans les systèmes photovoltaïques :

I.10.1 Définition générale :

Une batterie solaire est un dispositif électrochimique rechargeable conçu pour stocker l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques. Elle permet de fournir de l'électricité pendant les périodes d'absence de soleil, assurant ainsi une autonomie énergétique partielle ou totale [29].

I.10.2 Composition d'une cellule Li-ion :

Une cellule au lithium-ion comprend généralement :

- Anode (souvent en graphite)
- Cathode (ex. : oxyde de cobalt, phosphate de fer)
- Électrolyte (liquide conducteur d'ions lithium)
- Séparateur (membrane microporeuse qui évite le court-circuit)
- Boîtier métallique (protection mécanique)

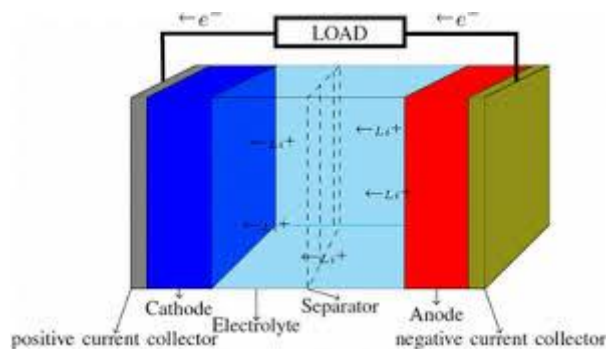


Figure. I.14 Schéma de la batterie lithium-ion [30].

I.10.3 Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement repose sur un cycle de réactions d'oxydoréduction :

- Lors de la charge : les ions Li^+ migrent de la cathode vers l'anode via l'électrolyte, tandis que les électrons suivent un chemin externe.
- Lors de la décharge : les ions reviennent vers la cathode, générant un courant électrique.

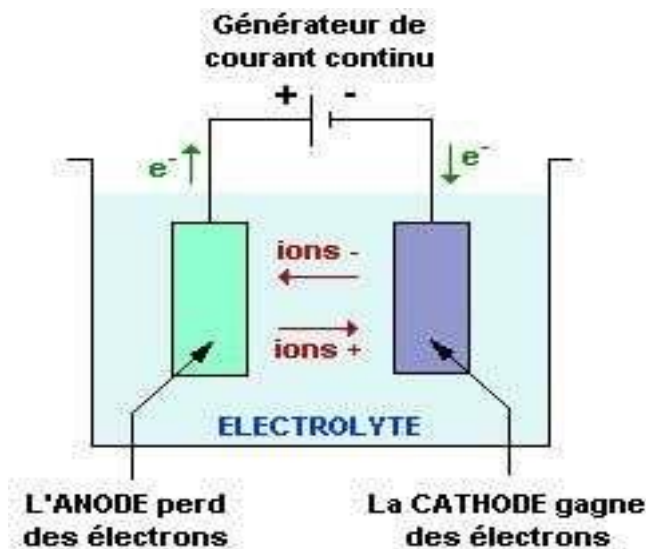


Figure. I.15 Principe de fonctionnement de la batterie [31].

I.10.4 Caractéristiques techniques principales :

- Tension nominale : environ 3,6 à 3,7 V par cellule
- Capacité : mesurée en Ah (ampère-heure)
- Énergie stockée : exprimée en Wh (watt-heure)
- Profondeur de décharge (DoD) : jusqu'à 95 % pour Li-ion
- Durée de vie : 3000 à 10000 cycles selon le type
- Rendement : entre 90 et 98 %
- Température de fonctionnement : généralement -10 à $+50$ °C
- Maintenance : faible, surtout pour les cellules LiFePO_4

I.10.5 Modélisation électrique de la batterie :

Pour simuler le comportement dynamique d'une batterie, on utilise un modèle de circuit équivalent. Il inclut :

- Une source de tension variable (fonction de l'état de charge SoC)
- Une résistance interne (modélise les pertes)
- Des réseaux RC (résistance + condensateur) pour représenter les phénomènes dynamiques.

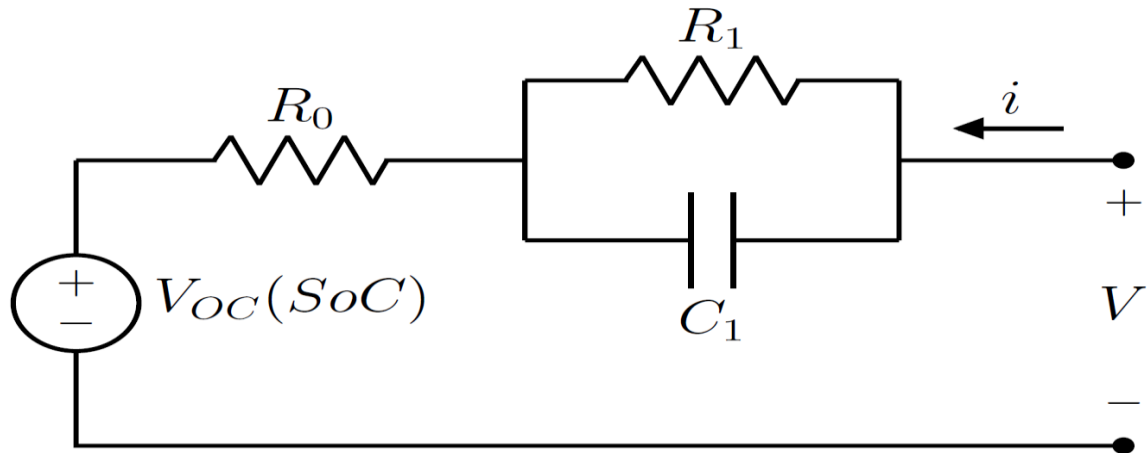


Figure. I.16 Modèle de circuit équivalent pour les cellules Li-ion [32].

I.10.6 Avantages et inconvénients :

Avantages :

- Autonomie énergétique
- Silencieuse et propre
- Rendement élevé (surtout Li-ion)
- Faible maintenance (notamment LFP)

Inconvénients :

- Coût initial élevé
- Risque thermique (sauf LFP)
- Vieillessement progressif
- Recyclage parfois limité.

I.10.7 Types de batteries Li-ion et comparaison :

* NMC (Nickel-Manganèse-Cobalt)

- Haute densité énergétique
- Durée de vie moyenne (~3000 cycles)
- Plus compactes mais thermiquement moins stables

* LFP (Lithium Fer Phosphate)

- Moins denses mais plus sûres
- Très longue durée de vie (~5000 à 7000 cycles)
- Meilleure stabilité thermique, moins de risque d'incendie

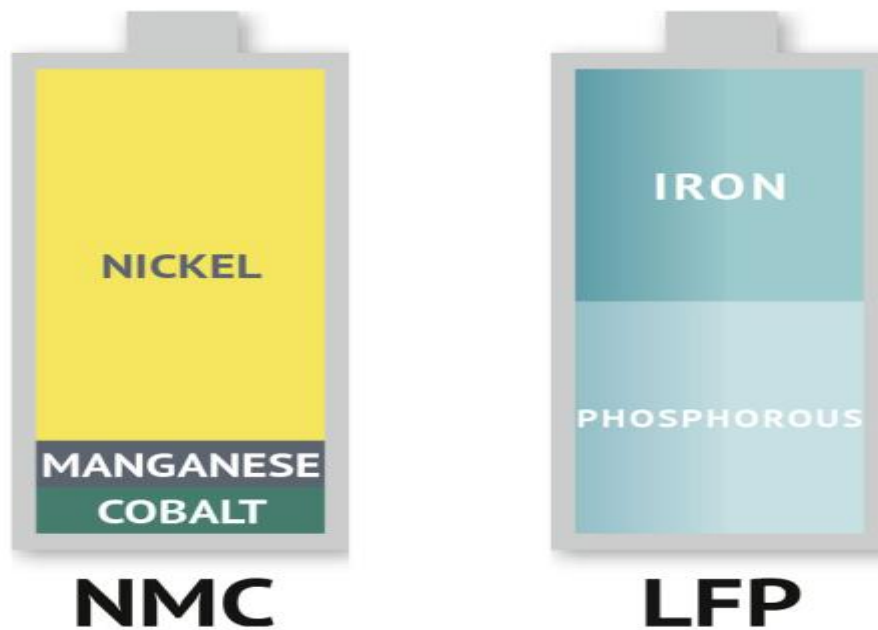


Figure. I.17 Comparaison entre les batteries NMC et LFP [33].

I.10.8 Rôle du BMS et intégration au système PV :

* Le Battery Management System (BMS) est essentiel :

- Protège contre la surcharge, la décharge excessive, la surchauffe
- Équilibre les tensions entre cellules
- Améliore la durée de vie et la sécurité

* Dans une installation PV :

- En DC-coupling, la batterie est reliée au contrôleur MPPT → efficacité accrue
- En AC-coupling, la batterie est couplée via un onduleur dédié → plus flexible mais conversion double

I.11. Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous avons posé les bases théoriques essentielles à la compréhension d'un système photovoltaïque, en tant que solution énergétique propre, durable et en plein essor. Après une introduction générale aux énergies renouvelables, l'accent a été mis sur le potentiel de l'énergie solaire, notamment sa conversion directe en électricité grâce aux systèmes photovoltaïques.

Nous avons ensuite exploré les différentes composantes de ce système, à commencer par la cellule photovoltaïque : son évolution historique, son principe de fonctionnement, ainsi que les principales technologies disponibles sur le marché. Une analyse détaillée des courbes caractéristiques I-V et P-V a permis de mieux comprendre le comportement électrique du générateur solaire, base indispensable pour l'optimisation de son rendement.

Par ailleurs, les paramètres influençant les performances (irradiation, température, orientation) ainsi que les caractéristiques électriques globales du système ont été étudiés, en complément d'une présentation des étapes essentielles pour l'installation de panneaux solaires.

Enfin, une partie a été consacrée au stockage de l'énergie, élément incontournable pour pallier l'intermittence de la production solaire. À ce titre, les batteries ont été présentées en détail selon leur composition, leur fonctionnement, leurs types et leurs performances, offrant ainsi une vision complète de leur rôle dans la continuité et l'efficacité du système.

Ce socle théorique global constitue une base solide pour aborder, dans les chapitres suivants, les méthodes avancées de conversion, de régulation et d'optimisation, en particulier les techniques MPPT, qui visent à maximiser l'exploitation de l'énergie solaire.

Chapitre II

Convertisseurs (DC/DC) et techniques des commandes MPPT

II.1 Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque s'impose aujourd'hui comme une solution durable face à la dépendance aux énergies fossiles. Son caractère propre et inépuisable en fait une alternative privilégiée dans la transition énergétique. Cependant, les performances des modules photovoltaïques varient considérablement selon les conditions d'ensoleillement et de température, ce qui rend nécessaire l'emploi de dispositifs électroniques capables d'assurer une adaptation optimale entre la source et la charge.

Les convertisseurs DC/DC jouent un rôle essentiel dans cette optimisation. Ils permettent d'ajuster la tension issue du générateur photovoltaïque aux exigences du système, tout en assurant une conversion efficace de l'énergie. Parmi les topologies les plus utilisées figurent les convertisseurs Boost, Buck et Buck-Boost, choisis selon les besoins en tension et en rendement. Afin de maximiser la puissance délivrée, ces convertisseurs sont généralement associés à des algorithmes MPPT (Maximum Power Point Tracking). Ces derniers assurent le fonctionnement du générateur au point de puissance maximale, même sous des conditions environnementales fluctuantes. Les techniques classiques telles que Perturb and Observe (P&O) et Incremental Conductance (IncCond) demeurent les plus répandues, tandis que des approches plus récentes fondées sur l'intelligence artificielle (logique floue, réseaux de neurones, algorithmes évolutionnaires) offrent de meilleures performances en matière de rapidité et de stabilité.

Ce chapitre présente d'abord les principales topologies de convertisseurs DC/DC utilisées dans les systèmes photovoltaïques, avant d'examiner les différentes méthodes MPPT, de la plus simple à la plus avancée, dans le but de comprendre leur impact sur le rendement global et la durabilité des installations solaires.[36 ; 37 ; 38]

II.2 Définition :

Un convertisseur de puissance est un circuit électrique qui convertit l'énergie électrique d'une forme à une autre, en utilisant généralement une action de commutation à haute fréquence. Cette conversion peut se faire du courant continu au courant alternatif ou du courant alternatif au courant continu pour augmenter ou diminuer la tension ou changer la polarité. Le convertisseur sert également de lien entre la source d'énergie et la sortie de l'alimentation. Il traite et contrôle le flux d'énergie électrique en fournissant des courants et des tensions sous la forme requise pour les charges de l'utilisateur final. Les convertisseurs sont disponibles sous la forme d'un simple transformateur ou d'un transformateur plus complexe, en fonction de l'application.

Ces convertisseurs permettent le contrôle du transfert d'énergie entre une source et une charge qui est, soit de nature capacitive (source de tension), soit de nature inductive (source de courant).[39]

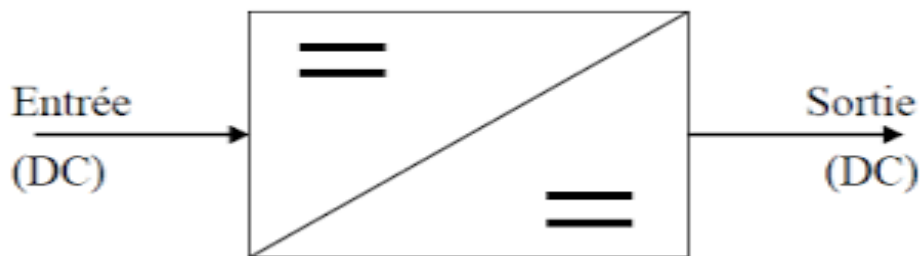


Figure. II.1 convertisseur DC/DC [12].

II.3 Convertisseur Abaisseur (Buck) :

II.3.1 Définition :

Le convertisseur Buck est un type de convertisseur continu-continu (DC-DC) destiné à réduire la tension d'entrée pour obtenir une tension de sortie inférieure, tout en maintenant le même sens de circulation du courant. Ce dispositif repose sur l'utilisation d'un interrupteur électronique rapide, combiné à des éléments de stockage d'énergie tels que l'inductance et le condensateur, pour assurer la régulation de la tension [13].

II.3.2 Principe de fonctionnement :

Le fonctionnement du convertisseur Buck est basé sur la commutation rapide d'un interrupteur (typiquement un transistor MOSFET) entre les états fermé (conduction) et ouvert (blocage), suivant un signal modulé en largeur d'impulsion (PWM).

* Lorsque l'interrupteur est fermé, l'inductance accumule de l'énergie sous forme de champ magnétique.

