

**Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique**

## **Projet de Fin d'études**

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique

Spécialité : -Automatique et Systèmes  
-Automatique et informatique industrielle

### **Thème**

**Commande MPPT intelligente pour un système de  
conversion photovoltaïque autonome**

**Préparé par :**

- BELHADDAD Abdelah
- BOUCHABANE Abdeslem

**Dirigé par :**

- M. KACIMI

**Examiné par :**

- M. BELKAID
- M<sup>me</sup>. IDJADARENE

# *Remerciements*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements à Monsieur KACIMI Mohand Akli. Sa présence bienveillante et son amitié ont été une source de soutien précieuse tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Ses conseils avisés, son encadrement exceptionnel et ses encouragements incessants ont été des éléments essentiels de ma réussite. Sa vaste expertise et son dévouement sans faille ont été une source d'inspiration inestimable pour moi, me poussant à donner le meilleur de moi-même. Merci infiniment !*

*J'ai l'honneur de remercier Monsieur BELKAID Abdelhakim et madame IDJADARENE Souad pour qu'ils aient consacré leurs temps précieux et leurs expertises à évaluer ce travail.*

*Mes salutations chaleureuses s'adressent également à Monsieur BELHARET Walid et madame BERKANI Nawel, leur soutien indéfectible a été un moteur essentiel de ma progression académique.*



# Sommaire

<b>Sommaire</b> .....	<b>I</b>
<b>Listes des Tableaux</b> .....	<b>III</b>
<b>Listes des figures</b> .....	<b>III</b>
<b>Liste des abréviations</b> .....	<b>IV</b>
<b>Chapitre I: Généralités sur les systèmes photovoltaïques</b> .....	<b>3</b>
I.1. Introduction .....	3
I.2. Principe du photovoltaïque .....	3
I.3. Structure de la cellule photovoltaïque .....	4
I.4. Installation photovoltaïque .....	5
I.5. Modélisation d'une photopile .....	6
I.6. Panneau photovoltaïque Kyocera Solar KC200GT .....	8
I.7. Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque .....	9
I.7.1 Influence de la température sur les caractéristiques I-V .....	9
I.7.2 Influence d'irradiance sur la caractéristique I-V .....	9
I.8. Rendement de la conversion PV .....	10
I.9. Facteur de forme .....	10
I.10. Conclusion .....	11
<b>Chapitre II: Techniques de Commande MPPT</b> .....	<b>12</b>
II.1. Introduction .....	12
II.2. Étage d'adaptation – Convertisseur DC-DC .....	12
II.2.1 Principe de fonctionnement du BOOST.....	14
II.2.2 Choix et dimensionnement des composants d'un BOOST .....	17
II.3. Principe des commandes MPPT .....	18
II.4. Techniques de commande MPPT .....	19
II.4.1 Commande Classique .....	19
II.4.2 Commande Avancée .....	19
II.4.3 Commande Intelligente .....	20
II.5. Critère d'évaluation d'une commande MPPT .....	23
II.6. Conclusion .....	23
<b>Chapitre III: Simulation, résultats et discussion</b> .....	<b>24</b>
III.1. Introduction .....	24

III.2. Modèle du système PV .....	24
III.3. Logique floue.....	27
III.3.1 Conception du contrôleur Flou MPPT .....	27
III.3.2 Choix de la fonction d'appartenance.....	28
III.3.3 Table de décision.....	28
III.4. Optimisation du Contrôleur flou par GWO algorithme.....	30
III.4.1 Fonction objective .....	31
III.4.2 Résultats de l'optimisation .....	31
III.5. Comparaison entre la P&O et la commande flou optimisée .....	36
III.6. Conclusion .....	37
<b><i>Conclusion générale</i></b> .....	<b>43</b>
<b><i>Perspectives</i></b> .....	<b>44</b>
<b><i>Références</i></b> .....	<b>45</b>

## Listes des Tableaux

<b>Tableau I.1:</b> Caractéristique du PV .....	8
<b>Tableau II.1:</b> Valeurs de de la fréquence, Inductance et condensateur .....	18
<b>Tableau III.1:</b> Base de règles du contrôleur floue MPPT .....	29
<b>Tableau III.2:</b> Moteur d'inférence floue.....	29
<b>Tableau III.3:</b> Paramètres du GWO.....	31

## Listes des figures

<b>Figure I.1:</b> Parcours des électrons dans le photovoltaïque .....	3
<b>Figure I.2:</b> Structure d'une photopile en silicium .....	5
<b>Figure I.3:</b> Exemple du profil de consommation journalier .....	5
<b>Figure I.4:</b> Installation avec et sans suiveur solaire .....	6
<b>Figure I.5:</b> modèle d'une photopile .....	6
<b>Figure I.6:</b> Caractéristique I-V des association série et parallèle de plusieurs photopiles .....	7
<b>Figure I.7:</b> Différentes zones de la caractéristique I-V. ....	8
<b>Figure I.8:</b> L'influence de la température.....	9
<b>Figure I.9:</b> L'influence d'irradiance.....	10
<b>Figure II.1:</b> Etage d'adaptation entre un PV et une charge .....	12
<b>Figure II.2:</b> Adaptation du rapport cyclique suivant : ensoleillement, température et charge	13
<b>Figure II.3:</b> Circuit électrique du BOOST .....	14
<b>Figure II.4:</b> phase de charge.....	14
<b>Figure II.5:</b> phase de décharge .....	15
<b>Figure II.6:</b> Allure des tensions dans la phase de charge et de décharge .....	16
<b>Figure II.7:</b> Allure des courants dans la phase de charge et de décharge .....	16
<b>Figure II.8:</b> Diagramme de puissance – fréquence des semi-conducteurs.....	17
<b>Figure II.9:</b> Générateur de Thévenin avec graphe puissance en fonction de la charge connectée .....	18
<b>Figure II.10:</b> hiérarchie sociale des loups gris .....	21
<b>Figure II.11:</b> Organigramme de l'algorithme GWO [23].....	22
<b>Figure III.1:</b> Commande MPPT de type P&O .....	24
<b>Figure III.2:</b> Poursuite du point de puissance maximale .....	25
<b>Figure III.3:</b> Algorithme P&O [10] .....	25
<b>Figure III.4:</b> Profil de l'irradiance et de température .....	26
<b>Figure III.5:</b> Variations de la puissance en fonction du temps .....	26
<b>Figure III.6:</b> Architecture interne d'un système flou [22] .....	27
<b>Figure III.7:</b> Fonction d'appartenance triangulaire (a) et trapézoïdale (b).....	28
<b>Figure III.8:</b> Approche d'optimisation d'une commande MPPT floue .....	30
<b>Figure III.9:</b> Structure et codage des Fonction d'appartenances [22].....	30
<b>Figure III.10:</b> Structure des solutions du GWO.....	30

<b>Figure III.11:</b> Evolution de la fonction d'optimisation en fonction des itérations .....	32
<b>Figure III.12:</b> Fonctions d'appartenances du contrôleur flou optimal.....	32
<b>Figure III.13:</b> Variation de la puissance en fonction du temps .....	33
<b>Figure III.14:</b> Rapport entre la puissance réelle et la puissance théorique .....	34
<b>Figure III.15:</b> Variation de la puissance charge et la puissance théorique en fonction du temps. ....	34
<b>Figure III.16:</b> Variation de la puissance théorique et réelle du panneau .....	35
<b>Figure III.17:</b> Variation de la puissance théorique et réelle du panneau .....	35
<b>Figure III.18:</b> Profile de l'irradiance et de température .....	36
<b>Figure III.19:</b> Comparaison des performances : P&O et logique floue .....	36

## Liste des abréviations

- A : Facteur d'idéalité de la photopile, dépend de la matière de fabrication (silicium ou germanium) et le pourcentage de dopage ;  $A=1,3$ .
- $e_g$  : énergie de seuil, c'est l'énergie nécessaire pour arracher un électron de l'atome de phosphore à la température de référence 298 Kelvin ;  $e_g = 1,12(\text{ev})$ .
- FLC : Contrôleur floue
- $G_0$  : Luminosité au condition STC.
- G : Luminosité de fonctionnement.
- GWO : Grey Wolf Optimisation
- $I_{cc}$ : Courant de court-circuit de la photopile.
- $I_s$ : Courant de saturation
- $I_{pv}$ : Courant de la photopile
- $I_{ph}$ : Courant photon
- K : Constante de Boltzmann :  $1.381 \times 10^{-23}$ .
- $K_i$ : Coefficient de température de court-circuit.
- PPM : Point de puissance maximale
- PV : Panneau Photovoltaïque
- q: La charge électrique ;  $q=1.6 \times 10^{-19}(\text{C})$ .

- $R_s$ : La résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions, il faut qu'elle soit le plus petit possible pour avoir un meilleur rendement
- $R_{sh}$ : La résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction.
- SIF : système à inférence floue
- $T_c$ : Température de fonctionnement en Kelvin
- $T_{réf}$ : Température de référence en Kelvin
- $V_{co}$ : Tension de circuit ouvert de la photopile.
- $V_d$ : Tension de la polarisation
- $V_{pv}$ : Tension de la photopile.
- $V_{th}$ : Tension thermique

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

L'épuisement des ressources énergétiques fossiles associées à l'augmentation continue de la demande et de la consommation de l'électricité, ajouter à la pollution causée par l'utilisation de ces carburants, le réchauffement climatique engendré par les gaz à effet de serre... rendent l'investissement dans le domaine des énergies renouvelables une des meilleures solutions dans de nombreux pays du monde [1].

Toute source d'énergie inépuisable, qui se renouvelle rapidement, est considérée comme une source d'énergie renouvelable tels que : le solaire, l'hydraulique, l'éolienne et la biomasse. Parmi toutes ces énergies renouvelables, notre travail se concentrera sur l'énergie solaire photovoltaïque. Cette dernière consiste à convertir directement l'énergie solaire lumineuse en électricité. Ce phénomène physique est dit : « *l'effet photovoltaïque* », découvert en 1839 par le français Edmond Becquerel [2] dont l'élément de base est la photopile exposée à la lumière du soleil.

## **Problématique**

A première vue, il semble que plus une région est ensoleillée, et plus le nombre de panneaux ou de photopile utilisés augmente plus la production électrique augmente en conséquence. Cela reste en partie vrai, cependant, les panneaux photovoltaïques restent des sources non idéales car ils sont sensibles aux variations de la température et de l'irradiance, et toute variation de ces conditions modifie significativement le rendement de cette source. Ceci peut être expliqué par la concordance entre l'impédance interne du panneau et celle de la charge.

En effet, plus la valeur de la résistance interne de la source s'approche de celle de la charge, plus le transfert en puissance est maximal [3].

Toute l'idée de l'utilisation d'une source photovoltaïque, est d'extraire le maximum de puissance en toute circonstance. Cette idée est plus facilement réalisable en utilisant un convertisseur commandable dressé entre la source et la charge. Toutefois, la simple présence de ce convertisseur ne suffit pas, il faut également une commande dédiée à ce problème plus connue sous le nom de MPPT pour : *Maximum Power Point Tracking*.

De nos jours et avec les progrès technologiques récents, les techniques d'intelligence artificielle, en raison de leurs capacités à résoudre les dilemmes les plus difficiles, peuvent être une solution adéquate pour remédier à cette question épineuse qui est : « *comment peut-on assurer le transfert maximal de puissance malgré les variations des conditions climatiques ?* »

Le travail entrepris durant ce projet de fin d'étude sera porté sur l'étude, la modélisation, et la commande d'un système photovoltaïque autonome en utilisant l'une des techniques de commande intelligente.