* Lorsque l'interrupteur est ouvert, l'énergie stockée dans l'inductance est transférée vers la charge à travers la diode de roue libre.

- La tension de sortie est contrôlée en ajustant le rapport cyclique D (rapport du temps de conduction sur la période totale [13]).

II.3.3 Schéma fonctionnel :

* Les principaux composants du convertisseur Buck sont :

- Source de tension continue (V_s).
- Interrupteur (transistor ou MOSFET).
- Diode de roue libre.
- Inductance (L).
- Condensateur de filtrage (C).
- Charge (R).

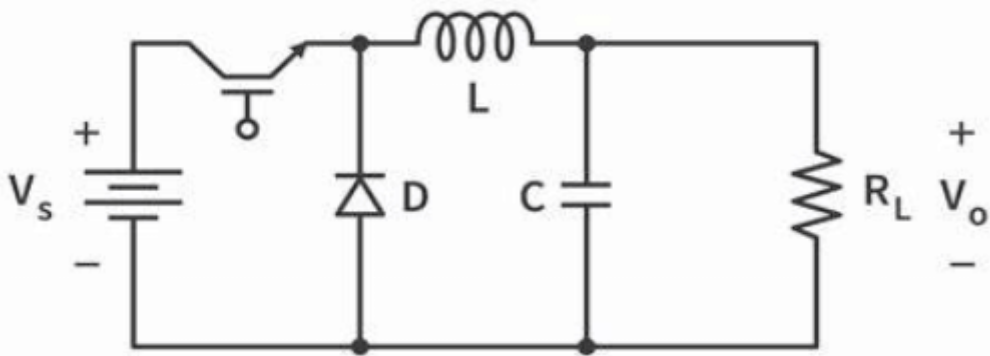


Figure. II.2 schéma du circuit du convertisseur Buck [13].

II.3.4 Relations fondamentales :

Dans des conditions idéales (sans pertes):

$$V_o = D \times V_s \quad (II.1)$$

Où :

V_o : est la tension de sortie.

V_s : est la tension d'entrée.

D : est le rapport cyclique ($0 \leq D \leq 1$).

II.3.5 Analyse en mode continu (CCM) :

A) Quand l'interrupteur est fermé:

Le courant dans l'inductance augmente linéairement.

L'équation différentielle est :

$$V_l = V_s - V_o$$

$$Vl = L \frac{di_l}{dt}$$

$$\frac{di_l}{dt} = \frac{V_s - V_o}{L} \quad (\text{II.2})$$

B) Quand l'interrupteur est ouvert:

Le courant dans l'inductance diminue, mais de manière contrôlée grâce à la diode.

L'équation devient :

$$V_l = -V_o$$

$$\frac{di_l}{dt} = -\frac{V_o}{L} \quad (\text{II.3})$$

II.3.6 Avantages du convertisseur Buck :

- Rendement élevé (supérieur à 90 % dans des conditions idéales),
- Topologie simple et économique,
- Applications diverses nécessitant une réduction de tension efficace [13].

II.4 Convertisseur élévateur (Boost) :

II.4.1 Définition :

Le convertisseur Boost est un circuit électronique qui permet de transformer une tension continue basse en une tension continue plus élevée. Ce type de convertisseur appartient à la famille des convertisseurs DC-DC à découpage. Sa fonction principale est d'élever la tension d'entrée pour alimenter une charge nécessitant une tension supérieure. Il est très utilisé dans les applications embarquées, les systèmes photovoltaïques et les dispositifs portables.[14]

II.4.2 Principe de fonctionnement du convertisseur Boost (formulation originale) :

Le convertisseur Boost est un circuit électronique qui permet d'élever une tension continue d'un niveau initial à un niveau plus élevé. Son fonctionnement repose sur un principe de transfert d'énergie entre une inductance et un condensateur à travers un interrupteur commandé.

* Ce processus se déroule en deux étapes répétitives :

1- Stockage d'énergie :

Lorsque l'interrupteur (généralement un transistor) est activé, le courant fourni par la source traverse l'inductance. Durant cette phase, l'inductance accumule de l'énergie sous forme de champ magnétique. La charge est temporairement isolée de la source grâce à la diode bloquante. [40]

2- Transfert d'énergie vers la charge :

Lorsque l'interrupteur est désactivé, le courant qui traversait l'inductance ne peut pas s'interrompre subitement. L'inductance relâche donc l'énergie emmagasinée, qui passe à travers la diode et se dirige vers le condensateur et la charge. Ce transfert s'ajoute à la tension d'entrée, créant ainsi une tension de sortie supérieure.

- Ce cycle se répète rapidement à une fréquence élevée. Le niveau de la tension en sortie dépend du temps pendant lequel l'interrupteur reste activé à chaque cycle, ce qu'on appelle le rapport cyclique. Plus ce rapport est élevé, plus la tension de sortie augmente, dans certaines limites liées aux composants utilisés.[40]

II.4.3 Schéma fonctionnel :

* Les principaux composants du convertisseur Boost sont :

- Source de tension continue (V_e).
- Inductance (L).
- Interrupteur (transistor MOSFET ou IGBT).
- Diode (D).
- Condensateur de filtrage (C).
- Charge(R).

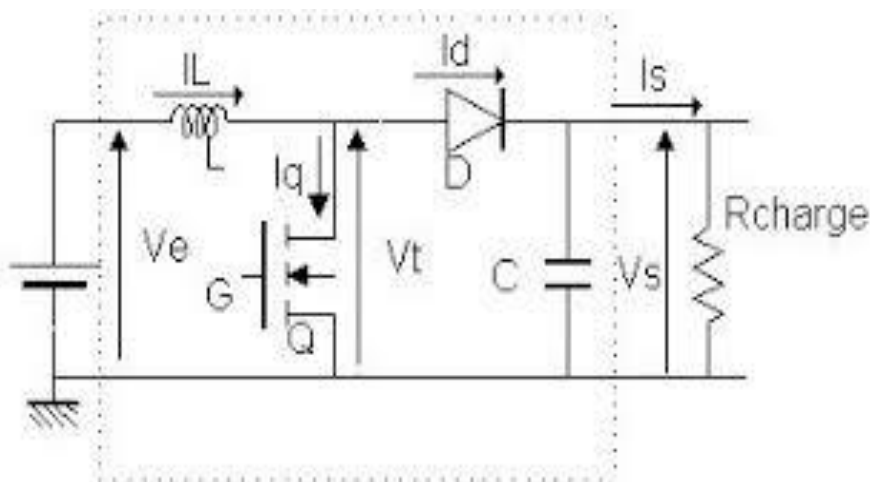


Figure. II.3 schéma du circuit du convertisseur Boost [15].

II.4.4 Etude d'un convertisseur boost :

A - Conduction continue :

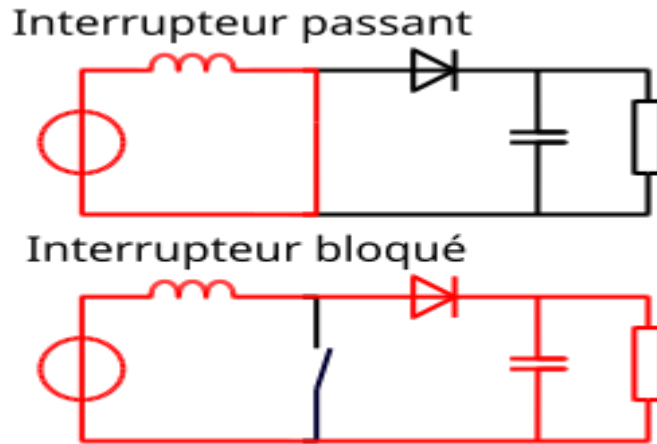


Figure. II.4 états d'ouverture et fermeture de l'interrupteur [16].

A-1 Analyse du fonctionnement :

*Il existe deux cas de base :

1er cas : $0 < t < \alpha T$ (Q fermé, D ouverte) :

$$I_Q = I_L$$

$$I_D = 0$$

$$U_Q = 0$$

$$V_D = -Vs$$

$$Ve = V_L = L (d_{iL}(t))/dt$$

Déterminons le courant $i_L(t)$: on a $Ve \gg R_{iL}(t)$

$$\text{donc } Ve = L \frac{d_{iL}(t)}{dt}$$

$$\text{avec } i_L(0) = I_L \text{MIN}$$

$$\text{Iet } i_L(\alpha T) = I_L \text{MAX}$$

$$Ve = L \frac{d_{iL}(t)}{dt} \rightarrow d_{iL}(t) = \frac{Ve}{L} dt$$

$$\rightarrow \int d_{iL}(t) = \int \frac{Ve}{L} dt$$

$$i_L(t) = \frac{Ve}{L} t + k \tag{II.4}$$

a $t=0$

on a $i_L(0) = I_L MIN = k$

$$i_L(t) = \frac{V_e}{L}t + I_L MIN \quad (II.5)$$

Calcule $I_L MAX$:

$$T = \alpha T$$

$$i(\alpha T) = I_L MAX = \frac{V_e}{L} \alpha T + I_L MIN \quad (II.6)$$

2eme cas : $\alpha T < t < T$ (Q ouvert, D fermée) :

$$I_Q = 0$$

$$I_D = I_L$$

$$U_Q = V_s$$

$$V_D = 0$$

$$vL = V_e - V_s = L (d_{iL}(t))/dt$$

Déterminon le courant $i_L(t)$:

$$\text{on a } V_e = V_s + L \frac{d_{iL}(t)}{dt}$$

$$\text{avec } i_L(\alpha T) = I_L MAX$$

$$\text{et } I_L(t) = I_L MIN$$

$$V_e = V_s + L \frac{d_{iL}(t)}{dt}$$

$$\rightarrow V_e - V_s = -L \frac{d_{iL}(t)}{dt}$$

$$\rightarrow d_{iL}(t) = \frac{V_e - V_s}{L} dt$$

$$\rightarrow \int d_{iL}(t) = \int \frac{V_e - V_s}{L} dt$$

$$i_L(t) = \frac{V_e - V_s}{L} t + k \quad (II.7)$$

a $t = \alpha T$

$$\text{on a } i_L(\alpha T) = I_L MAX = \frac{V_e - V_s}{L} \alpha T + k$$

$$\rightarrow k = I_L MAX - \frac{V_e - V_s}{L} \alpha T$$

$$i_L(t) = \frac{V_e - V_s}{L} t + I_L MAX - \frac{V_e - V_s}{L} \alpha T$$

$$\rightarrow i_L(t) = \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T) + I_L MAX \quad (II.8)$$

Calcul I_{LMIN} :

$$t=T$$

$$\text{on a } i_L(T) = I_{LMIN} = \frac{V_e - V_s}{L} T (1 - \alpha) + I_{LMAX}$$

$$\rightarrow I_{LMIN} = \frac{V_e - V_s}{L} T (1 - \alpha) + I_{LMAX} \quad (\text{II.9})$$

A-2 Ondulation du courant dans l'inductance :

$$I_{LMAX} = \frac{V_e}{L} \alpha T + I_{LMIN}$$

$$\text{donc } I_{LMIN} - I_{LMAX} = \frac{V_e}{L} \alpha T$$

$$\Delta I_{LMAX} - I_{LMIN} = \frac{V_e}{L} \alpha T$$

$$\rightarrow \Delta I_L = \frac{V_e}{L f} \alpha \quad (\text{II.10})$$

A-3 Forme d'onde :

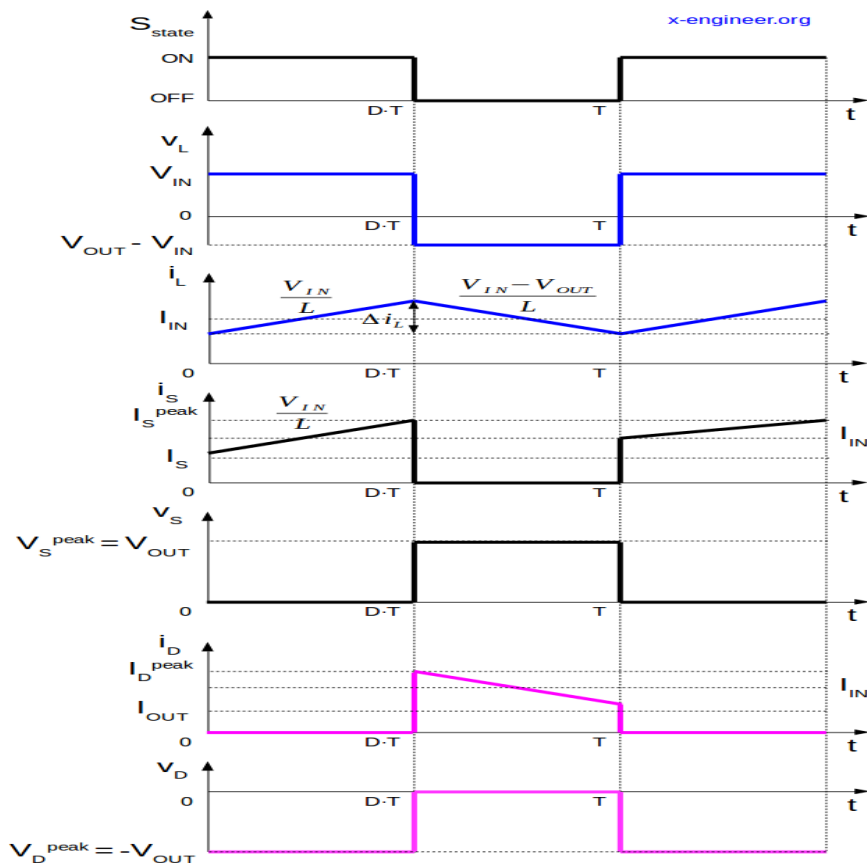


Figure. II.5 Forme d'onde de convertisseur boost conduction continue [17].

A-4 Relation entre les tensions d'entrée et de sortie :

* la tension moyenne aux bornes de l'inductance est **nulle**

Donc :

$$UL = \frac{1}{T} \int_0^T U_L(t) dt = 0 = \frac{1}{t} [(V_e \alpha T) + (T - \alpha T)(V_e - V_s)] = (V_e \alpha) + (1 - \alpha)(V_e - V_s)$$

$$= V_e \alpha + V_e - V_s - \alpha V_e + \alpha V_s = 0$$

$$V_e - V_s + \alpha V_s = 0$$

$$V_s = \frac{V_e}{(1-\alpha)} \tag{II.11}$$

A-5 Caractéristique statique réelle en conduction continue :

Lorsque le convertisseur fonctionne en conduction continue, une analyse purement théorique pourrait laisser penser que la tension de sortie peut tendre vers l'unité. Cette situation, bien qu'idéalisée, soulève une incohérence sur le plan physique : comment une tension pourrait-elle croître sans limite ?

En réalité, cette hypothèse néglige certains paramètres importants du circuit. Il devient alors nécessaire d'introduire les pertes réelles qui interviennent, notamment celles dues à la résistance série associée à l'inductance, ainsi que la résistance interne de la charge.

En prenant en considération ces résistances, on peut établir une expression plus réaliste de la tension de sortie en se basant sur une analyse en régime permanent et en valeur moyenne.

$$v_e = R_l I_l + (v_s(1 - \alpha))$$

Avec
$$I_l = \frac{v_s}{R_c(1-\alpha)}$$

Donc :
$$v_e = \frac{R_l}{R_c(1-\alpha)} v_s + (1 - \alpha)v_s$$

Par suite :
$$\frac{v_s}{v_e} = \frac{1}{(1-\alpha)[1 + \frac{R_l}{R_c} \frac{1}{(1-\alpha)^2}]} \tag{II.12}$$

Cette fonction présente un maximum pour

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_c}{R_l}}$$

$$V_{smax} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{R_c}{R_l}} \tag{II.13}$$

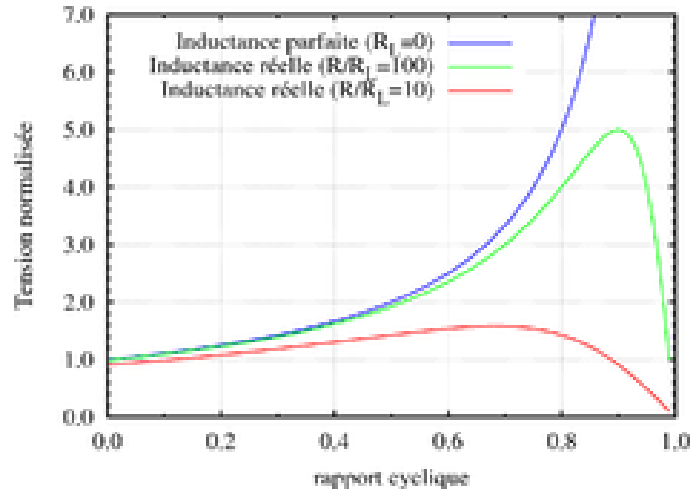


Figure. II.6 Caractéristique statique réelle en conduction continue d’un Hacheur parallèle [26].

B - Conduction discontinue :

B-1 Analyse de fonctionnement :

***Il existe trois cas de base :**

1er cas : $0 < t < \alpha T$ (Q fermé, D ouverte) :

$$I_Q = I_L$$

$$I_D = 0$$

$$U_Q = 0$$

$$V_D = -V_s$$

$$V_e = V_L = L (d_{iL}(t))/dt$$

Déterminons le courant $i_L(t)$: on a $V_e \gg R_{iL}(t)$

donc $V_e = L \frac{d_{iL}(t)}{dt}$

avec $i_L(0) = I_L MIN$

et $i_L(\alpha T) = I_L MAX$

$$V_e = L \frac{d_{iL}(t)}{dt}$$

$$\rightarrow d_{iL}(t) = \frac{V_e}{L} dt$$

$$\rightarrow \int d_{iL}(t) = \int \frac{V_e}{L} dt$$

$$i_L(t) = \frac{V_e}{L} t + k$$

(II.14)

a $t=0$

on a $i_L(0) = I_L MIN = k=0$

$$i_L(t) = \frac{V_e}{L} t \quad (\text{II.15})$$

Calcule $I_L MAX$:

$t = \alpha T$

$$i(\alpha T) = I_L MAX = \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (\text{II.16})$$

2eme cas : $\alpha T < t < \beta T$ (Q ouvert, D fermée) :

$$I_Q = 0$$

$$I_D = I_L$$

$$U_Q = V_s$$

$$V_D = 0$$

$$v_L = V_e - V_s = L (d_{iL}(t))/dt$$

Déterminon le courant $i_L(t)$: on a

$$V_e = V_s + L \frac{d_{iL}(t)}{dt}$$

avec $i_L(\alpha T) = I_L MAX$

et $I_L(\beta T) = 0$

$$V_e = V_s + L \frac{d_{iL}(t)}{dt}$$

$$\rightarrow V_e - V_s = -L \frac{d_{iL}(t)}{dt}$$

$$\rightarrow d_{iL}(t) = \frac{V_e - V_s}{L} dt$$

$$\rightarrow \int d_{iL}(t) = \int \frac{V_e - V_s}{L} dt$$

$$i_L(t) = \frac{V_e - V_s}{L} t + k \quad (\text{II.17})$$

a $t = \alpha T$

$$\text{on a } i_L(\alpha T) = I_L MAX = \frac{V_e - V_s}{L} \alpha T + k$$

$$\rightarrow k = I_L MAX - \frac{V_e - V_s}{L} \alpha T$$

$$i_L(t) = \frac{V_e - V_s}{L} t + I_L MAX - \frac{V_e - V_s}{L} \alpha T$$

$$\rightarrow i_L(t) = \frac{V_e - V_s}{L} (t - \alpha T) + I_L MAX \quad (\text{II.18})$$

Calcul $I_L MAX$:

$$t = \beta T$$

$$\text{on a } i_L(\beta T) = 0 = \frac{V_e - V_s}{L} T (\beta - \alpha) + I_L MAX$$

$$\rightarrow I_L MAX = \frac{V_s - V_e}{L} T (\beta - \alpha) \quad (\text{II.19})$$

3eme cas : $\beta T < t < T$ (Q ouvert, D fermée) :

$$I_Q = 0$$

$$I_D = 0$$

$$U_Q = V_e$$

$$V_D = V_e - V_s$$

$$I_l = 0$$

$$V_L = 0$$

B-2 Relation entre les tensions d'entrée et de sortie :

$$\text{On a } I MAX = \frac{v_s - v_e}{L} T (\beta - \alpha) = \frac{v_e}{L} \alpha T$$

$$\rightarrow v_s \beta - v_s \alpha - v_e \beta + v_e \alpha = v_e \alpha$$

$$\rightarrow v_s (\beta - \alpha) = v_e \beta$$

$$\text{Donc } v_s = \frac{\beta}{\beta - \alpha} v_e \quad (\text{II.20})$$

$$\text{Et } \beta = \alpha \frac{v_s}{v_s - v_e}$$

II.5 L'onduleur :

II.5.1 Définition de l'onduleur :

Un onduleur (ou inverter en anglais) est un dispositif électronique de puissance permettant de convertir une tension continue (DC) en une tension alternative (AC). Il est largement utilisé dans les systèmes photovoltaïques pour alimenter les charges en courant alternatif ou injecter l'énergie dans le réseau électrique. [41]

II.5.2 Caractéristiques principales :

- Conversion DC/AC : transforme l'énergie provenant de sources comme les panneaux solaires ou les batteries.

- Fréquence de sortie : généralement 50 Hz (Europe) ou 60 Hz (Amérique).

- Forme d'onde de sortie :

Onde sinusoïdale pure (Pure sine wave)

Onde sinusoïdale modifiée (Modified sine wave)

Onde carrée (Square wave)

- Tension de sortie : souvent 230 V ou 110 V selon les standards régionaux.

- Rendement : peut dépasser 95 % pour les modèles performants.

- Systèmes de protection intégrés : surcharge, court-circuit, surchauffe, etc. [41]

II.5.3 Types d'onduleurs :

- Onduleur autonome (off-grid) : fonctionne sans connexion au réseau.

- Onduleur connecté au réseau (grid-tie) : synchronisé avec la fréquence du réseau pour l'injection d'énergie.

- Onduleur hybride : combine les deux fonctions précédentes avec gestion intelligente de la batterie. [41]

II.5.4 Applications de l'onduleur :

* Systèmes photovoltaïques (PV) : conversion de l'énergie solaire pour usage domestique ou injection dans le réseau.

* Alimentation sans interruption (UPS) : assure l'alimentation continue des équipements sensibles.

* Éoliennes : transformation de l'électricité générée en courant alternatif.

* Véhicules électriques : contrôle du moteur et récupération d'énergie. [41]

II.5.5 Schéma de principe d'un onduleur monophasé :

* Voici une description textuelle du schéma

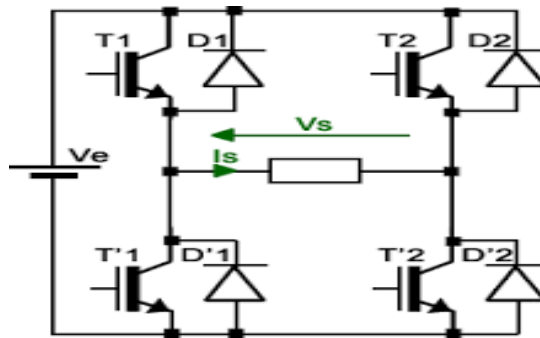


Figure. II.7 Schéma d'onduleur monophasé [18].

II.6 Les Techniques MPPT :

II.6.1 Les techniques MPPT classiques :

II.6.1.1 Perturb and Observe (P&O)

* Principe :

La méthode P&O consiste à perturber légèrement la tension (ou le courant) du générateur PV, puis observer la variation de la puissance. Si la puissance augmente, la perturbation continue dans le même sens ; sinon, elle s'inverse. [42]

* Avantages :

- Implémentation simple.
- Ne nécessite pas de modèle du panneau.

* Inconvénients :

- Oscillations autour du point MPP.
- Moins efficace lors de variations rapides d'ensoleillement.
- Perte énergétique due à la perturbation constante. [42]

A- Algorithme P&O :

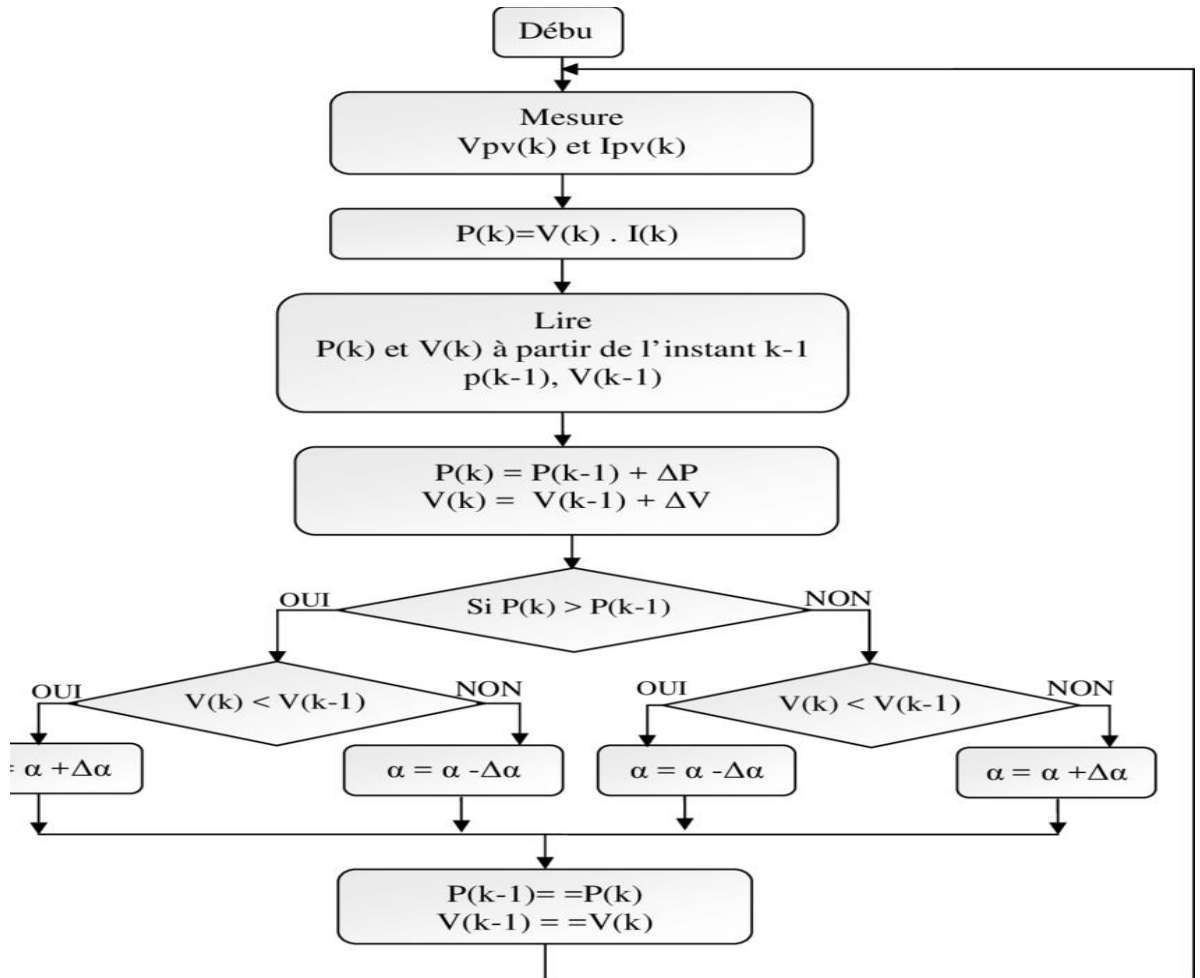


Figure. II.8 Algorithme MPPT basé sur la commande P&O [27].

B- Explique P&O :

L’algorithme Perturb and Observe est une méthode simple mais efficace permettant de suivre le Point de Puissance Maximale (MPPT) dans un système photovoltaïque. Il fonctionne en modifiant légèrement la tension du panneau solaire et en observant la variation de la puissance résultante.

* Étapes du fonctionnement :

1. Début du processus.
2. Mesure de la tension $V_{pv}(k)$ et du courant $I_{pv}(k)$ du panneau solaire à l’instant k .
3. Calcul de la puissance électrique instantanée :

$$P(k) = V(k) \times I(k) \tag{II.21}$$

4. Lecture des anciennes valeurs de puissance et de tension :

$$P(k-1), \quad V(k-1)$$

- Cette étape est essentielle pour pouvoir calculer les variations ΔP et ΔV ensuite. [42]

5. Calcul des variations :

$$\Delta P = P(k) - P(k - 1) \quad (\text{II.22})$$

$$\Delta V = V(k) - V(k - 1) \quad (\text{II.23})$$

6. Décision selon les cas suivants :

- Ceci commence par "Si $P(k) > P(k-1)$ " dans le diagramme
- On compare la nouvelle puissance avec l'ancienne et on choisit l'action selon la direction du changement :

Si $\Delta P > 0$ (la puissance a augmenté) :

Si $\Delta V > 0$ on continue dans la même direction :

$$\alpha = \alpha + \Delta\alpha \quad (\text{II.24})$$

$$\alpha = \alpha - \Delta\alpha \quad (\text{II.25})$$

Si $\Delta P < 0$ (la puissance a diminué) :

Si $\Delta V > 0$ on inverse la direction :

$$\alpha = \alpha - \Delta\alpha$$

$$\alpha = \alpha + \Delta\alpha$$

7. Mise à jour des anciennes valeurs pour la prochaine itération :

$$P(k - 1) = P(k) \quad (\text{II.26})$$

$$V(k - 1) = V(k) \quad (\text{II.27})$$

8. Retour à la mesure (étape 2) pour un nouveau cycle.

II.6.1.2 Incremental Conductance (IncCond)

* Principe :

Cette méthode repose sur la condition que la dérivée de la puissance par rapport à la tension est nulle au MPP :

* Avantages :

- Plus précis que P&O dans les conditions changeantes.
- Meilleure stabilité.