## **Présentation du manuscrit**

Le présent manuscrit comportera trois chapitres, organisés comme suit :

Le premier chapitre entièrement dédié à la description de l'état de l'art, sur les panneaux photovoltaïques ainsi que les types existant dans les marchés. Nous décrivons en suite le principe de l'effet photovoltaïque puis la caractéristique de la photopile, ainsi que l'influence des différents paramètres climatiques sur les caractéristiques I-V et P-V.

Le deuxième chapitre, présentera le principe de la recherche de point maximal, les techniques de commande MPPT classiques et intelligentes et sera consacré aussi à l'étude du convertisseur statique Boost ainsi le rôle de ses différents composants.

Le troisième chapitre, repartit en trois sections, dans un premier temps la démarche de conception d'un hacheur Boost. La seconde partie sera consacrée à la présentation et la conception du système flou optimisé. Ensuite, la troisième partie de ce chapitre présentera une étude comparative entre les techniques MPPT classiques de type P&O et la technique de l'intelligence artificielle logique floue optimiser.

Enfin le manuscrit sera clôturé par une conclusion générale.

# **Chapitre I: Généralités**

## **sur les systèmes**

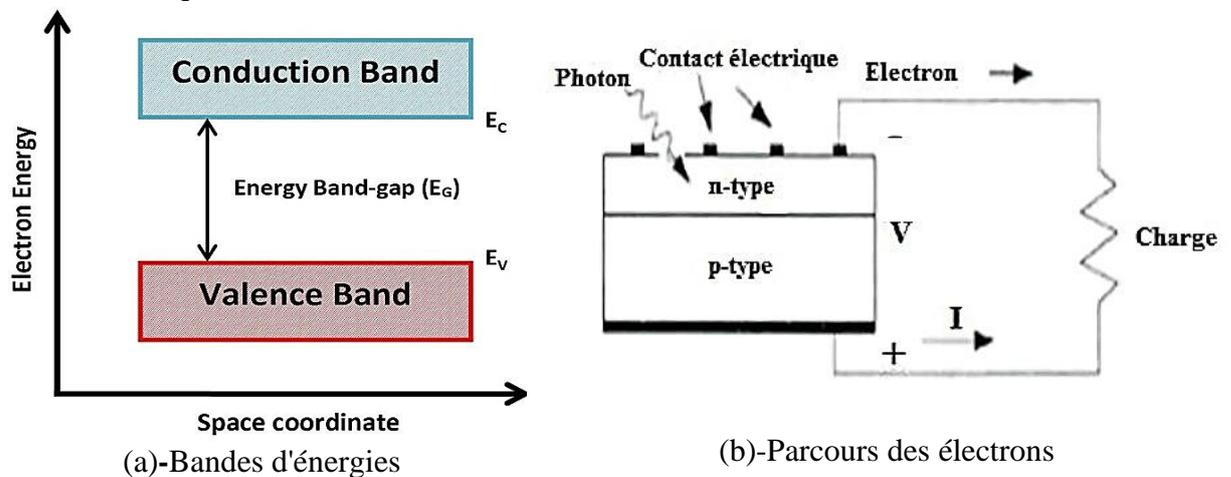
## **photovoltaïques**

## I.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir du rayonnement solaire via une photopile [2]. Le rayonnement solaire émis lors de la fusion thermonucléaire au cœur du soleil est libéré sous forme de flux de particules appelé photons formant des ondes électromagnétiques. La distance soleil-terre, en plus de la rotation et l'inclinaison de la Terre font que l'énergie disponible en un point donné varie selon la localisation géographique, la saison, l'heure, les conditions météorologiques, l'altitude du lieu [4].

## I.2. Principe du photovoltaïque

Durant la collision de la lumière avec les atomes du cristal dans la jonction PN, les photons communiquent leur énergie aux atomes. Chaque atome fait passer des électrons de la bande de valence à la bande de conduction (voir figure (a)-I.1) engendrant ainsi des paire électron-trou générant une différence de potentielle aux bornes de la jonction PN. En maintenant la jonction sous la lumière et connecter à un circuit externe, elle devient un générateur électrique. [5]



**Figure I.1:** Parcours des électrons dans le photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques sont une association de plusieurs photopiles qui convertissent la lumière du soleil en énergie électrique. Toutefois comme toute autre technologie elle possède ses avantages et ses inconvénients.

Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. D'autre part, cette technologie présente des qualités

sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.

Cependant, la fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé, en particulier lorsque le stockage de l'énergie électrique (batterie) est nécessaire. Ajouter à cela, le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%) [6] et sensible aux conditions climatiques.

### I.3. Structure de la cellule photovoltaïque

Le processus de fabrication des panneaux photovoltaïque est principalement basé sur l'utilisation des semi-conducteurs, et le silicium forme l'un des plus employés. Toutefois, une cellule photovoltaïque n'est pas uniquement constituée de semi-conducteur mais d'autres couches aussi comme illustrée par la (figure I.2). Les différences entre elles se situent au niveau des matériaux utilisés et des procédés de fabrication [7], on distingue 4 types classés comme suit :

- **Amorphe** : Sa structure atomique est désordonnée, non cristallisée, mais il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin. Cependant, ce qu'il gagne en pouvoir d'absorption [8].
- **Poly cristallin** : Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de photopile est également bleu, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux [8].
- **Monocristallin** : Lors du refroidissement, le silicium fondu se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme [8] .
- **Multi jonction** : composées de différentes couches qui permettent de convertir différentes parties du spectre solaire et ainsi d'obtenir les meilleurs rendements de conversion [9] .

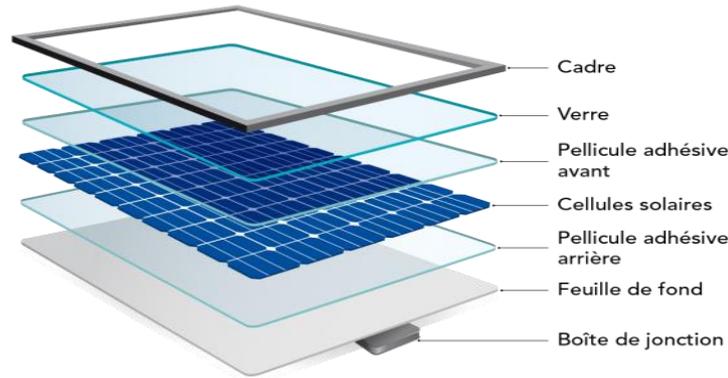


Figure I.2: Structure d'une photopile en silicium

## I.4. Installation photovoltaïque

L'étude pour l'installation photovoltaïque commence principalement par comprendre la consommation d'électricité, cette dernière se présente souvent sous une forme similaire à celle présentée dans la (figure I.3). Ensuite, viens alors le choix du mécanisme de l'installation, soit fixe, soit dotée d'un poursuiveur solaire.

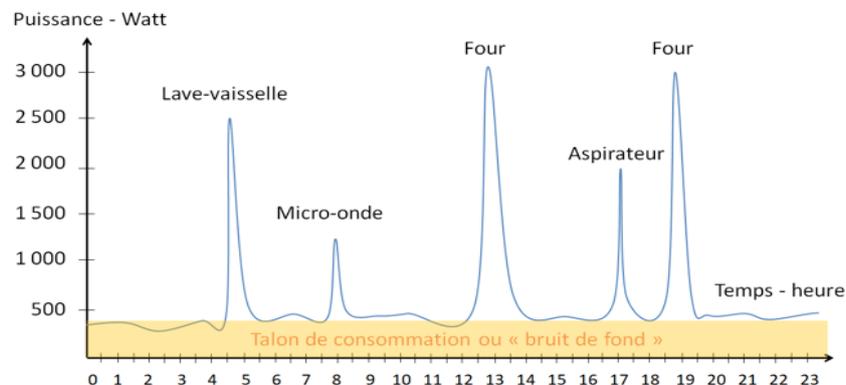


Figure I.3: Exemple du profil de consommation journalier

En effet, pour un observateur situé sur la surface de la terre, le soleil décrit une trajectoire apparente qui dépend de la latitude et la longitude du lieu où il se trouve [10]. Une installation fixe, favorise la production indépendamment des saisons en revanche, en position fixe, le panneau délivre une puissance qui croît très lentement tôt le matin et diminue fortement l'après-midi ce qui entraîne des pertes énergétiques précieuses.

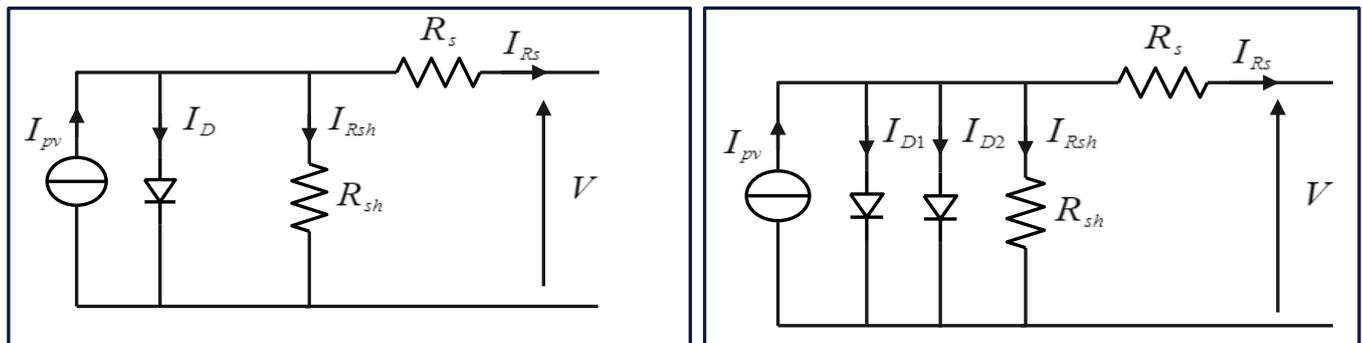
Si l'installation s'oriente constamment en direction du soleil, elle génère un maximum d'électricité. Une installation fixe de 1 kW orientée de façon optimale, produit par jour d'ensoleillement, environ 5 kWh d'électricité solaire. La même installation de 1kW avec « suiveur » fournit en revanche jusqu'à 10 kWh par jour. C'est à dire 50% de gains d'énergie en plus [11].



Figure I.4: Installation avec et sans suiveur solaire

### I.5. Modélisation d'une photopile

Dans la littérature, on trouve principalement deux modèles mathématiques utilisés pour représenter le comportement non linéaire de la cellule photovoltaïque. Le premier est dit modèle à une diode et le second est dit modèle à deux diodes. Le circuit électrique correspondant à ces deux modèles est illustré respectivement dans la (figure I.5) :



(a)- Modèle à 1 diode

(b)- Modèle à 2 diodes

Figure I.5: modèle d'une photopile

Le modèle à 2 diodes est plus précis lorsqu'il est soumis à des variations de l'éclairement et de température. Durant ce travail, nous utiliserons le modèle à une diode, car il est aussi considéré satisfaisant pour décrire le comportement de la photopile [12].