* Inconvénients :

- Algorithme plus complexe.
- Dépend fortement de la précision des capteurs.[42]

II.6.1.3 Méthode de tension constante (Constant Voltage - CV)

* Principe :

Elle maintient la tension du panneau à une valeur constante, typiquement autour de 76% de la tension en circuit ouvert .

* Avantages :

- Très simple à implémenter.
- Ne nécessite pas de capteur de courant.

* Inconvénients :

- Inefficace lors de variations d'irradiation.
- Ne suit pas précisément le MPP. [42]

II.6.1.4 Méthode de tension à vide (Open Circuit Voltage - OCV)

* Principe :

Le système isole périodiquement le panneau pour mesurer la tension à vide , puis applique une proportion de celle-ci comme tension de fonctionnement.

* Avantages :

- Facilité de mise en œuvre.
- Peu coûteuse.

* Inconvénients :

- Perturbation importante du système.
- Pertes énergétiques significatives. [42]

II.6.2 Les techniques MPPT modernes (intelligentes) :

II.6.2.1 Contrôle par logique floue (Fuzzy Logic Controller - FLC)

* Principe :

Utilise un ensemble de règles heuristiques "floues" du type : Si l'augmentation de la tension est petite et la variation de puissance est positive, alors augmenter la tension légèrement. Le contrôleur est basé sur l'intelligence humaine.

* Avantages :

- S'adapte bien aux environnements incertains.
- Rapide et robuste aux variations climatiques.

* Inconvénients :

- Conception du système de règles complexe.
- Nécessite une bonne expertise.

* Les composantes essentielles d'un contrôleur flou :

Le contrôleur flou repose sur une architecture composée de trois blocs principaux, chacun ayant un rôle bien défini dans la prise de décision intelligente. Ces blocs sont interconnectés et forment ensemble le noyau du raisonnement flou appliqué à des systèmes complexes comme ceux de l'énergie photovoltaïque. L'ordre présenté ici commence par la défuzzification, passe par la fuzzification, et se termine avec la règle floue, conformément à l'organisation conceptuelle suggérée dans le cadre de cette étude. [43]

A. Défuzzification : Production d'une commande réelle à partir d'une sortie floue

La défuzzification représente l'étape finale dans le processus de commande floue. Après que le système ait appliqué ses règles et généré une réponse floue (composée de termes linguistiques comme « faible », « moyen », « fort »), il devient nécessaire de traduire cette sortie qualitative en une valeur numérique nette, afin de l'exploiter dans le monde réel, par exemple en ajustant un signal de commande vers un convertisseur DC/DC.

La méthode la plus utilisée pour cette conversion est celle du centre de gravité (centroid method), qui consiste à calculer le barycentre de la zone sous la courbe résultante des fonctions d'appartenance activées. Cette méthode permet d'obtenir une sortie pondérée, équilibrée, et représentative de l'ensemble des règles activées et de leurs degrés d'influence.

* Exemple dans un système MPPT :

Si, après le traitement des règles, le système estime que la commande est à la fois « moyenne » (à 0.6) et « élevée » (à 0.4), la défuzzification calculera une valeur intermédiaire entre les deux, permettant ainsi un ajustement fluide du point de fonctionnement.

* En résumé, la défuzzification joue un rôle crucial de traduction finale : elle assure que l'intelligence floue aboutit à une action concrète, continue, et techniquement applicable. [43]

B. Fuzzification : Traduction des mesures numériques en concepts linguistiques flous La fuzzification est la passerelle entre le monde physique (données numériques) et le raisonnement flou (traitement linguistique). Elle consiste à convertir les valeurs d'entrée précises (telles que la tension, le courant ou la puissance mesurées) en valeurs floues, interprétables par le système.

* Ce processus repose sur l'utilisation de fonctions d'appartenance, qui associent à chaque valeur une appartenance relative à plusieurs ensembles linguistiques. Par exemple, une variation de tension de 3 V peut appartenir à la fois à l'ensemble « faible » avec un degré de 0.4, et à l'ensemble « moyen » avec un degré de 0.6. Cela reflète la nature graduelle et souple de l'interprétation floue, contrairement à la logique classique stricte (binaire).

* Les fonctions d'appartenance peuvent prendre plusieurs formes, selon le besoin en précision ou en rapidité de calcul :

- Triangulaires : simples, largement utilisées.
- Trapézoïdales : plus flexibles.
- Gaussiennes : plus douces mais plus coûteuses à calculer.

Dans le contexte photovoltaïque, la fuzzification permet par exemple de transformer les variations de puissance (ΔP) et de tension (ΔV) en concepts comme « variation faible », « variation négative », etc., ce qui rend le contrôleur plus adaptatif et robuste face aux conditions changeantes de l'environnement (nuages, température, ombrage...). [43]

C. Règle floue : Cœur décisionnel du contrôleur intelligent La règle floue constitue le noyau du raisonnement dans un système de logique floue. Contrairement aux règles strictes des systèmes classiques, les règles floues sont exprimées sous forme linguistique souple, imitant le raisonnement humain. * Elles prennent généralement la forme :

> SI (condition sur l'entrée 1) ET/OU (condition sur l'entrée 2) ALORS (action sur la sortie)

* Exemple :

> SI la variation de puissance est positive ET la variation de tension est négative, ALORS augmenter légèrement le signal de commande.

* Chaque règle est activée selon les degrés d'appartenance obtenus par la fuzzification. L'ensemble des règles est ensuite traité par le moteur d'inférence, qui combine les résultats de toutes les règles applicables, en tenant compte de leur poids respectif.

* Ce processus permet au contrôleur d'évaluer toutes les situations possibles, même celles non prévues explicitement, et d'en déduire une réponse adaptée. Le nombre et la qualité des règles influencent fortement la précision, la rapidité et la stabilité du système.

* Certaines approches utilisent des règles implicites, où les liens entre entrées et sorties sont définis de manière indirecte à travers des surfaces de commande ou des bases de données expérimentales, sans exprimer chaque règle de façon textuelle. [43]

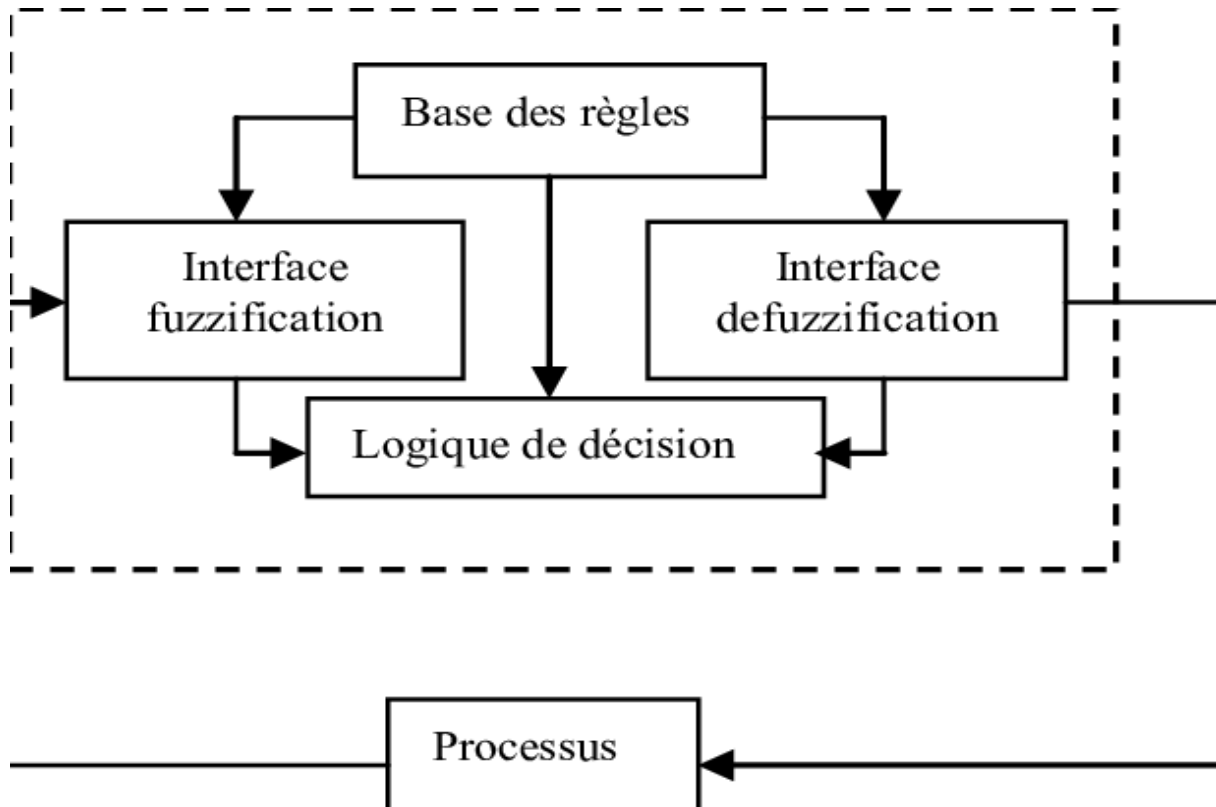


Figure. II.9 Structure classique d'un FLC [34].

II.6.2.2 Réseaux de neurones artificiels (Artificial Neural Networks - ANN)

* Principe :

Le système est entraîné avec des données historiques (irradiation, température, courant, tension) pour prédire le point MPP à travers un modèle non linéaire. Il fonctionne comme un "cerveau" artificiel.

* Avantages :

- Très bonne précision.
- Capable de modéliser des relations complexes.

S'adapte à différents types de panneaux.

* Inconvénients :

- Temps de calcul important.

Phase d'apprentissage longue et sensible. [43]

II.6.2.3 Optimisation par essaim particulaire (Particle Swarm Optimization - PSO)

* Principe :

Algorithme bio-inspiré imitant le comportement collectif des oiseaux. Chaque particule représente une solution potentielle (tension), et "vole" vers le meilleur point basé sur son expérience et celle de ses voisins.

* Avantages :

Très efficace en présence de points MPP multiples (ombrage partiel).

Convergence rapide.

* Inconvénients :

Coût computationnel élevé.

Paramétrage sensible.[44]

II.6.2.4 Contrôle adaptatif basé sur l'apprentissage automatique (Machine Learning – SVM, KNN, etc.)

* Principe :

Utilisation de techniques de Machine Learning supervisé ou non-supervisé pour apprendre des modèles de données et prédire dynamiquement le point de fonctionnement optimal.

* Avantages :

Haute précision.

Capacité d'adaptation aux environnements complexes.

* Inconvénients :

Données de formation nécessaires.

Dépendance aux algorithmes spécifiques. [43]

II.6.2.5 Technique MPPT Hybride : P&O Amélioré par Logique Floue (P&O–FLC)

* Principe de Fonctionnement:

La méthode hybride P&O–FLC combine l'algorithme classique de Perturb and Observe (P&O) avec un contrôleur basé sur la logique floue (Fuzzy Logic Controller - FLC). L'objectif est d'améliorer la performance du suivi du point de puissance maximale (MPPT) en réduisant les oscillations et en augmentant la vitesse de convergence vers le MPP, notamment sous des conditions environnementales variables.

- Dans cette approche, les variations de puissance (ΔP) et de tension (ΔV) sont utilisées comme entrées pour le contrôleur flou. Le FLC traite ces entrées à l'aide de règles linguistiques définies par des experts pour déterminer l'ajustement optimal du cycle de fonctionnement (duty cycle) du convertisseur DC-DC, permettant ainsi au système PV de fonctionner à son point de puissance maximale.[44]

* Détails Techniques

Entrées du FLC : ΔP (variation de puissance) et ΔV (variation de tension).

Sortie du FLC : ΔD (ajustement du duty cycle).

*Processus :

1. Calcul de ΔP et ΔV à chaque intervalle de temps.
 2. Fuzzification des entrées : transformation des valeurs numériques en variables linguistiques (par exemple, Négatif, Zéro, Positif).
 3. Application des règles floues pour déterminer la réponse appropriée.
 4. Défuzzification : conversion de la sortie floue en une valeur numérique pour ajuster le duty cycle.
- Cette méthode permet une adaptation dynamique aux changements rapides de l'irradiance solaire et de la température, offrant ainsi une meilleure stabilité et une efficacité accrue par rapport aux méthodes traditionnelles.

* Implémentation Pratique

Pour une mise en œuvre en laboratoire, vous pouvez utiliser un environnement de simulation tel que MATLAB/Simulink pour modéliser le système PV, le convertisseur DC-DC et le contrôleur MPPT hybride. Des capteurs de tension et de courant seront nécessaires pour mesurer les paramètres du système en temps réel. Le FLC peut être conçu à l'aide de l'outil Fuzzy Logic Toolbox de MATLAB, où vous définirez les fonctions d'appartenance, les règles floues et les méthodes de défuzzification. [44]

II.7 Conclusion :

Ce chapitre a permis de mieux comprendre le rôle essentiel des convertisseurs dans les systèmes photovoltaïques. Après avoir présenté les principes de base, l'accent a été mis sur le convertisseur Boost, largement utilisé pour adapter la tension fournie par les panneaux solaires. En complément, le fonctionnement du convertisseur Buck a été brièvement mentionné, ainsi que celui de l'onduleur, indispensable pour la conversion du courant continu en courant alternatif.

Une deuxième partie a été consacrée aux différentes techniques MPPT, indispensables pour exploiter au mieux l'énergie solaire. Les méthodes classiques comme P&O et Incremental Conductance ont été expliquées, puis comparées à des approches plus récentes, basées sur des algorithmes intelligents. Ces dernières offrent de meilleures performances, notamment en conditions variables.

* En somme, ce chapitre a jeté les bases nécessaires à la compréhension des stratégies de conversion et d'optimisation de l'énergie dans les systèmes solaires, ouvrant la voie à des solutions plus efficaces et durables.