En appliquant la loi de Kirchhoff sur le circuit de la (figure I.5 (a)) :

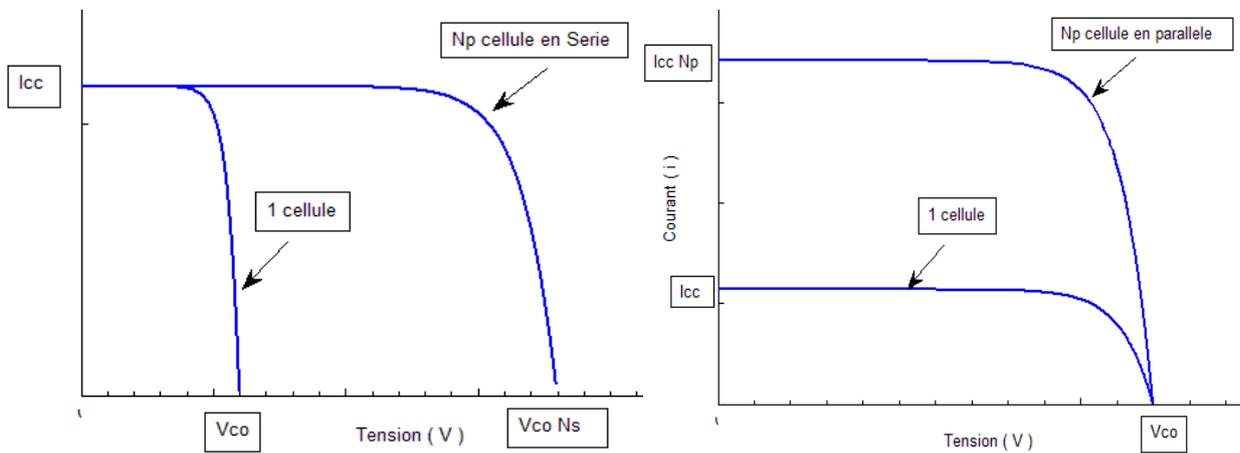
$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \cdot \left( e^{\frac{V_d}{A \cdot V_{th}}} - 1 \right) - \frac{R_s \cdot I_{pv} + V_{pv}}{R_{sh}} \quad I.1$$

Avec :

$$V_{th} = \frac{T_c \cdot K}{q} \quad \text{et} \quad V_d = V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s$$

A : Facteur d'idéalité de la photopile ;  $I_{ph}$  : Courant de photon ;  $I_s$  : Courant de saturation ;  $V_{th}$  : Tension thermique ;  $V_d$  : Tension de la diode ;  $R_s$  : Résistance série ;  $R_{sh}$  : Résistance parallèle ;  $q$  : La charge électrique ;  $K$  : Constante de Boltzmann ;  $T_c$  : Température de fonctionnement en Kelvin ;  $I_{pv}$  et  $V_{pv}$  le courant et la tension du PV respectivement

Une photopile individuelle ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 0.5 W avec une tension de moins de 1V. Pour produire plus de puissance, plusieurs photopiles sont assemblées. Les connections en série augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la même tension. La puissance de sortie est donc, proportionnelle aux nombres de photopiles interconnectées [10]. Si on considère  $N_s$  photopile en série et  $N_p$  en parallèle on obtient alors la (figure I.6) suivante :



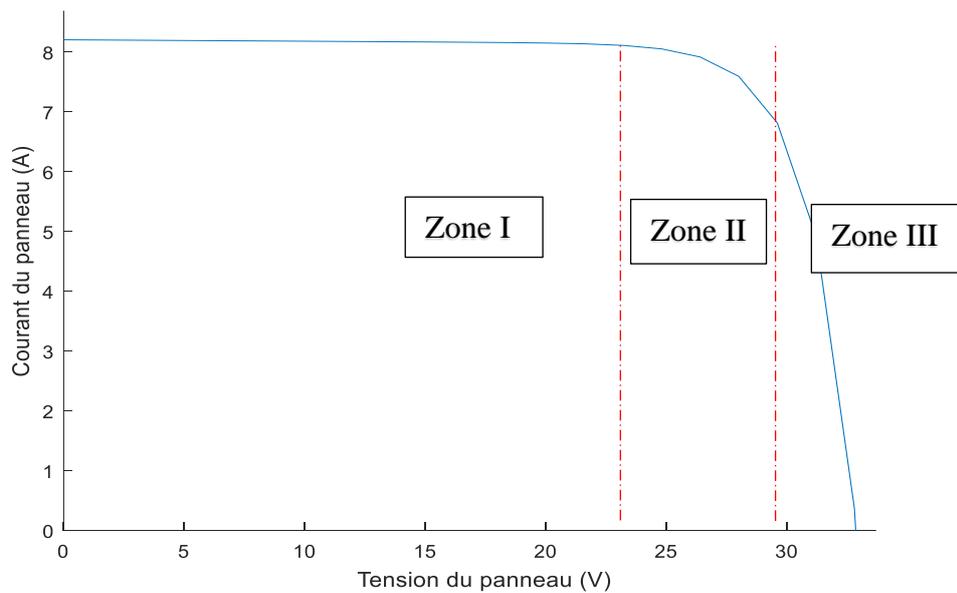
(a)-association série

(b)-association parallèle

**Figure I.6:**Caractéristique I-V des association série et parallèle de plusieurs photopiles

Que les photopiles soient associées en série ou en parallèle, on distingue trois zones de fonctionnement du générateur photovoltaïque :

- La Zone I représente la caractéristique d'un générateur de courant : Courant constant tension variante.
- La Zone II est une zone de transition ; car la tension et le courant sont variantes au même temps.
- La Zone III représente la caractéristique d'un générateur de tension : tension presque constante pour des variation remarquable en courant.



**Figure I.7:** Différentes zones de la caractéristique I-V.

## I.6. Panneau photovoltaïque Kyocera Solar KC200GT

Pour la suite de ce travail nous avons choisi d'utiliser le panneau Kyocera Solar KC200GT ayant les caractéristiques décrites dans le tableau I.1 ci-dessous.

**Tableau I.1:** Caractéristique du PV

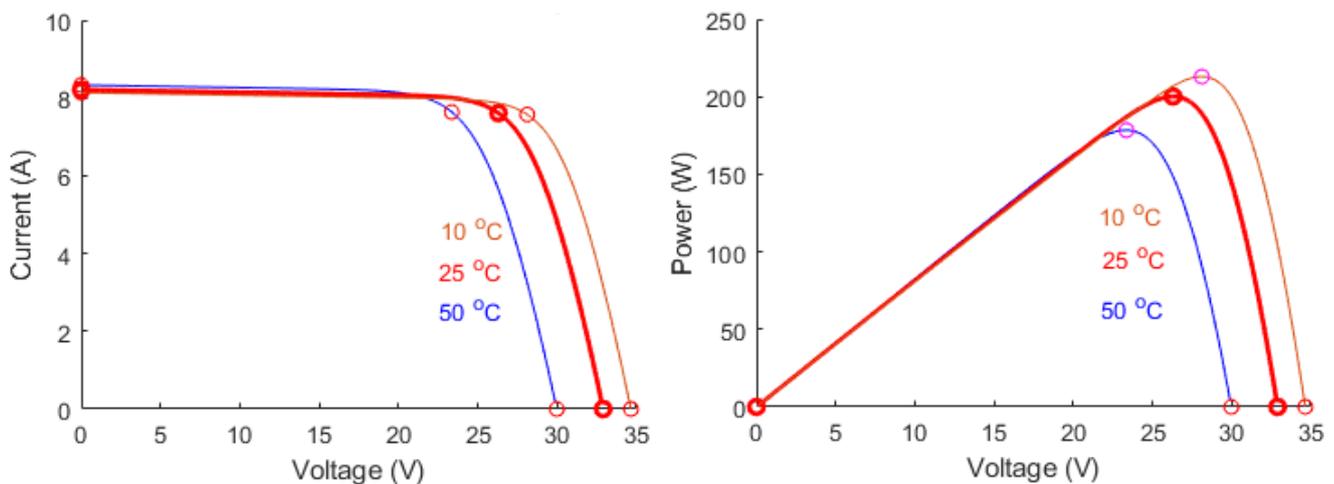
V <sub>cc</sub>	I <sub>cc</sub>	V <sub>max</sub>	I <sub>max</sub>	Puissance max	Nombre de photopile
32.9 (V)	8.21 (A)	26.3 (V)	7.61 (A)	200.143 (W)	54

## I.7. Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque

Afin d'étudier les caractéristiques du panneau choisi, nous avons observé l'influence de la température et l'irradiance sur le rendement en puissance du panneau et sur sa caractéristique I-V.

### I.7.1 Influence de la température sur les caractéristiques I-V

Afin d'étudier l'influence de la température sur le panneau on va effectuer un teste dans lequel on fait varier la température et on fixe l'irradiance à  $1000\text{W}/\text{m}^2$ , les résultats sont illustrés dans la (figure I.8) ci-dessous :

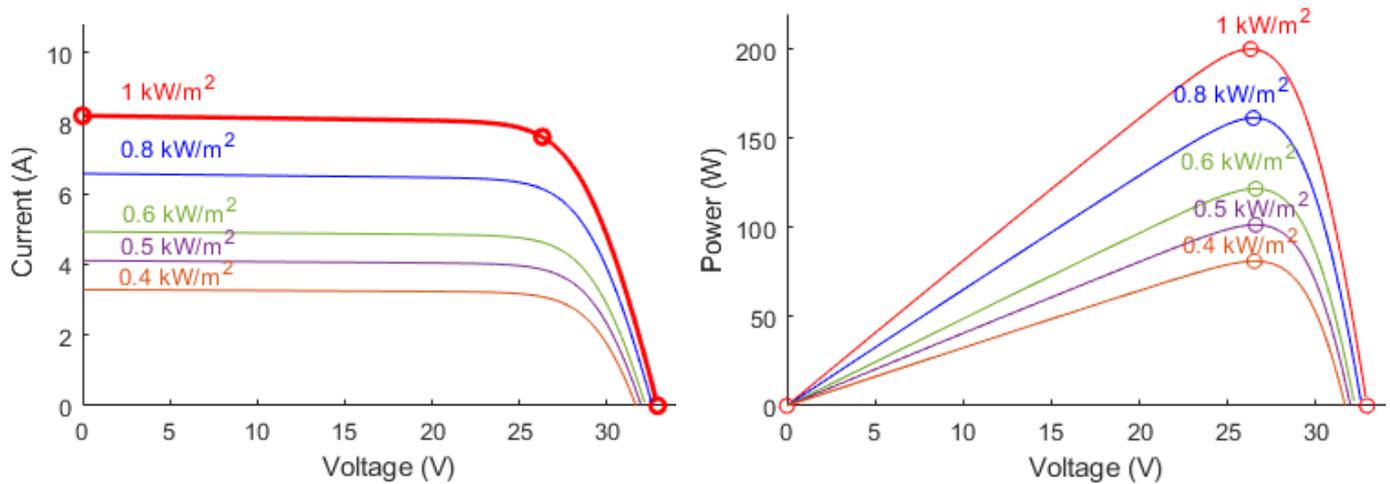


**Figure I.8:** L'influence de la température

Expérimentalement, on remarque que le courant de court-circuit varie peu avec la température tandis que la tension à vide est beaucoup plus influencée. La température a donc une influence non négligeable sur le rendement d'une photopile.

### I.7.2 Influence d'irradiance sur la caractéristique I-V

Tout comme le test précédent, ici on fait varier l'irradiance et on fixe la température à  $25^{\circ}\text{C}$  afin de souligner d'avantage l'influence de ce paramètre sur la performance du panneau. Les résultats obtenus sont la (figure I.9) ci-dessous :



**Figure I.9:** L'influence d'irradiance

On peut remarquer que le courant est directement proportionnel au rayonnement solaire, ce qui implique une dégradation de point de fonctionnement maximal du panneau. On peut aussi dire que la photopile peut fournir une tension correcte, même à faible éclairage.

## I.8. Rendement de la conversion PV

Le rapport entre la puissance maximale délivrée par la photopile et la puissance lumineuse incidente [13] :

$$P_{\max} = I_{\max} \cdot V_{\max} \quad ; \quad \eta = \frac{P_{\max}}{E \cdot S} \quad \text{I.2}$$

Tel que  $E$  : l'éclairement en  $W/m^2$  et  $S$  : est la surface du module photovoltaïque

## I.9. Facteur de forme

Le facteur de forme indique la qualité de la photopile, plus il s'approche de l'unité plus la photopile est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les photopiles performantes, et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites  $R_s$  et  $R_{sh}$ . Il est défini par [14]:

$$FF = \frac{P_{\max}}{I_{cc} \cdot V_{co}} \quad \text{I.3}$$

## **I.10. Conclusion**

Tout au long de ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'étude de la photopile d'un point de vue purement conceptuel. La modélisation de cette dernière nous a permis de voir ses différentes caractéristiques et les grandeurs affluant sur leur comportement. Nous avons vu que la température et l'irradiance sont des contraintes qu'on ne peut pas contrôler, elles sont considérées comme des perturbations qu'il faut prendre en considération.

L'obtention de la puissance maximale d'un générateur photovoltaïque revient principalement à synthétiser une loi de commande capable d'agir à temps réel vis-à-vis des changements de la température et de l'irradiance. Cette commande nécessite toutefois un convertisseur permettant un interfaçage du générateur photovoltaïque et de la charge. Cette interface sera le sujet du second chapitre.

# **Chapitre II: Techniques de Commande MPPT**

## II.1. Introduction

Le système PV peut être considéré comme dynamique car il convertit l'énergie lumineuse en énergie électrique en temps réel, pour faire fonctionner ce système de façon optimale, on utilise des techniques de commande spécifiques qui permettent l'extraction de la puissance maximale du générateur, ces dernières souvent désignées dans la littérature par : commandes MPPT pour « *Maximum Power Point Tracking* ». Toutefois ces techniques de commande nécessitent un étage d'adaptation entre le générateur PV et la charge qui est un convertisseur statique.

Dans ce chapitre nous allons présenter la structure du système étudié puis en suite nous aborderons le principe de ces techniques de commande MPPT en exposant les commandes les plus populaire organisé par familles tel que la commande Incrémental de conductance, la commande adaptative ...

## II.2. Étage d'adaptation – Convertisseur DC-DC

L'étage d'adaptation est en principe une interface électronique, dite aussi : convertisseur statique, qui se dresse entre le PV et la charge (Voir figure II.1) pour assurer à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance du PV vers la charge.

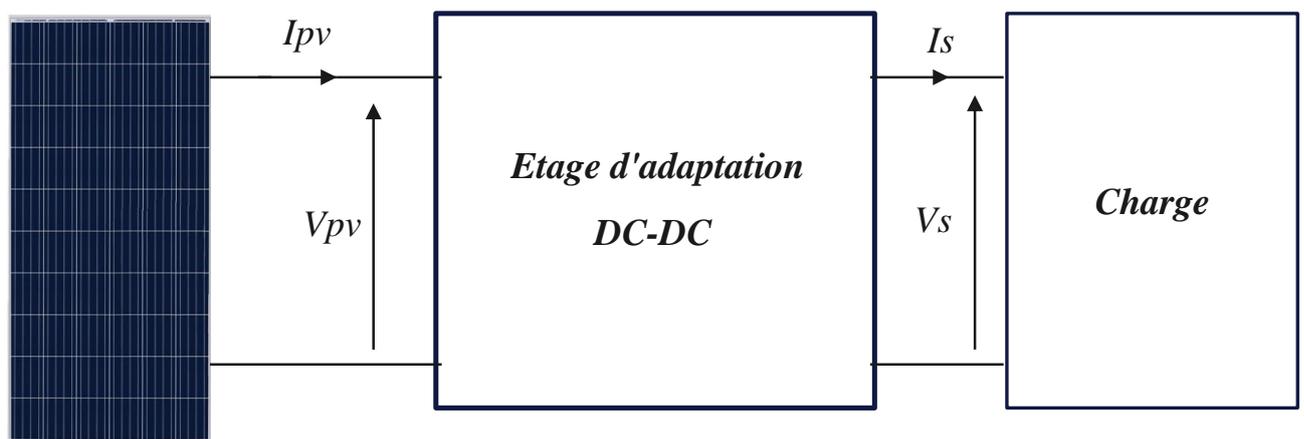
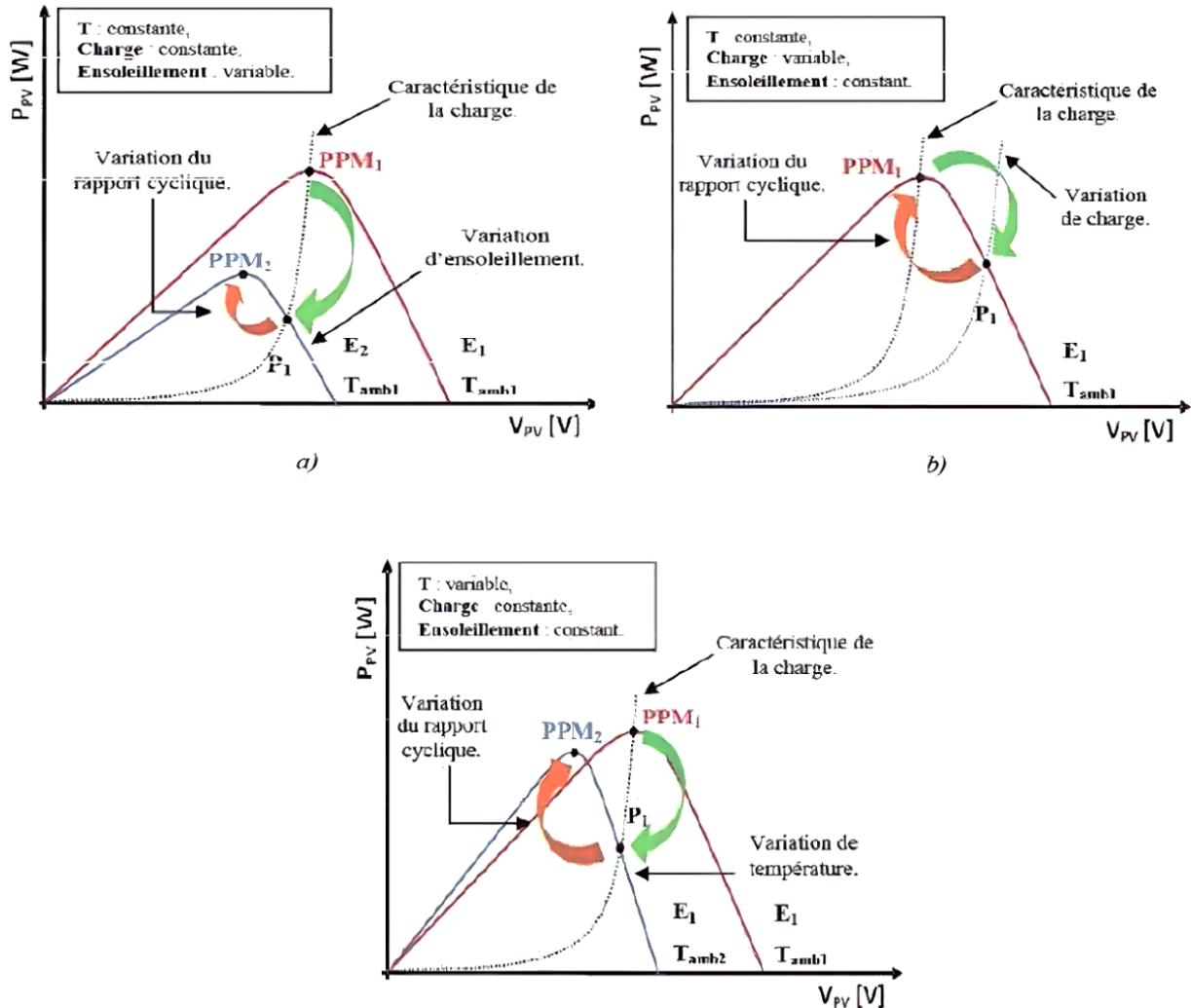


Figure II.1: Etage d'adaptation entre un PV et une charge

La commande du convertisseur est nécessaire pour piloter le convertisseur statique. En agissant sur le rapport cyclique (ouverture et fermeture de l'interrupteur) d'une manière autonome, elle assure un transfert maximal d'énergie quelque soient les changements qui

peuvent survenir. La (figure II.2) illustre les trois cas de perturbation possible lors du fonctionnement d'un système photovoltaïque, soit une variation d'ensoleillement, soit une variation de résistance de charge ou bien une variation de la température.



**Figure II.2:** Adaptation du rapport cyclique suivant : ensoleillement, température et charge

Pour notre travail, la charge est une simple résistance, et pour cela un simple convertisseur DC-DC peut facilement permettre cette adaptation. Dans la littérature, le convertisseur le plus fréquemment employé est le hacheur de type BOOST. Ce type d'hacheur est constitué d'éléments réactifs (Selfs, Capacités), qui dans le cas idéal, ne consomment aucune énergie. C'est pour cette raison qu'il est caractérisé par un grand rendement [10]. D'autre part, il permet d'augmenter la tension de la charge, ce qui conforme à nos attentes. La (figure II.3) suivante montre le circuit électrique de base de ce type de hacheur.

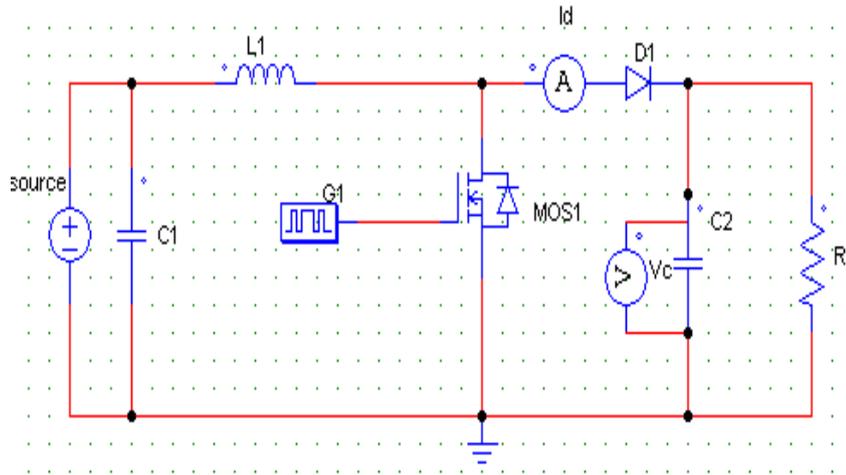


Figure II.3: Circuit électrique du BOOST

### II.2.1 Principe de fonctionnement du BOOST

Le circuit BOOST fonction en deux temps, dans le premier temps, l'interrupteur est dans l'état fermée, tandis que dans la seconde il est ouvert. Dans ce qui suit, nous allons analyser le fonctionnement de ce convertisseur sur une seule période de 0 à T.