Chapitre III

Simulation et résultats

III.1 Introduction :

La simulation occupe une place centrale dans l'étude des systèmes photovoltaïques. Elle permet d'observer, d'analyser et de mieux comprendre le comportement réel des composants sans avoir recours à des prototypes physiques. Grâce à elle, des phénomènes parfois complexes deviennent plus accessibles, et les performances des différentes structures peuvent être évaluées de manière précise et visuelle.

Ce chapitre s'inscrit dans cette logique. Il plonge le lecteur dans un environnement de modélisation où la théorie prend vie sous forme de signaux, de courbes et de réponses dynamiques. Chaque simulation devient un outil d'exploration, révélant les points forts, les limitations et les subtilités de chaque partie du système.

À travers cette démarche, on cherche à mettre en évidence l'importance de chaque composant et le rôle qu'il joue dans la chaîne de conversion de l'énergie. La visualisation des résultats ne se limite pas à une simple vérification, mais s'inscrit dans une réflexion plus large autour de l'efficacité, de la stabilité et de la cohérence globale du système.

Ce chapitre offre ainsi une lecture concrète du travail accompli, en ouvrant une fenêtre sur le comportement réel du système étudié, tel qu'il pourrait se manifester dans un contexte pratique.

III.2 Générateur Photovoltaïque (PV) :

Dans cette section, nous étudions le comportement électrique du générateur photovoltaïque seul, avant son intégration dans un système complet. Les caractéristiques du module PV sont analysées à travers les courbes courant-tension (I-V) et puissance-tension (P-V).

Ces courbes sont générées sous différentes conditions d'irradiation et de température afin de visualiser l'influence de ces paramètres environnementaux sur la performance du panneau. L'analyse suivante est organisée autour de trois cas : température constante avec irradiation maximale, température variable à irradiation constante, puis irradiation variable à température constante.

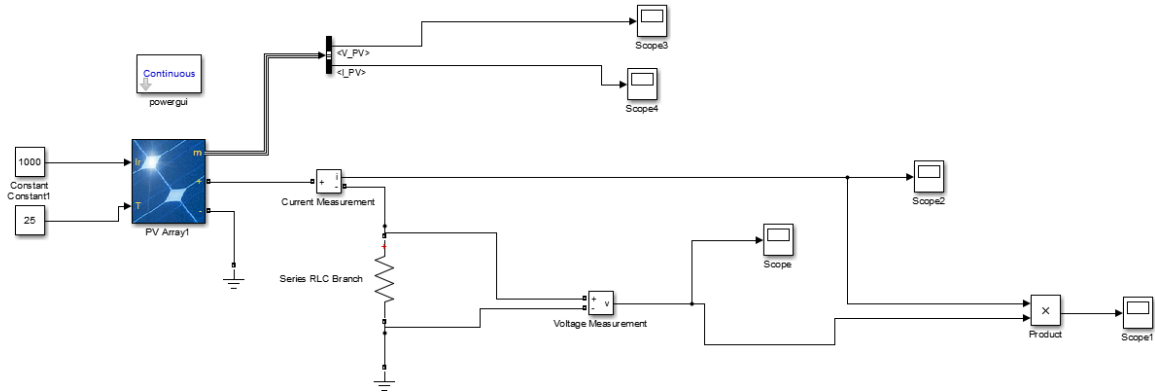


Figure. III.1 simulation de générateur PV

III.2.1 Les courbes :

1. Température constante (25°C), Irradiation = 1000 W/m² :

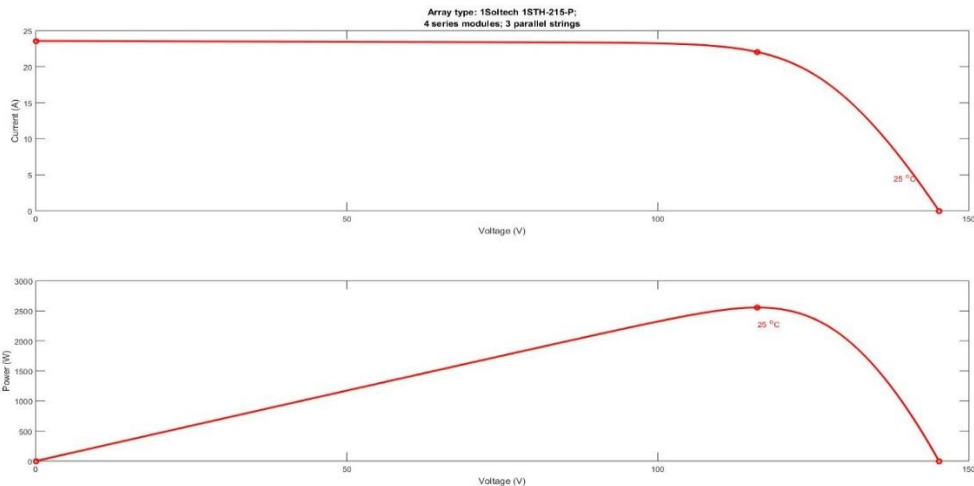


Figure. III.2 courbes P-V et I-V de Température constante (25°C), Irradiation = 1000 W/m²

* I-V :

La courbe I-V montre un courant de court-circuit (I_{sc}) élevé et une tension de circuit ouvert (V_{oc}) relativement stable. Le coude de la courbe, correspondant au point de puissance maximale (MPP), est bien défini. Cette forme typique indique un fonctionnement optimal du module PV.

* P-V :

La courbe P-V présente un pic net au niveau du MPP, ce qui traduit une puissance maximale élevée sous ces conditions idéales. La puissance augmente progressivement avec la tension, atteint un maximum, puis chute brusquement à l'approche de V_{oc} . Cela reflète un rendement maximal du générateur sous une irradiation de 1000 W/m².

2. Irradiation constante (1000 W/m²), Températures : 25°C, 30°C, 35°C, 45°C :

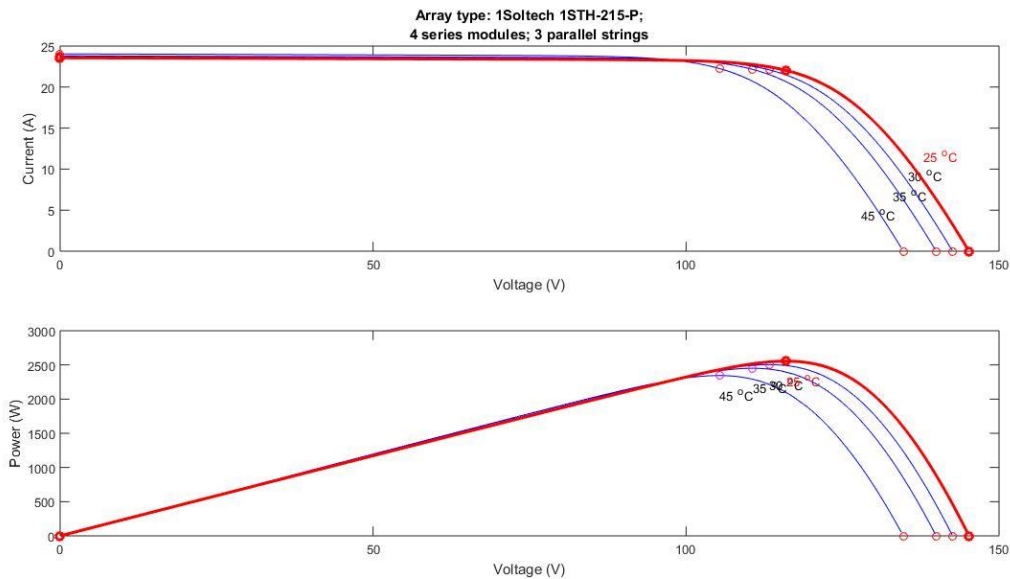


Figure. III.3 courbes P-V et I-V de Irradiation constante (1000 W/m²), Températures : 25°C, 30°C, 35°C, 45°C

* I-V :

En augmentant la température, la tension de circuit ouvert (V_{oc}) diminue de manière visible, tandis que le courant de court-circuit (I_{sc}) reste presque inchangé. Cette diminution de tension impacte directement la zone de fonctionnement utile du panneau, réduisant ainsi la surface sous la courbe.

* P-V :

La puissance maximale (le pic de la courbe) diminue avec la température. Plus la température est élevée, plus le MPP se déplace vers des tensions plus basses et des puissances moindres. Cela confirme l'effet négatif de la température sur le rendement des cellules photovoltaïques.

3. Température constante (25°C), Irradiations : 1, 0.7, 0.5, 0.3, 0.1 kW/m² :

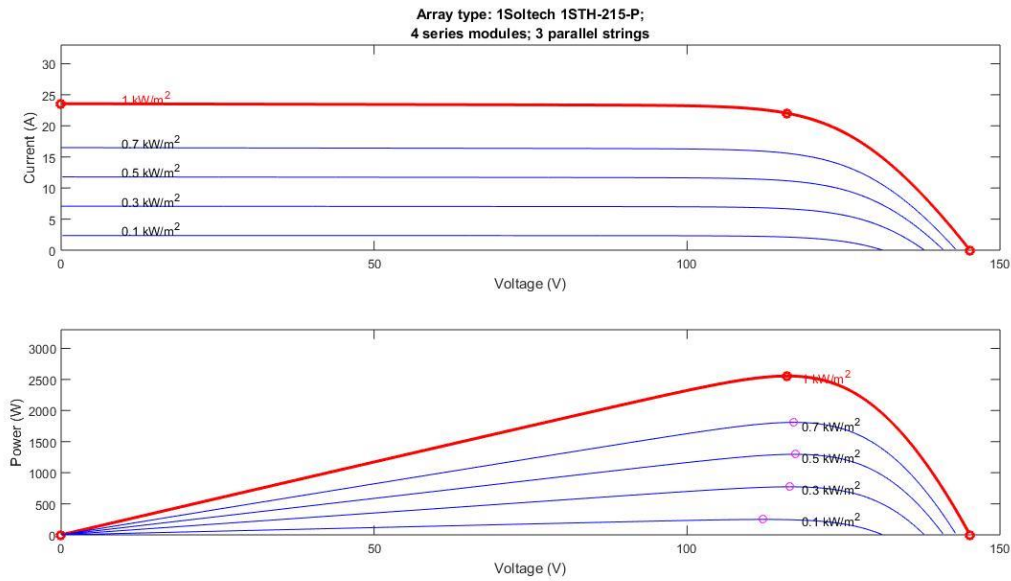


Figure. III.4 courbes P-V et I-V Température constante (25°C), Irradiations : 1, 0.7, 0.5, 0.3, 0.1 kW/m²

* I-V :

Lorsque l'irradiation diminue, le courant de court-circuit (I_{sc}) diminue de façon quasi-linéaire. La tension de circuit ouvert (V_{oc}) reste globalement stable, bien qu'une légère baisse soit parfois observée à très faible irradiation. La forme générale de la courbe est conservée, mais sa hauteur se réduit nettement.

* P-V :

La puissance maximale chute rapidement avec la baisse de l'irradiation. Le sommet de la courbe P-V devient de plus en plus bas, traduisant une baisse proportionnelle de l'énergie produite. À 0.1 kW/m², la puissance est très faible, ce qui montre l'impact direct de l'irradiation sur la production énergétique.

* **Remarque complémentaire :**

Le générateur photovoltaïque utilisé dans cette simulation est constitué de 4 modules connectés en série et 3 chaînes en parallèle (soit un total de 12 panneaux).

Cette configuration a été choisie afin d'obtenir une tension suffisante en sortie pour alimenter le convertisseur. En condition standard (irradiation de 1000 W/m² et température de 25°C), la tension obtenue à la sortie du générateur est d'environ 116 V, ce qui est cohérent avec la tension d'entrée nécessaire au fonctionnement optimal du convertisseur Boost.

III.3 Convertisseur Boost :

Dans cette partie, nous analysons le comportement du convertisseur Boost de manière isolée, en boucle fermée. Une tension de référence est imposée en sortie, et un régulateur ajuste automatiquement le rapport cyclique du signal PWM afin de maintenir cette valeur.

L'objectif est de vérifier la capacité du convertisseur à élever la tension d'entrée vers la valeur souhaitée, avant de l'intégrer dans un système photovoltaïque complet avec commande MPPT.

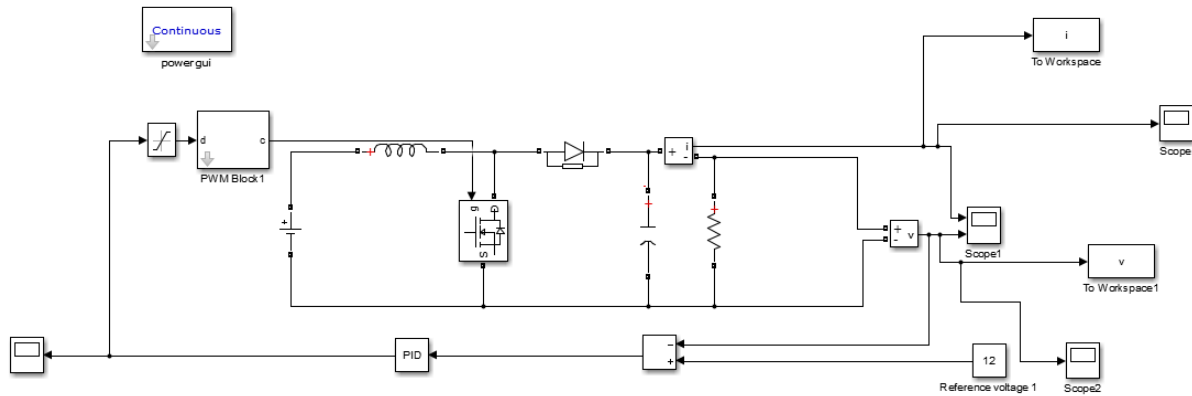


Figure. III.5 simulation de convertisseur boost

III.3.1 Les courbes :