#### Phase 1 : Charge (0 < t ≤ at)

A l'instant t=0, on ferme la Mosfet pendant une durée Ton=at.

$$V_{source} - V_L - V_{switch} = 0 \text{ avec } V_{switch} = 0 \text{ alors : } V_L = V_{source}$$

La diode est donc bloquée. On obtient le schéma équivalent illustré dans la (figure II.4) :

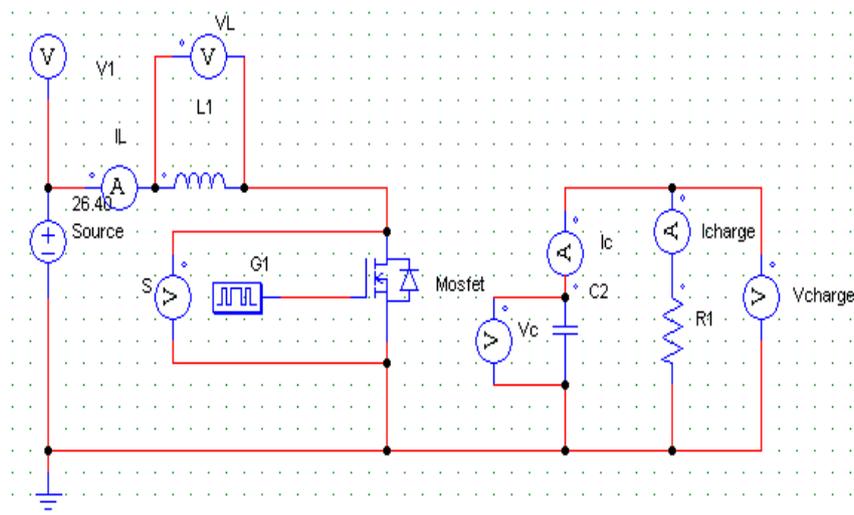


Figure II.4: phase de charge

De même, on obtient la tension aux bornes de l'inductance :

$$V_L = V_{source} = L \frac{dI_L}{dt}$$

En résolvant cette équation différentielle on obtient :

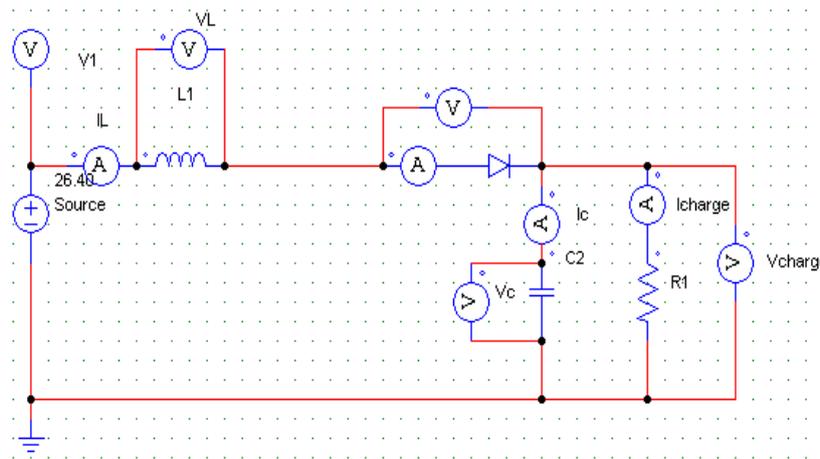
A l'instant  $t=0$  :  $I_L(0) = I_{Lmin}$

A l'instant  $t=\alpha T$  :  $I_{Lmax} = I_{Lmin} + \frac{V_{source}}{L} \alpha T$

- Courant de diode :  $I_d = 0$
- Courant du condensateur :  $I_C = -I_R$

**Phase 2 : Décharge ( $\alpha T < t \leq T$ )**

A l'instant  $t= \alpha T$ , on ouvre l'interrupteur pendant une durée de  $T_{off} = (1 - \alpha)T$ . La diode est donc passante. On obtient le schéma équivalent suivant :



**Figure II.5:**phase de décharge

$V_{source} - V_L - V_{charge} = 0$  avec :  $V_L = V_{source} - V_{charge} < 0$

En résolvant cette équation différentielle on obtient :

A l'instant  $t= \alpha T$  :  $I_L(t) = I_{Lmax} - \frac{V_{charge}-V_{source}}{L} (t - \alpha T)$

A l'instant  $t=T$  :  $I_{Lmin} = I_{Lmax} - \frac{V_{charge}-V_{source}}{L} (1 - \alpha)T$

- Courant de diode :  $I_d = (1 - \alpha)I_L$
- Courant du condensateur :  $I_c = I_L - I_R$
- Expression de  $V_{charge}$  et  $I_{charge}$  :

$$V_{charge} = \frac{V_{source}}{1 - \alpha} \text{ et } I_{charge} = (1 - \alpha)I_{source}$$

- La forme d'onde des principaux signaux :

Ces formes d'ondes sont données dans les figures : (figure II.6) et (figure II.7). Elles expriment les valeurs des courants et des tensions qui traversent la diode, le condensateur et l'inductance. De plus, elle ne permet de déduire les contraintes maximales en tension  $\Delta V_s$  et courant  $\Delta I_L$  sur les interrupteurs. Ces relations seront utilisées lors du dimensionnement des différents composants de la structure.

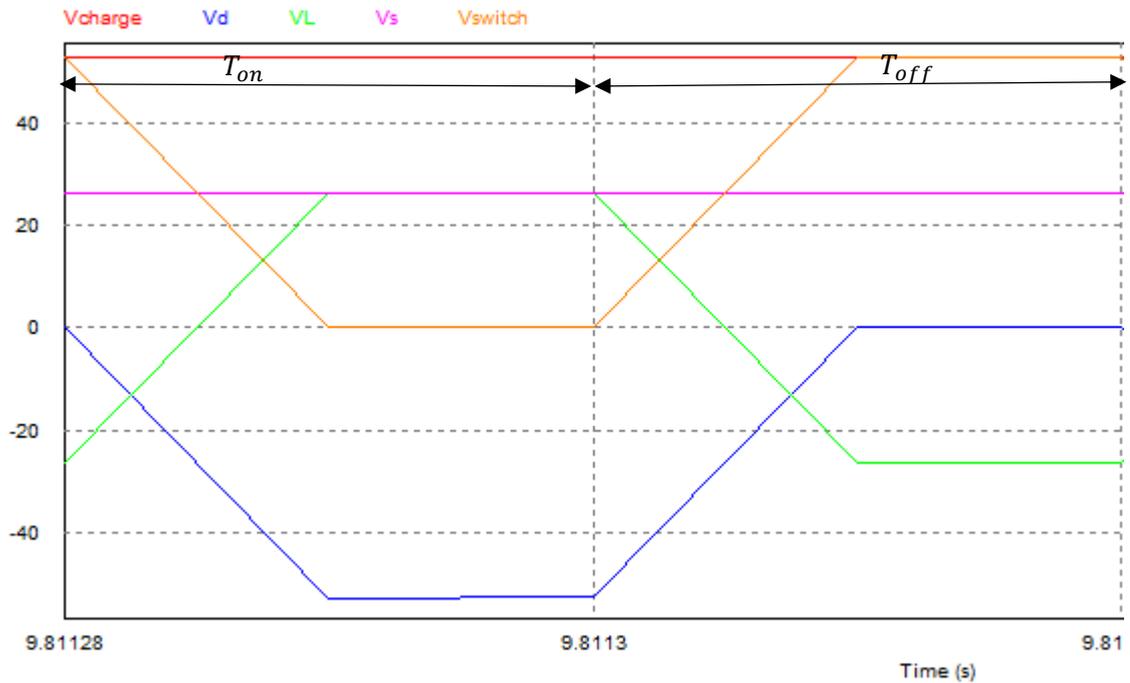


Figure II.6: Allure des tensions dans la phase de charge et de décharge

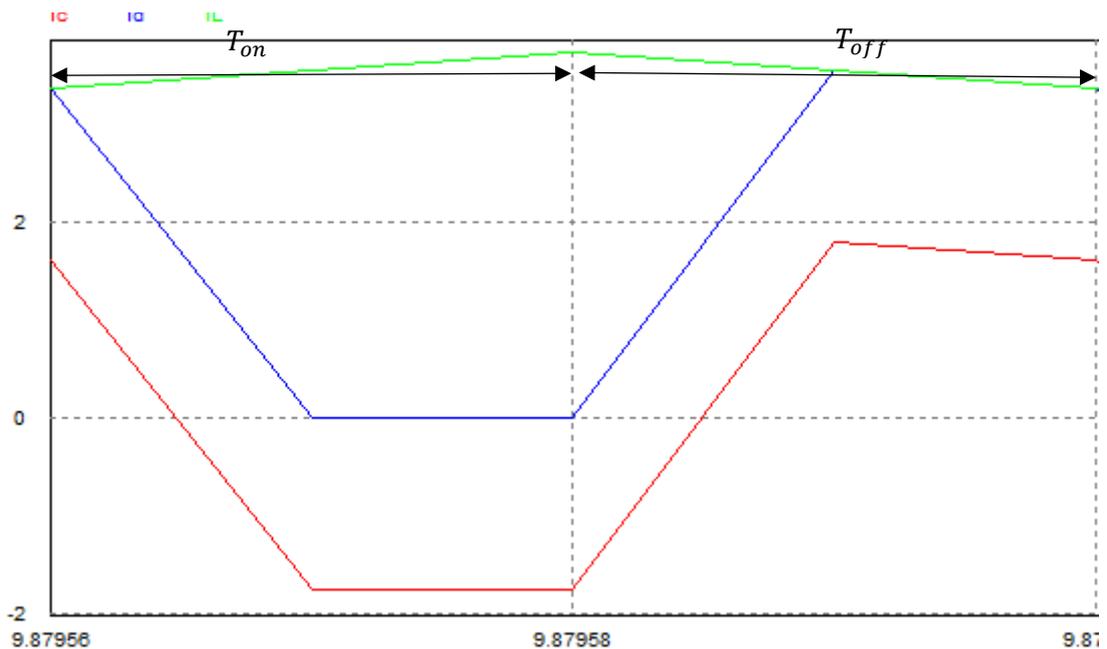
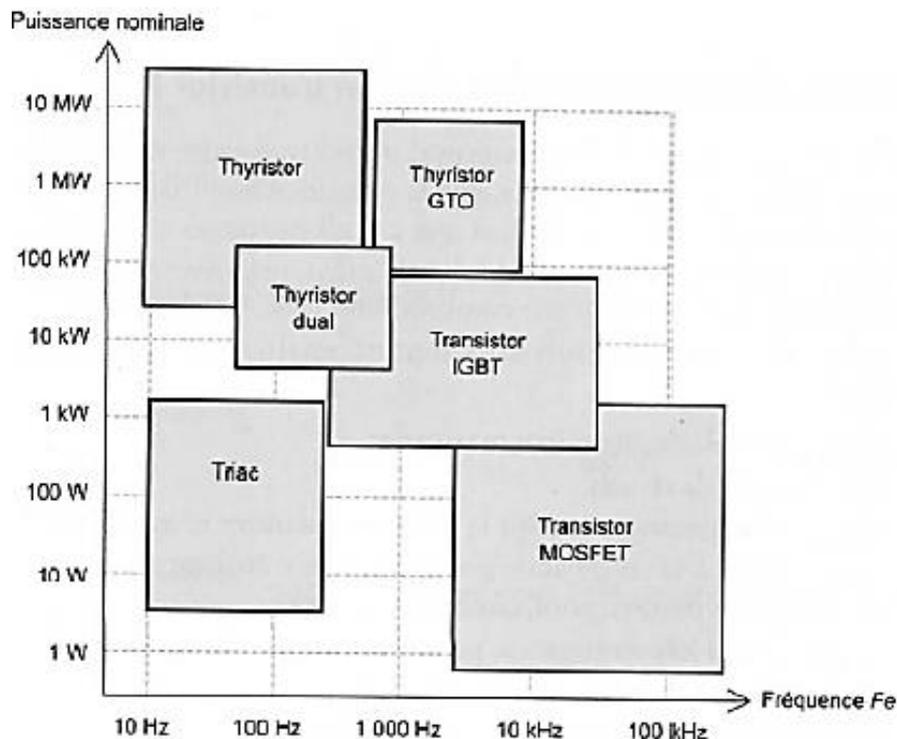


Figure II.7: Allure des courants dans la phase de charge et de décharge

## II.2.2 Choix et dimensionnement des composants d'un BOOST

- a) Choix de la fréquence du hachage :  
La fréquence du hachage désigne la vitesse de fermeture et d'ouverture de l'interrupteur. Donc le choix de la fréquence est fait en telle sorte que les pertes au niveau du hachage soient minimales.
- b) Choix de l'interrupteur (Transistor à effet de champs) :  
La figure II.8 illustre le choix de la Mosfet qui est lié au choix de la fréquence du hachage et de la puissance de panneau au condition STC.



**Figure II.8:** Diagramme de puissance – fréquence des semi-conducteurs

- c) La diode : La diode utilisée est une diode de redressement qui empêche le courant de s'inverser vers la source.
- d) Choix des valeurs de l'inductance et de la capacité :

➤ Soit  $\Delta I_L$  : l'ondulation de courant d'entrée dans l'inductance :

$$\Delta I_L = I_{Lmax} - I_{Lmin} = \frac{V_{pv}}{Lf} \alpha$$

Pour que  $\Delta I_L$  diminue il faut que soit : augmenter la valeur de l'inductance soit augmenter la fréquence.

➤ Soit  $\Delta V_s$  : l'ondulation de tension de sortie dans le condensateur :

$$\Delta V_s = \frac{V_s \alpha}{RCf}$$

pour diminuer l'ondulation  $\Delta V_s$  soit on augmente la valeur de la capacité soit on augmente la fréquence.

on augmente la fréquence.

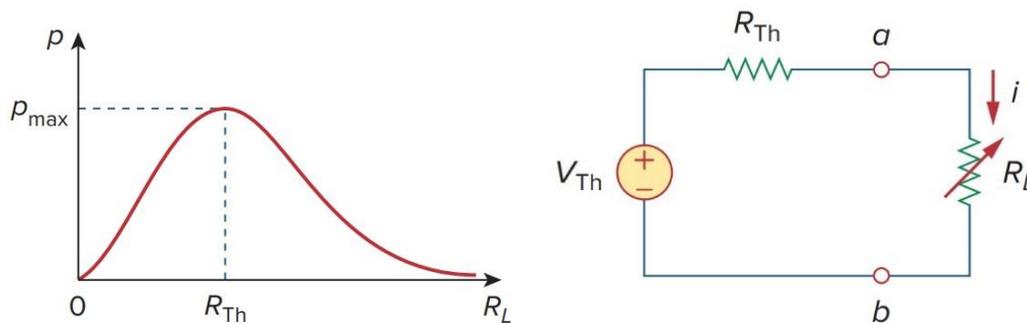
Le tableau II.1 expose les valeurs calculées pour la fréquence du hachage et les deux éléments passifs de hacheur :

**Tableau II.1:** Valeurs de de la fréquence, Inductance et condensateur

	Équation	Normes	Valeurs
Fréquence	$f = \frac{1}{T}$	Gamme audible : (200HZ jusqu'a 20KHZ).	25 KHZ
Capacité de sortie	$C \geq \frac{V_s \alpha}{Rf \Delta V_s}$	$\Delta V_s = 20\%$	$C = 157 \mu F$
Inductance	$L \geq \frac{\alpha V_{pv}}{\Delta I_{L,f}}$	$\Delta I_L = 5\%$	$L = 1.5mH$

### II.3. Principe des commandes MPPT

Le problème de la poursuite du point de puissance maximale peut être vu comme étant la recherche de la meilleure valeur de la commande pour que la charge vue par le générateur PV soit pratiquement équivalente à sa résistance interne. La (figue II.9) ci-dessous illustre plus clairement ce principe. Dans le cas de connexion directe entre le PV et la charge, on peut facilement constater que la puissance maximale est obtenue lorsque la charge est égale à la résistance interne du PV.



**Figure II.9:**Générateur de Thévenin avec graphe puissance en fonction de la charge connectée

$$\text{On a: } I = \frac{V_{th}}{R_{th}+R} \Rightarrow P = R \left( \frac{V_{th}}{R_{th}+R} \right)^2 ;$$

$$R_{th} - R = 0 \Rightarrow R_{th} = R$$

$$\text{Et : } I_{max} = \frac{V_{th}}{2.R} \Rightarrow P_{max} = \frac{V_{th}^2}{4.R} .$$

En se basant sur ce raisonnement on peut alors dire que le principe des commandes MPPT est d'agir sur le rapport cyclique afin d'optimiser le transfert d'énergie électrique fournit par le panneau en adaptant la valeur de l'impédance de la charge vue par le panneau.

## II.4. Techniques de commande MPPT

Dans la littérature on peut trouver plusieurs techniques de commandes MPPT. Ces dernières peuvent être classée de différentes façons et selon différents critères aussi.

### II.4.1 Commande Classique

Ce type de commande est le plus connus et le plus utilisé pour la recherche du PPM. Il existe dans la littérature, plusieurs commandes de ce genre comme : Commande par approche du courant constant [13], commande Hill Climbing [15], Commande Incrémentation de la conductance [10], Méthode basé sur la mesure de la tension en circuit ouvert [10], Commande P&O qui est décrite plus en détail à le chapitre III [10].

### II.4.2 Commande Avancée

Ce sont des techniques à base d'un modèle, le contrôleur classique avec des paramètres fixes (hors-ligne) n'était pas capable d'assurer le bon fonctionnement dans le cas de changement des conditions environnemental inconnus. Parmi les commandes existantes dans la littérature : Commande adaptative [16], Commande prédictive [16].

Le problème qui se pose réellement c'est au niveau de l'étage d'adaptation car l'équation caractéristique ne peut pas présenter la dynamique réelle du système (moyenne dynamique).

La raison principale qui nous pousse à utiliser les techniques de l'intelligence artificielle c'est qu'elle fait référence à l'utilisation de techniques de contrôle plus sophistiquées pour l'exploitation des caractéristiques tels que la généralisation et l'apprentissage qui n'existe pas dans les commandes classiques qui sont applicables pour des problèmes bien particulier.

### II.4.3 Commande Intelligente

Actuellement il existe des méthodes basées sur les techniques de l'intelligences artificiels. Il existe dans la littérature trois grandes techniques, qui peuvent être combinée entre eux, à savoir : La logique floue qui est décrite plus en détail dans la section {3 du chapitre III}, les réseaux de neurones artificielle [17], et les métas heuristiques [18].

#### II.4.3.a Grey Wolf Optimisation

Une technique d'optimisation qui appartient à la famille des méta heuristique, proposés par Mirjalili en 2014 [19]. Est une intelligence d'essaim qui imite la pyramide de leadership et le mécanisme de chasse des loups gris dans la nature utilisant une population de solutions potentielle, chaque solution est appelée : loup.

La différence entre un méta heuristique et une heuristique classique est due sa grande robustesse qui possède la capacité d'éviter les minimums locaux pour effectuer une recherche globale.

L'algorithme des loups gris n'utilise pas d'opérateur complexe et n'a pas besoin de plusieurs paramètres à initialisés, ce qui constitue une différence significative par rapport aux algorithmes PSO et les algorithmes génétiques...

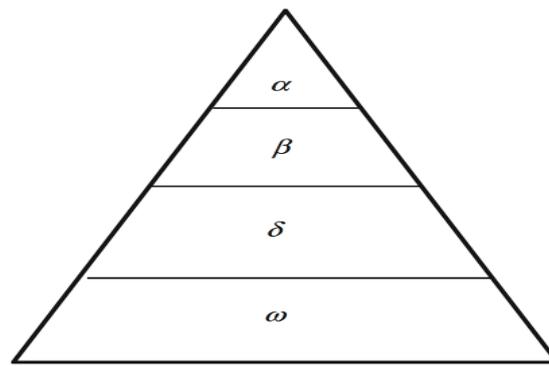
Alpha ( $\alpha$ ) est considéré comme la solution la plus adaptée lors de la conception du GWO. Beta ( $\beta$ ) et delta ( $\delta$ ) sont la deuxième et troisième meilleure solution, et les loups restants sont considérés comme oméga ( $\omega$ ). Les loups gris chassent les proies en trois étapes : Rechercher la proie, proie encerclée, attaquer la proie.

1) L'optimisation est guidée par :

1<sup>ère</sup> Meilleur solution  $\alpha$

2<sup>ème</sup> Meilleur solution  $\beta$

3<sup>ème</sup> Meilleur solution  $\delta$



**Figure II.10:** hiérarchie sociale des loups gris

Par une simple formule mathématique, l'algorithme GWO déplace ses individus à travers tout l'espace de recherche en ajustant successivement leurs positions. Cette équation est référée comme l'équation de mise à jour :

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}_p(t)| \quad (1)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (2)$$

Où « t » représente l'itération en cours,  $\vec{D}$ ,  $\vec{A}$  et  $\vec{C}$  représentent les vecteurs de coefficients,  $\vec{X}_p$  le vecteur de position de la proie et  $\vec{X}$  indique le vecteur de position du loup gris. Les vecteurs  $\vec{A}$  et  $\vec{C}$  présente la caractéristique l'exploration et d'exploitation si :  $\|A\| > 1$  alors les loups quitte leurs positions actuelles et pour explorer la surface de recherche, et dans le cas ou  $\|A\| < 1$ , alors les loups s'approche de la proie pour lancer l'exploitation. Le vecteur  $\vec{C}$  fournit une recherche globale pour éviter les optima locaux, ces deux coefficients sont calculés comme suit :

$$\vec{A} = 2 \cdot \vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (3)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (4)$$

Les composantes  $r_1$  et  $r_2$  sont des vecteurs générés aléatoirement compris entre 0 et 1.

L'algorithme P&O est constitué principalement des étapes suivantes :

- Loup i : Toutes les solutions possibles
- Population N : Groupe de tous les loups
- Espace de recherche [Ub, Lb] : Toutes les solutions possibles du problème, sont les limites maximales et minimale respectivement dans l'espace de recherche.
- Max\_itération : Nombres d'itérations maximal.

La composante  $\vec{a}$  est une équation choisit par l'utilisateur, décroît linéairement de 0 à 2 à une suite d'itération. La (figure II.11) illustre l'organigramme de l'algorithme GWO.