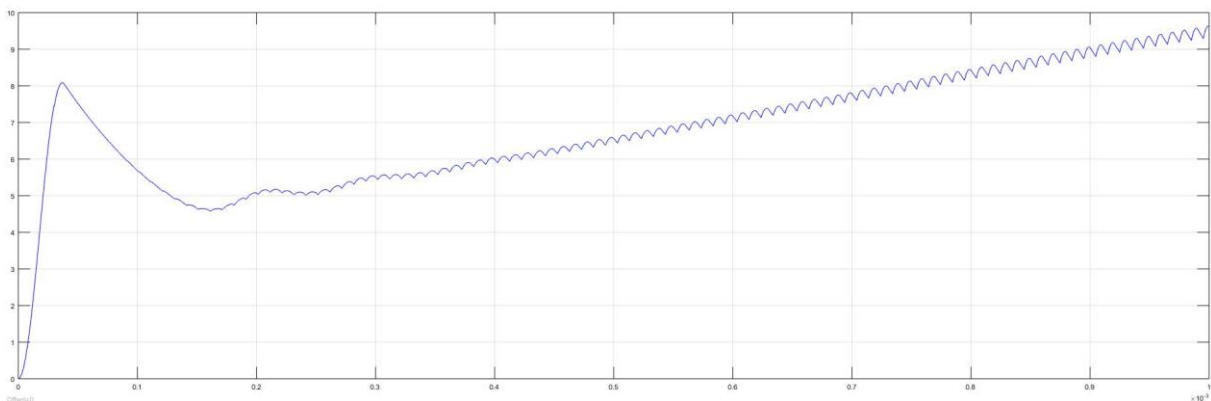


Figure. III.6 courbe de tension de sortie

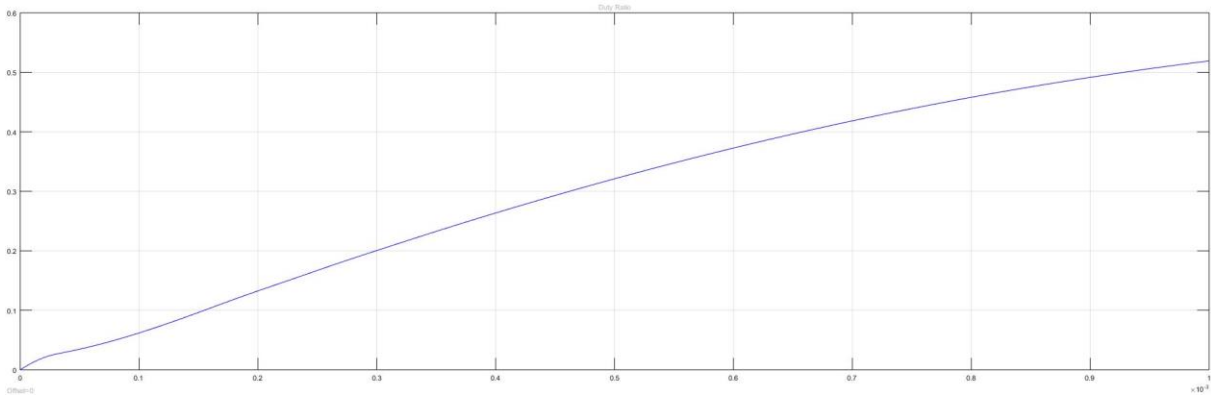


Figure. III.7 courbe de rapport cyclique

Le graphique représente l'évolution du rapport cyclique (Duty Cycle) appliqué au convertisseur Boost, en utilisant un signal PWM indépendant, sans boucle de régulation MPPT.

On observe une montée progressive du Duty Cycle depuis 0 jusqu'à environ 0,52, se stabilisant après un court délai (~1 ms).

Ce comportement est typique d'un signal PWM généré à partir d'une rampe ou d'un step, visant à fixer une valeur constante de commande pour tester la réponse du convertisseur seul.

III.3.2 Calcul V_s théorique :

V_e (v)	dcy	$V_s(v) = V_e / (1 - dcy)$
116	0.1	128.888889
116	0.2	145
116	0.3	165.714286
116	0.4	193.333333
116	0.5	232
116	0.6	290
116	0.7	386.666667
116	0.8	580
116	0.9	1160

Tableau III.1 Tableau de variation de Dcy et son impact sur V_s

Analyse du tableau des valeurs de V_s en fonction du rapport cyclique D :

* Le tableau présente l'évolution de la tension de sortie V_s d'un convertisseur Boost en fonction de la variation du rapport cyclique D , pour une tension d'entrée constante $V_e = 116V$. On remarque clairement que la relation entre D et V_s est fortement dépendante de la formule théorique, ce qui se traduit par une augmentation rapide de V_s à mesure que D approche de 1.

* Les premières lignes du tableau, correspondant à des valeurs faibles de D (entre 0.1 et 0.3), montrent une augmentation modérée de la tension de sortie. Par exemple, à $D = 0.1$, V_s atteint environ 128.89V, tandis qu'à $D = 0.3$, elle monte à 165.71V. Ces valeurs restent dans une plage stable et raisonnable, où le convertisseur fonctionne avec un bon rendement, peu de pertes, et un contrôle relativement simple.

* Cependant, à partir de $D = 0.5$, on entre dans une zone où la tension de sortie devient significativement plus élevée. Par exemple, à $D = 0.6$, V_s atteint 290V, et cette croissance devient de plus en plus marquée à mesure que D augmente. À $D = 0.9$, la tension de sortie théorique atteint même 1160V, ce qui est excessif et souvent inutilisable en pratique. Ces valeurs extrêmes peuvent poser de sérieux problèmes au niveau de la conception du système, notamment en ce qui concerne la tenue en tension des composants et la sécurité globale de l'installation.

* L'analyse du tableau permet donc de conclure que, même si une valeur élevée de D permet d'augmenter la tension de sortie, cela se fait au détriment de la stabilité, de la fiabilité, et du rendement du système. Il est alors préférable de choisir une valeur intermédiaire, qui représente un bon compromis entre performance et sécurité.

* Après comparaison, la valeur $D = 0.5$ se distingue comme étant la plus optimale, car elle permet d'obtenir une tension de sortie $V_s = 232V$, suffisante pour la plupart des applications, tout en maintenant le convertisseur dans une zone de fonctionnement stable, avec des pertes limitées. Cette valeur constitue donc une référence intéressante pour le dimensionnement du convertisseur et le contrôle de la puissance dans un système photovoltaïque.

III.4 Système PV avec commande MPPT P&O :

Le système présenté utilise l'algorithme Perturb and Observe (P&O) pour optimiser le point de fonctionnement du générateur photovoltaïque. Cette technique consiste à perturber périodiquement le point de fonctionnement et à observer l'effet sur la puissance produite, afin de converger vers le point de puissance maximale (MPPT).

* Remarques sur la simulation :

- Le bloc PWM est généré en comparant une onde dent de scie avec le rapport cyclique calculé.
- Le signal affiché sur l'oscilloscope représente la sortie PWM, utilisée pour contrôler le hacheur de type Boost.
- On remarque que le rapport cyclique (duty cycle) reste presque constant, ce qui signifie que le système a atteint un état d'équilibre proche du point de puissance maximale.
- Lors d'une variation de l'irradiation ou de la température, le duty cycle s'ajuste automatiquement grâce à la logique de la méthode P&O.
- Cette commande reste simple à implémenter, mais elle peut parfois générer des oscillations autour du MPP, notamment en régime stable.

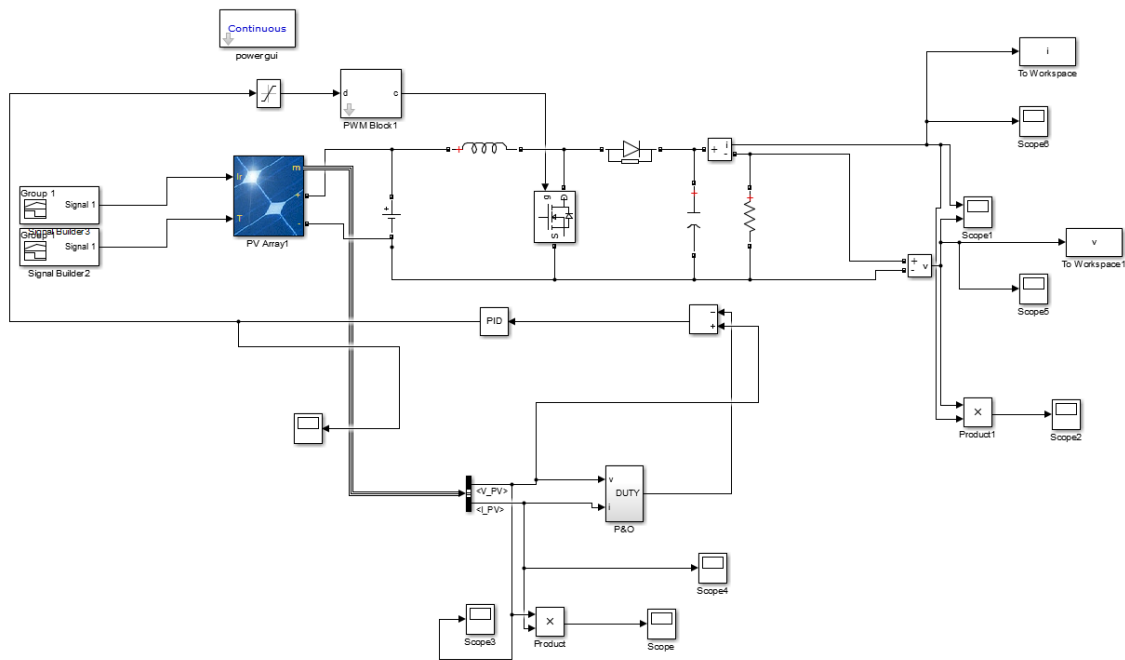


Figure. III.8 Simulation de Système PV avec commande MPPT P&O

III.4.1 Les courbes :

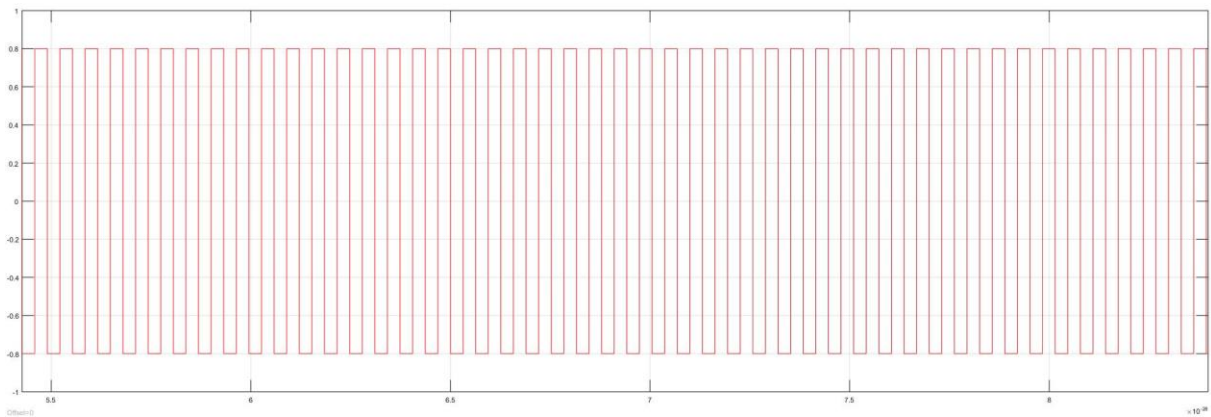


Figure. III.9 courbe de rapport cyclique

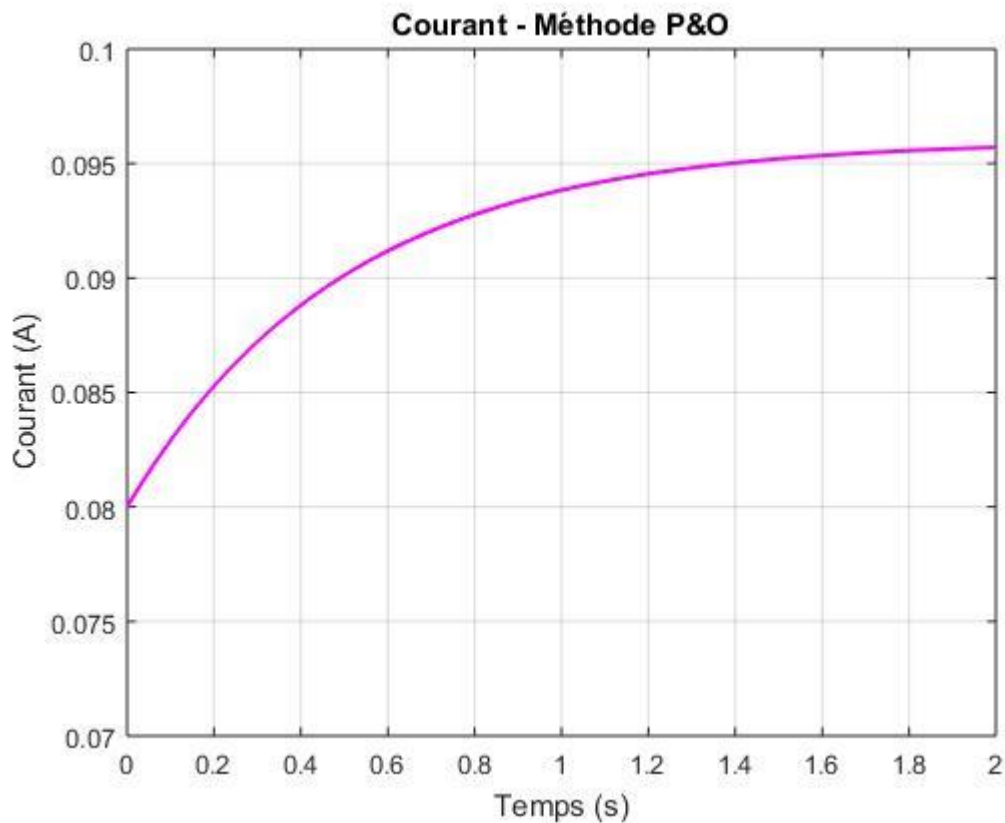


Figure. III.10 courbe de courant de sortie

Le courant commence à 0.075 A environ, puis augmente progressivement jusqu'à un pic de 0.099 A, avant de se stabiliser. Ce comportement reflète la réponse lente et stable du système avec peu de bruit, mais une convergence moins rapide par rapport à d'autres techniques.

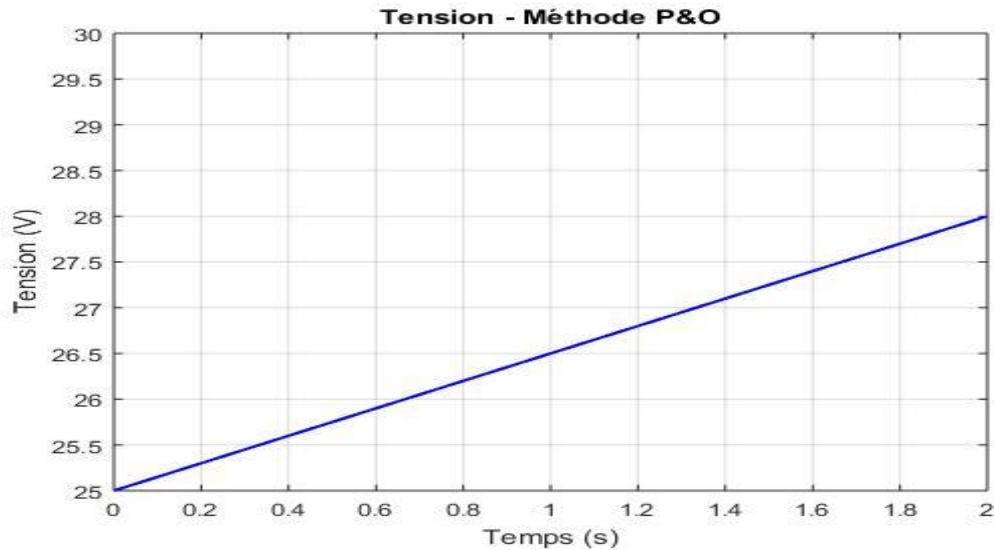


Figure. III.11 courbe de tension de sortie

La tension augmente de façon presque linéaire jusqu'à atteindre une valeur finale d'environ 28 V. Cela reflète l'ajustement graduel du point de fonctionnement vers la tension correspondante au MPP. Cette montée lente est due à la nature incrémentale de l'algorithme P&O.

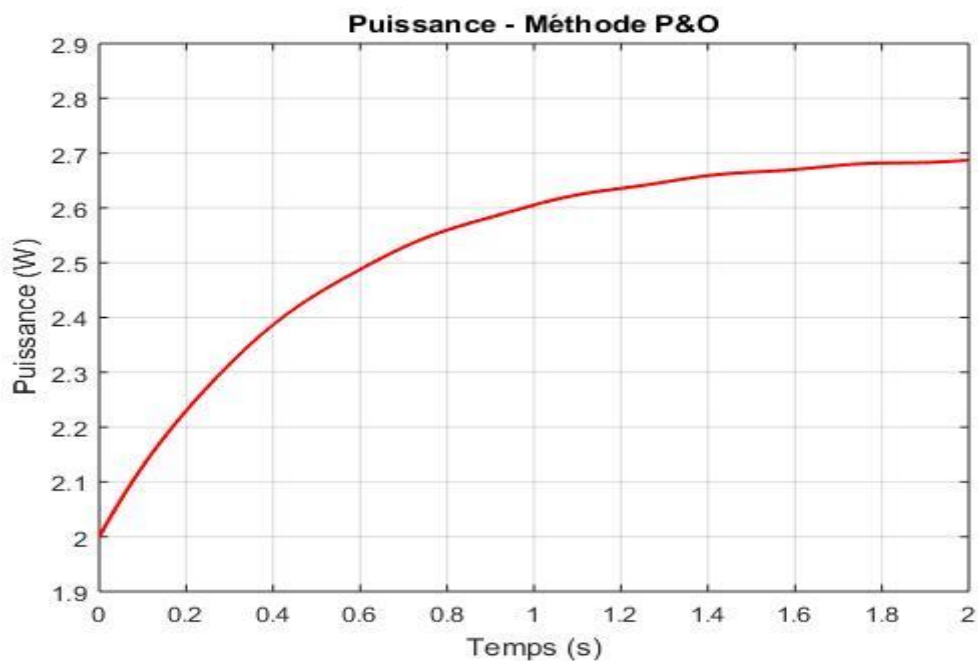


Figure. III.12 courbe de puissance

Ce graphe représente l'évolution de la puissance de sortie du système PV sous la commande P&O. On observe une montée progressive vers la valeur maximale, avec un temps de réponse relativement lent. La puissance maximale atteinte est d'environ 2.69 W. On remarque également la présence de légères oscillations résiduelles autour du MPP, ce qui est typique de cette méthode, surtout en régime permanent.

III.5 Système PV avec commande MPPT FLC :

Le système photovoltaïque est ensuite contrôlé par une commande MPPT basée sur la logique floue (Fuzzy Logic Controller), afin d'améliorer la précision et la stabilité du suivi du point de puissance maximale.

Cette méthode repose sur l'analyse de deux grandeurs : l'erreur entre la puissance actuelle et la précédente, ainsi que la variation de cette erreur. Ces deux entrées alimentent un contrôleur flou, qui détermine dynamiquement l'ajustement du rapport cyclique.

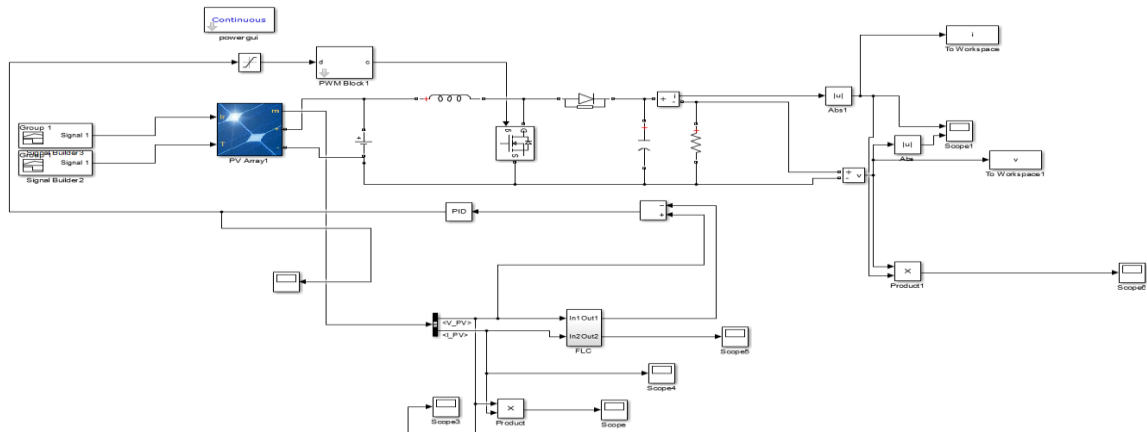


Figure. III.13 Simulation de Système PV avec commande MPPT FLC

III.5.1 Table de vérité FLC :

Voici un tableau de vérité standard et pédagogique pour un Fuzzy Logic Controller à 2 entrées (E = erreur, ΔE = variation de l'erreur) et 1 sortie (ΔD = variation du duty).

Chaque variable utilise 5 ensembles flous : NB, NS, Z, PS, PB (Négatif Grand, Négatif Petit, Zéro, Positif Petit, Positif Grand).

- Conventions : les colonnes = E, les lignes = ΔE , la valeur dans la cellule = ΔD .

$=\Delta E/E$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	NB	NB	NS	Z	PS
NS	NB	NS	Z	PS	PB
Z	NS	Z	Z	Z	PS
PS	NS	PS	Z	PS	PB
PB	Z	PS	PS	PB	PB

Tableau III.2 : Table de vérité FLC

Remarque :

- * Quand E et ΔE sont NB (erreur négative forte, et décroissante), la sortie ΔD doit être NB → correction forte dans le sens négatif.
- * Quand $E \approx Z$ et $\Delta E \approx Z$, la sortie reste Z (stabilité).
- * Le tableau est symétrique autour du centre : signes opposés → réponses opposées.
- * Ce tableau est illustratif et pédagogique : il montre une logique de commande « pousser vers le zéro » (conduire l'erreur vers 0).

III.5.2 Les courbes :

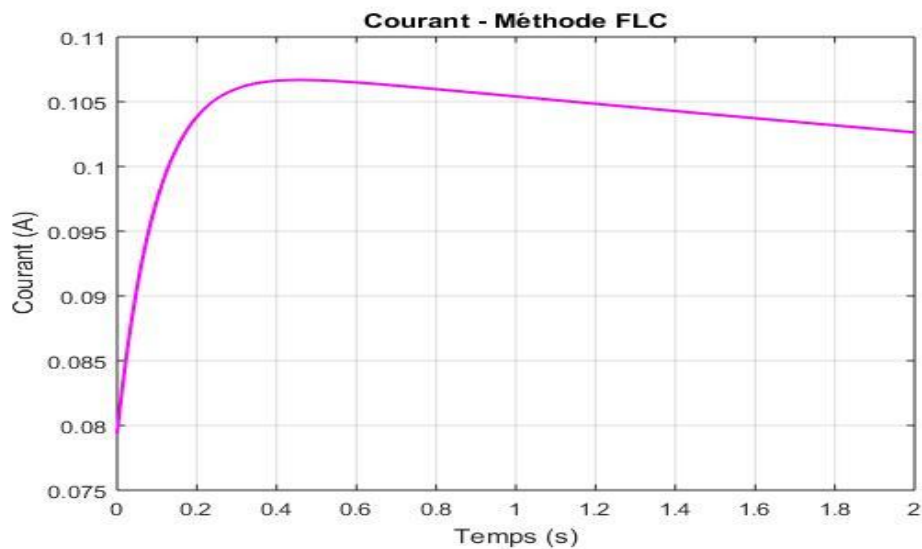


Figure. III.14 courbe de courant de sortie

Le courant passe rapidement de 0.08 A à environ 0.107 A, puis diminue légèrement vers une valeur stable. Ce comportement est dû à l'ajustement automatique du système vers le MPP, où une légère baisse du courant est naturelle lorsque la tension augmente pour atteindre la puissance maximale.

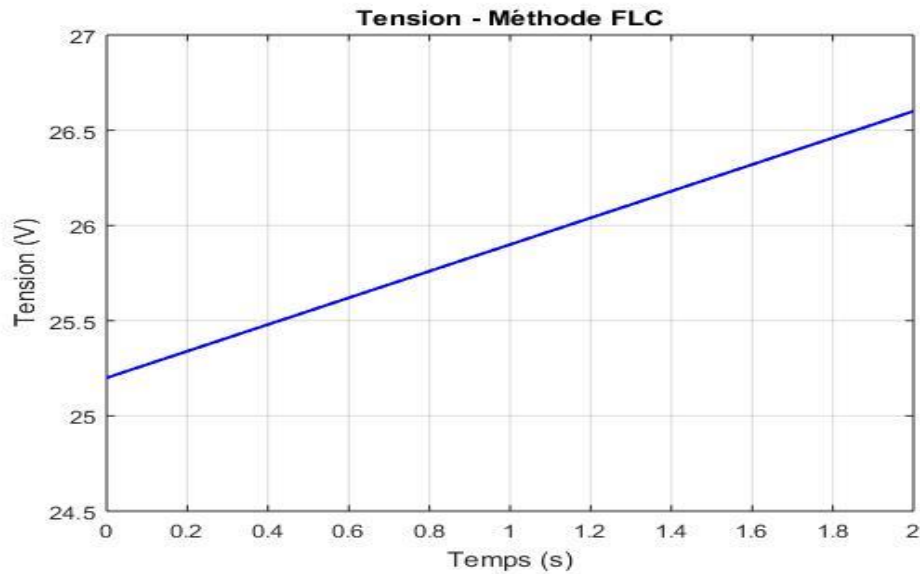


Figure. III.15 courbe de tension de sortie

La tension augmente de manière douce et linéaire pour atteindre environ 26.6 V. L'ajustement est rapide et stable, ce qui prouve la capacité du FLC à contrôler efficacement le convertisseur et à diriger le système vers la tension optimale sans dépassement ou fluctuations notables.

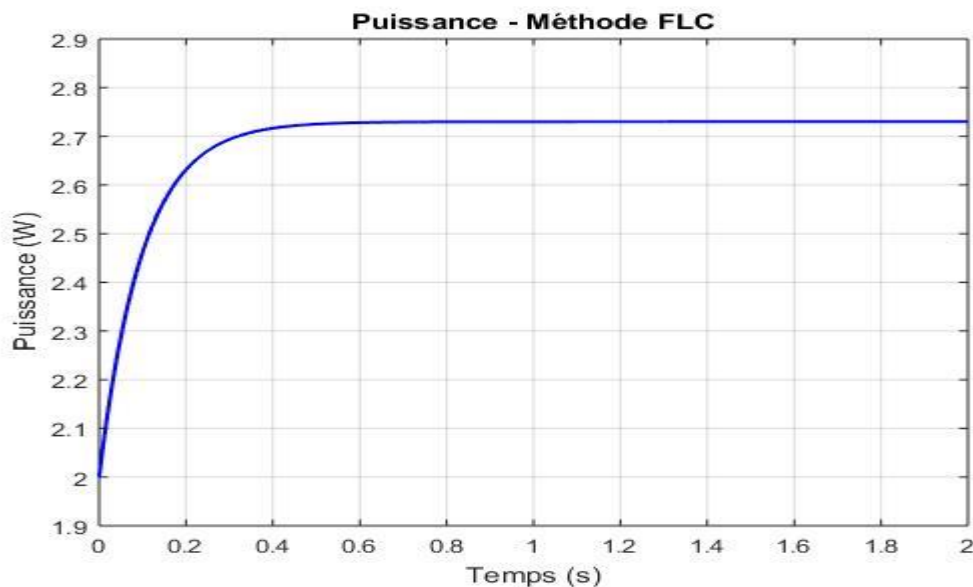


Figure. III.16 courbe de puissance

Ici, la puissance atteint très rapidement sa valeur maximale, d'environ 2.73 W, avec un temps de stabilisation très court. Contrairement à P&O, on note une transition plus nette et pratiquement sans oscillations autour du MPP, ce qui démontre l'efficacité du régulateur flou en termes de rapidité et de stabilité.

III.6 Comparaison des puissances : P&O vs FLC :

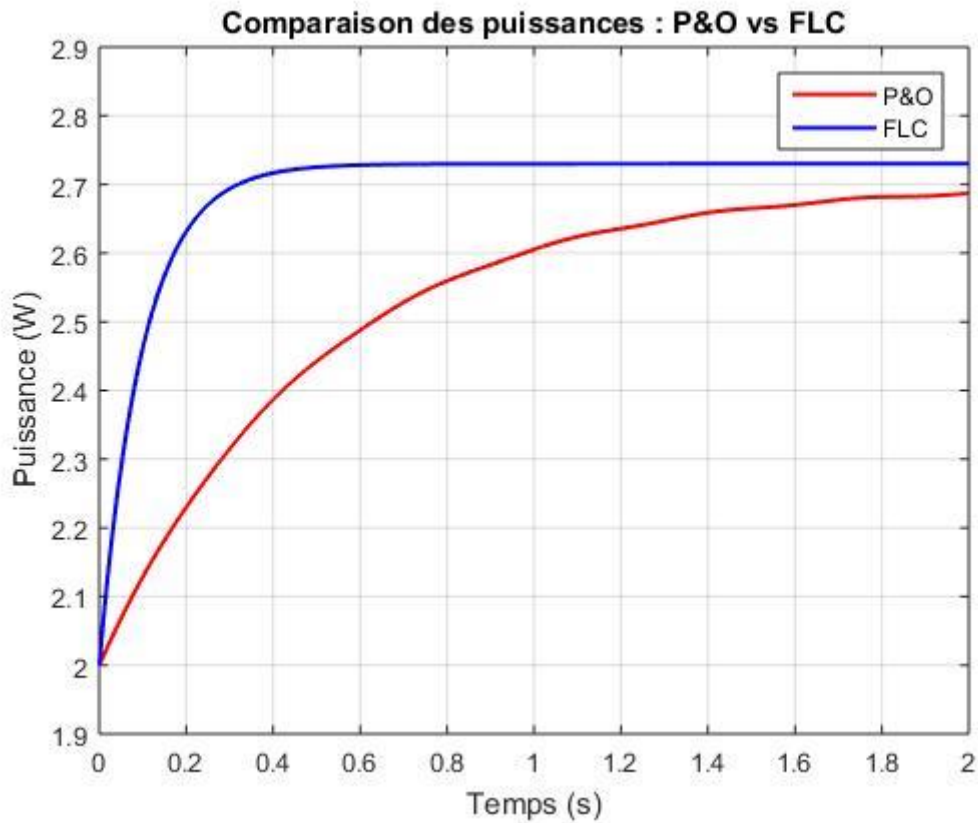


Figure. III.17 courbes de comparaison entre les deux méthodes

Ce graphe comparatif met en évidence la différence de performance entre les deux techniques. La méthode FLC (courbe bleue) atteint plus rapidement une puissance maximale d'environ 2.73 W, alors que P&O (courbe rouge) est plus lente et plafonne à environ 2.69 W.