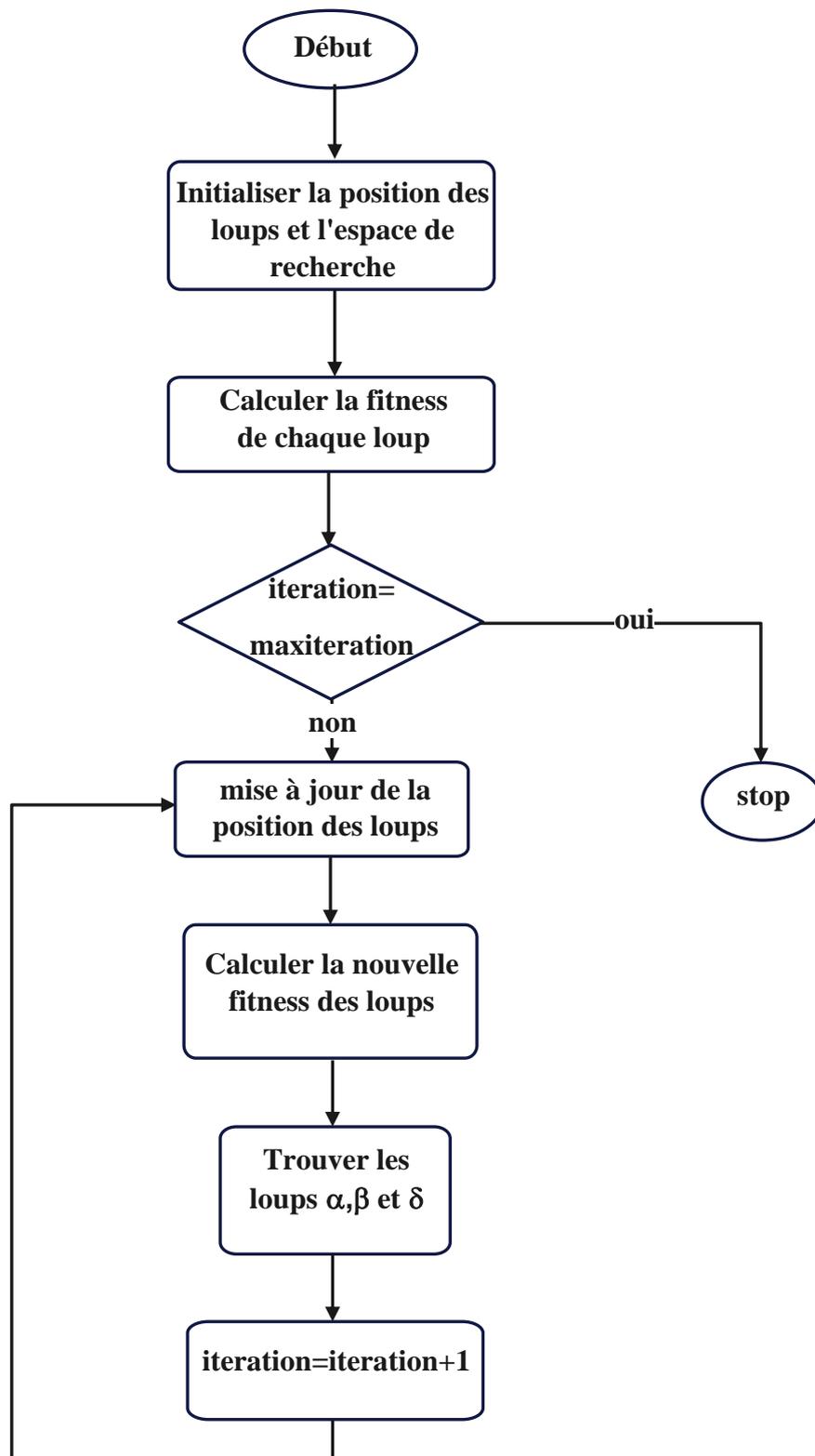


Figure II.11: Organigramme de l'algorithme GWO [23]

## II.5. Critère d'évaluation d'une commande MPPT

Elle exprime la position du point de fonctionnement du système par rapport au PPM, pratiquement il s'agit de la commande utilisée au niveau du convertisseur, ce sont des aspects essentiels lorsqu'il s'agit de concevoir un système compétitif.

Le rendement du point de fonctionnement fait référence à la capacité de fonctionnement du système, en maximisant son utilisation des ressources disponibles. La simplicité et le coût sont des facteurs clés qui déterminent l'accessibilité et la rentabilité d'un système, en permettant une mise en œuvre plus facile et moins coûteuse. La réponse dynamique se réfère à la capacité d'un système à s'adapter rapidement aux changements de charge ou de conditions climatiques, assurant une réaction stable. Enfin, la flexibilité permet d'offrir un système d'être polyvalent et compétitif [20].

## II.6. Conclusion

Ce Chapitre vise à souligner les aspects essentiels de la commande d'un générateur photovoltaïque.

Tout au long de ce chapitre, nous nous sommes intéressés à l'étude d'un dispositif électronique utilisé comme étage d'adaptation, il s'agit du convertisseur statique de type hacheur BOOST.

Par ailleurs, ce chapitre englobe une classification des principales commandes MPPT présentes dans la littérature, les critères de qualité de cette commande, ainsi que les différentes techniques intelligentes nouvellement introduites dans la commande MPPT.

Maintenant que le problème MPPT est présenté ainsi le choix du convertisseur à utiliser. Le chapitre suivant sera consacré à la conception du générateur photovoltaïque, ainsi qu'au hacheur BOOST. Nous allons ensuite exposer les deux commandes utilisées dans cette étude nommées P&O et flou.

Ensuite, nous aborderons la conception d'un contrôleur flou optimisé par l'algorithme du *GWO*, et procéderons à une comparaison de l'efficacité de deux approches : la méthode classique P&O et la commande intelligente pour la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) qui est l'objectif principal de cette étude.

# **Chapitre III:**

# **Simulation, résultats**

# **et discussion**



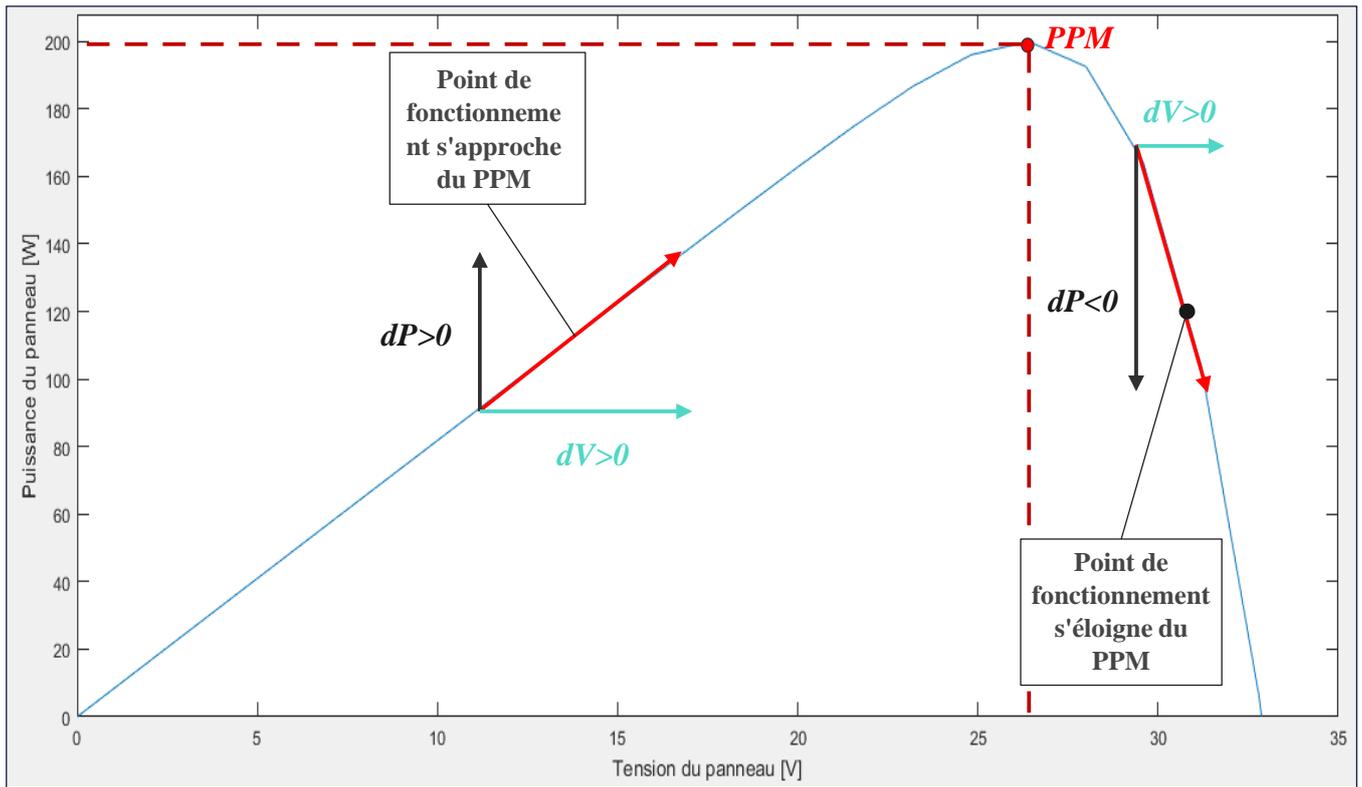


Figure III.2: Poursuite du point de puissance maximale

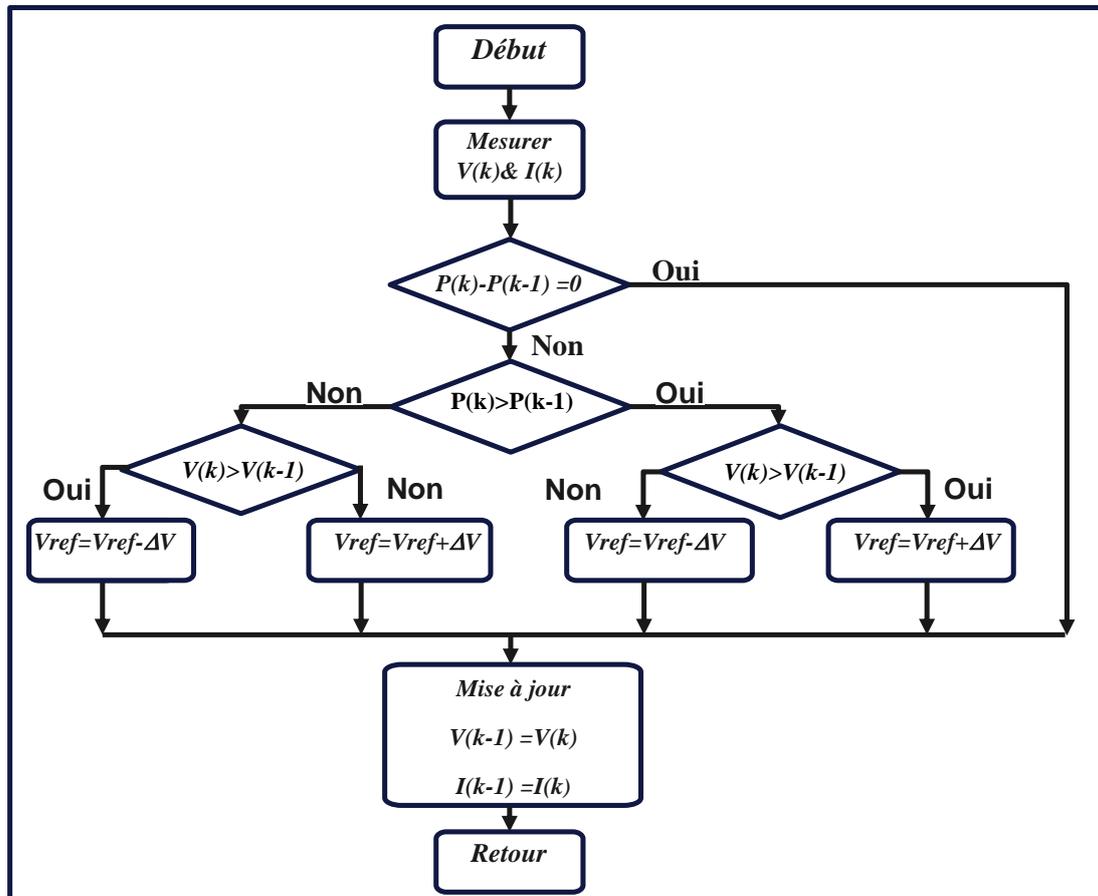
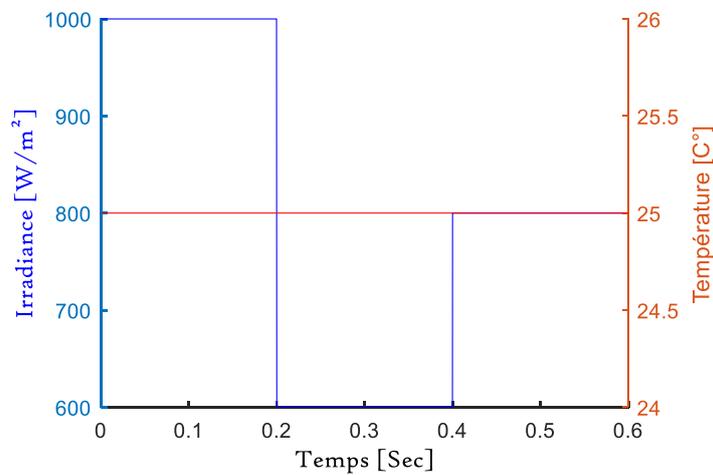