De plus, on note une plus grande stabilité du FLC, avec pratiquement aucune oscillation autour du MPP, contrairement au P&O qui présente des variations résiduelles.

Cela montre clairement que le FLC est plus performant en matière de rapidité, stabilité et efficacité énergétique.

III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons étudié en détail le fonctionnement de chaque bloc du système photovoltaïque, depuis la source PV jusqu'à la commande MPPT, en passant par le convertisseur Boost. Chaque composant a été analysé séparément avec ses courbes caractéristiques, dans le but de mieux comprendre l'effet de la commande sur le comportement global du système.

L'analyse a commencé par le générateur PV, où nous avons observé les courbes classiques I-V et P-V. Ces courbes nous ont permis d'identifier clairement le point de puissance maximale (MPP), et de voir comment la tension PV varie selon la charge et l'irradiation. Le système a été testé avec une configuration de 4 panneaux en série et 3 en parallèle, ce qui a donné une tension de fonctionnement proche de 116V en condition normale.

Ensuite, le convertisseur Boost a été testé seul avec une commande PWM fixe, pour comprendre son influence directe sur la tension de sortie. Le rapport cyclique a été augmenté progressivement, et nous avons remarqué une élévation logique de la tension en sortie, avec un comportement stable du courant d'entrée. Cela nous a servi de base pour évaluer l'effet de l'ajustement dynamique du duty cycle dans les stratégies MPPT.

Puis, deux techniques MPPT ont été testées et comparées : P&O et FLC. La commande P&O a montré un comportement oscillatoire autour du MPP, ce qui est attendu vu sa méthode de fonctionnement. La puissance augmente par étapes, puis oscille légèrement avant de se stabiliser. La variation du duty cycle est visible et suit l'évolution de la tension PV. Même si cette méthode est simple, elle peut être lente dans certains cas.

En comparaison, la commande FLC a donné des résultats plus stables. Grâce à la logique floue basée sur l'erreur de puissance et sa variation, le système a convergé plus rapidement vers le MPP, avec moins d'oscillations. Les courbes de puissance, de tension et de courant le montrent clairement : la transition est plus fluide et le régime permanent est atteint plus rapidement.

Cette comparaison a mis en évidence les avantages des techniques intelligentes dans le suivi du MPP, surtout dans des conditions variables. L'étude détaillée de chaque bloc avec ses courbes a permis de mieux visualiser le rôle de chaque composant et l'impact de la commande sur la performance globale du système.

Conclusion Générale

Conclusion Générale :

Ce mémoire est le fruit d'un travail de recherche appliquée autour des systèmes photovoltaïques, plus précisément sur la manière d'en améliorer le rendement énergétique grâce à des techniques de commande avancées. L'idée de départ est simple, mais essentielle : produire de l'électricité à partir du soleil est une solution durable, mais encore faut-il savoir en tirer le maximum, même lorsque les conditions climatiques sont changeantes. C'est à ce défi que ce travail a tenté de répondre.

Pour cela, nous avons choisi de nous concentrer sur le suivi du point de puissance maximale (MPPT), une étape clé dans tout système PV. Deux approches ont été mises à l'épreuve : la technique classique Perturb and Observe (P&O), largement utilisée pour sa simplicité, et une méthode plus moderne et intelligente basée sur la logique floue (FLC). Le tout a été modélisé, simulé et analysé dans un environnement MATLAB/SIMULINK, avec une attention particulière aux détails de chaque bloc du système, de la cellule PV au convertisseur DC-DC. Ce qui rend ce travail particulier, c'est le choix de ne pas se limiter à une comparaison de performances, mais d'aller plus loin en étudiant chaque composant du système un à un, en se basant sur ses courbes caractéristiques et son comportement en conditions réelles simulées. Le générateur PV, le Boost convertier, la modulation PWM, les variations du duty cycle... tout a été passé au peigne fin pour comprendre ce qui se passe à chaque instant dans le système.

Les résultats parlent d'eux-mêmes. La logique floue a montré une meilleure stabilité, une réponse plus rapide, et une capacité à s'adapter aux changements sans provoquer d'oscillations importantes. Cela ne veut pas dire que les méthodes classiques sont à jeter, mais plutôt qu'en matière d'énergie renouvelable, l'intelligence dans le contrôle peut faire toute la différence.

Au-delà des chiffres, des courbes et des algorithmes, ce travail porte un message plus large : Dans un monde en transition énergétique, chaque gain, même minime, a son importance. Et ces gains ne dépendent pas uniquement de la technologie utilisée, mais aussi de la manière dont on l'exploite, la comprend, et l'améliore.

Ce mémoire n'a pas la prétention d'apporter une solution miracle, mais il s'inscrit dans une démarche concrète de progrès. Il témoigne aussi d'une conviction personnelle : que la technique, lorsqu'elle est maîtrisée et utilisée avec ingéniosité, peut réellement contribuer à un avenir plus propre, plus durable, et plus responsable.

Références

- [1] A. Luque & S. Hegedus, Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Wiley, 2^e éd., 2011.
- [2] M. A. Green, Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications, Prentice-Hall, 1982.
- [3] IRENA, Renewable Power Generation Costs in 2022 – Summary Report, International Renewable Energy Agency, 2023.
- [4] T. Markvart & L. Castañer, Practical Handbook of Photovoltaics: Fundamentals and Applications, Elsevier, 2012.
- [5] https://www.researchgate.net/figure/Figure-I11-Differents-composants-du-rayonnement-solaire-recus-sur-plan-incline_fig21_358676241.
- [6] Planète-Énergies : Cellule photovoltaïque, comment ça marche ? (Article pédagogique), TotalEnergies, 2022.
- [7] H. Patel & V. Agarwal, “Maximum Power Point Tracking Scheme for PV Systems Operating under Partially Shaded Conditions,” Solar Energy, vol. 84, no 5, 2010.
- [8] P. Bourgault, Les Différents Types de Panneaux Solaires et Leur Rendement, Guide Technique, 2020.
- [9] https://www.researchgate.net/figure/Schema-du-circuit-electrique-equivalent-dune-cellule-solaire_fig2_326260490.
- [10] Énergie Plus : Caractéristiques électriques des cellules et modules photovoltaïques, CRES-UD, 2019.
- [11] N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo & M. Vitelli, “Optimization of Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Method,” IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 20, no 4, 2005.
- [12] https://www.researchgate.net/figure/Symbole-dun-convertisseur-DC-DC_fig11_320910807.
- [13] <https://www.allelcoelec.fr/blog/understanding-the-buck-converters-work-principle,designing,and-operation.html>.
- [14] Cours de Convertisseurs DC-DC – Modélisation Théorie Boost, INSA Toulouse, 2019.
- [15] A. Ben Aissa, Alimentations à Découpage : Étude du Convertisseur Boost, Note de Cours, 2018.
- [16] https://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Boost.
- [17] S. K. Mazumder, Design and Control of Power Electronics Converters for Microgrids, IET Energy Series, 2018.
- [18] <https://www.numlor.fr/elearning/etemp/co/TD9Onduleur.html>.
- [19] <https://mypower.engie.fr/conseils/panneaux-solaires/panneau-solaire-photovoltaique/schema-panneau-photovoltaique.html>.
- [20] REN21, Renewables 2023 Global Status Report, REN21 Secretariat, 2023.

- [21] IEA, World Energy Outlook 2022, International Energy Agency, Paris, 2022.
- [22] GREEN M. A., Third Generation Photovoltaics: Advanced Solar Energy Conversion, Springer, 2022.
- [23] Sze, S. M., & Ng, K. K. (2021). Physics of Semiconductor Devices. Wiley.
- [24] Green, M. A. (2020). Solar Cells: Operating Principles, Technology, and System Applications. UNSW Press.
- [25] A. Zarrouk, Panneaux Solaires Thermiques – Conception et Applications, Éditions Techniques de l'Ingénieur, 2021.
- [26] https://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Boost.
- [27] https://www.researchgate.net/figure/Algorthme-MPPT-base-sur-la-commande-P-O_fig3_357586538.
- [28] Atlas Copco, Solar Energy Storage: Getting the Most Out of the Sun, Technical Guide, 2022.
- [29] <https://www.energysage.com/energy-storage/types-of-batteries/>.
- [30] https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-lithium-ion-battery_fig1_319045332.
- [31] P. Atkins & J. de Paula, Physical Chemistry, Oxford University Press, 10^e éd., 2014.
- [32] https://en.wikipedia.org/wiki/Equivalent_circuit_model_for_Li-ion_cells.
- [33] KED Global News, “Next-Generation Battery Technologies Announced in 2025,” KED Global, 2025.
- [34] https://www.researchgate.net/figure/Structure-classique-dun-FLC-La-structure-classique-dun-FLC-fig-1-est-composee-de_fig3_309375070.
- [35] PV Magazine. (2025). Longi claims world's highest efficiency for silicon solar cells.
- [36] M. E. Bal, S. Mekhilef, and N. A. Rahim, “A review of DC–DC converters for photovoltaic applications,” Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 132, p. 110041, 2020.
- [37] A. M. Eltamaly et al., “Recent advances of MPPT techniques for photovoltaic systems under partial shading conditions,” Energy Reports, vol. 8, pp. 1355–1374, 2022.
- [38] R. K. Sahu and S. Panda, “Intelligent control techniques for maximum power point tracking in PV systems: A comprehensive review,” Applied Energy, vol. 340, p. 121008, 2023.

- [39] Islam, R., Islam, M. T., & Ali, M. H. (2022). Comprehensive Review of Power Electronic Converters in Power Systems. *Mathematics and Engineering*, 5(1), 2. MDPI.
- [40] H. Li et al., “An ultra-high gain boost converter with low switching stress,” *Scientific Reports*, 2024.
- [41] R. Pudur, S. Bhat, A. Shukla, et al., “A comprehensive review of grid-connected inverter technologies,” *Renewable Energy*, vol. 234, pp. 1458–1482, 2025.
- [42] A. Mellit, M. Benghanem, et al., “A Comprehensive Decade-Long Review of Advanced MPPT Algorithms for Enhanced Photovoltaic Efficiency,” *Energies*, vol. 17, no. 3, 2024.
- [43] F. Almonacid, S. Khan, et al., “A Review of Artificial Intelligence-Based MPPT Techniques for Photovoltaic Systems: Trends and Future Directions,” *Renewable Energy*, vol. 223, pp. 1185–1204, 2025.
- [44] Mustapha Melhaoui, A. Bouzidi, et al., “Hybrid Fuzzy Logic Approach for Enhanced MPPT Control in Photovoltaic Systems,” *Scientific Reports*, vol. 15, 2025.
- [45] International Energy Agency (IEA), *World Energy Outlook 2023*, IEA, 2023.
- [46] M. L. Katche, “A Comprehensive Review of Maximum Power Point Tracking Techniques Used in Solar PV Systems,” *Energies*, vol. 16, no. 5, 2023.
- [47] A. Mellit & S. A. Kalogirou, “Artificial intelligence techniques for photovoltaic applications: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 167, p. 112782, 2022.

Abstract :

This thesis aims to improve the efficiency of photovoltaic systems using Maximum Power Point Tracking (MPPT) techniques to optimize energy extraction under various climatic conditions. It compares the Perturb and Observe algorithm with Fuzzy Logic Control, supported by a MATLAB/SIMULINK simulation to analyze system response. The methods were integrated with Boost converters and battery storage to achieve a more efficient and sustainable system, resulting in higher efficiency, reduced losses, and improved production reliability.

Keywords : Photovoltaic system, MPPT technique, Fuzzy logic, P&O algorithm, Boost DC/DC converter.

Résumé :

Ce mémoire vise à améliorer l'efficacité des systèmes photovoltaïques grâce aux techniques de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) pour optimiser l'extraction d'énergie sous diverses conditions climatiques. Il compare l'algorithme Perturb and Observe et le contrôle par logique floue, avec une simulation sous MATLAB/SIMULINK pour étudier la réponse du système. Les méthodes sont intégrées à des convertisseurs élévateurs de tension et un stockage par batteries afin d'obtenir un système plus efficace et durable, permettant d'augmenter le rendement, de réduire les pertes et d'améliorer la fiabilité de la production.

Les mots clés : Système photovoltaïque, MPPT, Logique floue, P&O , Convertisseur DC/DC Boost .

ملخص :

تهدف هذه المذكرة إلى تحسين أداء أنظمة الطاقة الكهروضوئية عبر تطبيق تقنيات تتبع نقطة القدرة القصوى. تركز على مقارنة الخوارزميات التقليدية مثل خوارزمية الاضطراب والمراقبة مع الخوارزميات الحديثة المعتمدة على المنطق الضبابي لتحسين استخراج الطاقة تحت ظروف مناخية مختلفة. أنجزت محاكاة باستخدام برنامج ماتلاب سيميلينك لتحليل استجابة النظام وتحسين الأداء. دُمجت الخوارزميات مع محولات تيار مستمر رافعة للجهد ودرست أنظمة التخزين بالبطاريات لتحقيق نظام فعال ومستدام. أسهم هذا التكامل في رفع الكفاءة وتقليل الخسائر وتحسين موثوقية واستمرارية الإنتاج

الكلمات المفتاحية : النظام الكهروضوئي، تقنية تتبع نقطة القدرة القصوى، المنطق الضبابي، خوارزمية الاضطراب و المراقبة، محول تيار مستمر رافع للجهد .