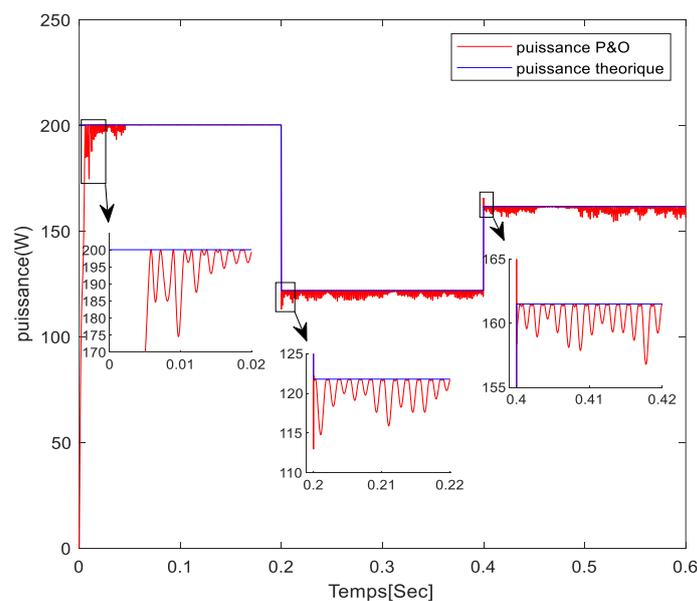
Figure III.3: Algorithme P&O [10]

Cette méthode nécessite alors de connaître le courant et la tension du module photovoltaïque pour calculer sa puissance à chaque instant. Ces deux mesures lui permettent de savoir si on se rapproche ou on s'éloigne du PPM. L'utilisation de convertisseur analogique numérique permet de faire l'acquisition de ces grandeurs qui seront ensuite utilisées dans le programme, réalisant la commande et le signal de contrôle. L'organigramme de cette méthode est illustré dans la (figure III.3) ci-dessus.

Pour faire une étude des performances de la commande P&O on a effectué un test sous une température fixe à 25°C avec irradiance qui diminue brusquement de  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  à  $G = 600 \text{ W/m}^2$  et qui augmente jusqu'à  $G = 800 \text{ W/m}^2$  comme illustré dans la (figure III.4). Les résultats obtenus sont donnés par la (figure III.5).



**Figure III.4:** Profile de l'irradiance et de température



**Figure III.5:** Variations de la puissance en fonction du temps

A partir de la (figure III.5), on peut constater que la commande P&O présente quelques inconvénients qui se traduisent principalement par les oscillations autour de la puissance maximale en régime permanent. Cela peut être expliqué par la dépendance de l'algorithme aux conditions initiales (tension de référence initiale et le pas de variation).

### III.3. Logique floue

Le principe de la commande floue est basé sur la répartition du problème en un ensemble de classe, dans laquelle chaque une de cette dernière est associée à une décision. Cette logique apprécie les variables d'entrée et de sortie de façon approximative, et édicte un ensemble de règles permettant de déterminer les sorties en fonction des entrées (Voir [21] [22]). Tout système basé sur cette logique floue peut se ramener au schéma synoptique de la (figure III.6).

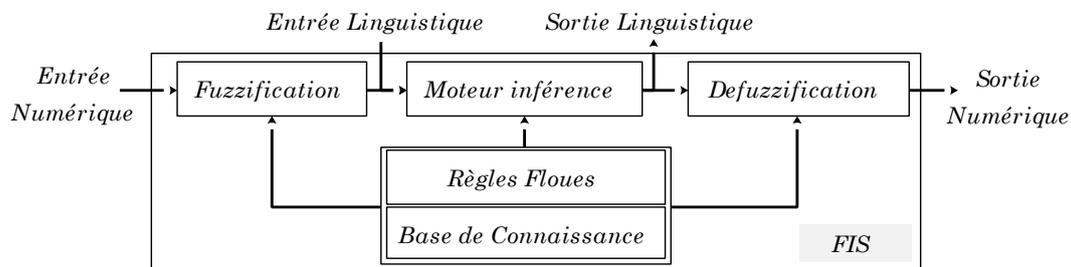


Figure III.6: Architecture interne d'un système flou [22]

#### III.3.1 Conception du contrôleur Flou MPPT

Le contrôleur flou destiné à la commande MPPT utilise deux entrées : l'erreur  $E(k)$  et la variation de l'erreur  $\Delta E(k)$ . L'erreur  $E(k)$ , formulé par l'équation III.1 indique la position du point de fonctionnement par rapport au PPM. Tandis que la variation d'erreur  $\Delta E(k)$  (équation III.2) montre la direction de l'évolution du point de fonctionnement par rapport au PPM.

$$E(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)} \quad \text{III.1}$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k-1) \quad \text{III.2}$$

Avec :  $P_{pv}$  et  $V_{pv}$  sont respectivement la puissance et la tension du générateur photovoltaïque.

Le contrôleur flou génère un signal de commande  $u(k)$ . Chacune des lignes d'entrée et de sortie du contrôleur est associée à un facteur d'échelle nommée respectivement  $G_{E(k)}$  pour l'erreur,  $G_{\Delta E(k)}$  pour la variation de l'erreur et  $G_{u(k)}$  pour le signal de commande. Ainsi le signal de commande du convertisseur est donné comme suit :

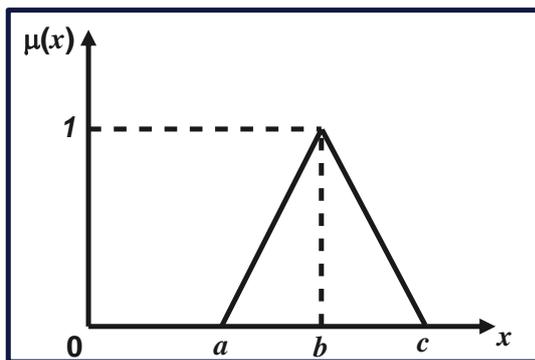
$$u(k) = G_{u(k)} \cdot \Delta u(k) \quad \text{III.3}$$

### III.3.2 Choix de la fonction d'appartenance

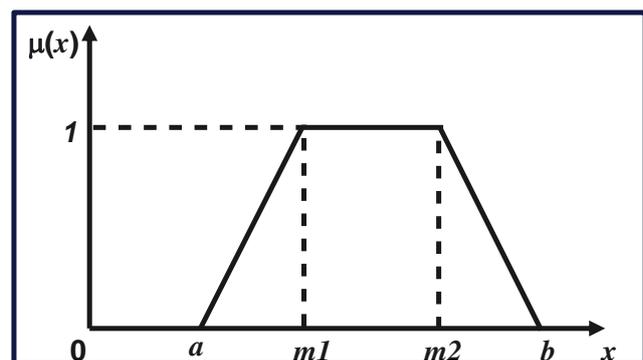
Selon le type du problème et le type des données à traiter, la forme de la fonction d'appartenance peut être choisie. Dans les problèmes de commande, il est plus intéressant d'utiliser la fonction triangulaire en raison de sa formule simple et de son efficacité. La fonction triangulaire, illustrée par la (figure III.7-a), peut être définie par trois paramètres  $\{a, b, c\}$  comme donné par l'équation III.4. La fonction qui se rapproche le plus à la fonction triangulaire et la fonction trapézoïdale (figure III.7-b), cette dernière est définie par quatre paramètres  $\{a, m1, m2, d\}$  comme formulée dans l'équation III.5.

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}, 0\right), 0\right) \quad \text{III.4}$$

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{m_1-a}, 1, \frac{b-x}{b-m_2}, 0\right), 0\right) \quad \text{III.5}$$



(a)



(b)

Figure III.7: Fonction d'appartenance triangulaire (a) et trapézoïdale (b)

### III.3.3 Table de décision

La combinaison de deux fonctions d'appartenance chacune associée à une entrée, permet de formuler la première partie de la règle floue, la prémisse. Cette dernière est associée à une fonction de la partition de sortie, conclusion, pour formuler une règle floue. En appliquant le même principe à toutes les combinaisons on obtient la table des règles floues.

Pour notre contrôleur flou, nous avons réalisé des partitions en cinq termes pour les entrées et la sortie : NG : Négatif grand. NM : Négatif moyen. ZR : Zéro. PM : Positif moyen. PG : Positif grand, ce qui correspond une table comportant 25 règles floues. Comme illustré dans le tableau III.1 ci-après :

**Tableau III.1:** Base de règles du contrôleur flou MPPT

		$\Delta e(t)$				
		NG	NM	ZR	PM	PG
$e(t)$	$u(t)$	NG	NM	ZR	PM	PG
	NG	ZR	ZR	PG	PG	PG
	NM	ZR	ZR	PM	PM	PM
	ZR	PM	ZR	ZR	ZR	NM
	PM	NM	NM	NM	ZR	ZR
	PG	NG	NG	NG	ZR	ZR

Cette table est interprétée de la manière suivante, la ligne et la colonne forme les composantes de la prémisse, tandis que l'intersection des deux donne la conclusion.

*E is NG and  $\Delta E$  is ZR then  $\Delta D$  is NG*

Dans ce travail, le contrôleur flou est de nature linguistique, de type Mamdani. Le tableau III.2 illustre les paramètres de son moteur d'inférence ainsi que la méthode de défuzzification adoptée.

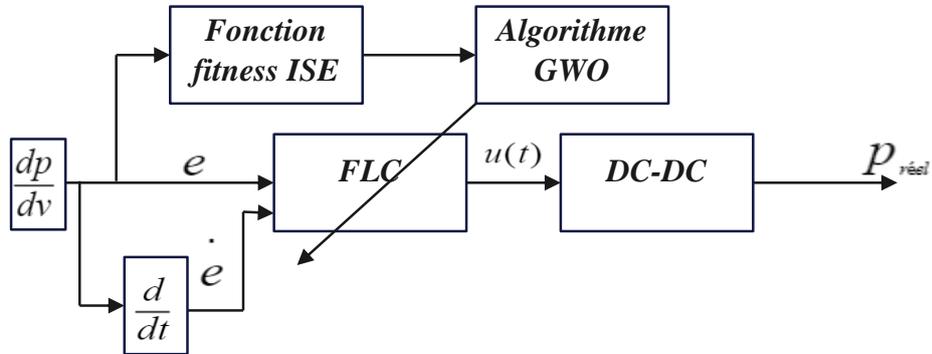
**Tableau III.2:** Moteur d'inférence flou

Système à inférence flou de type	Mamdani
Opérateur (And)	Minimum
Opérateur (OR)	Maximum
Opérateur (Implication)	Minimum
Opérateur (Agrégation)	Maximum
Opérateur (Défuzzification)	Centre de gravité

L'ajustement des paramètres des fonctions d'appartenance est vraiment difficile à faire manuellement, et pour palier à cette complication, nous allons employer l'algorithme GWO pour optimiser les partitions des entrées et de la sortie.

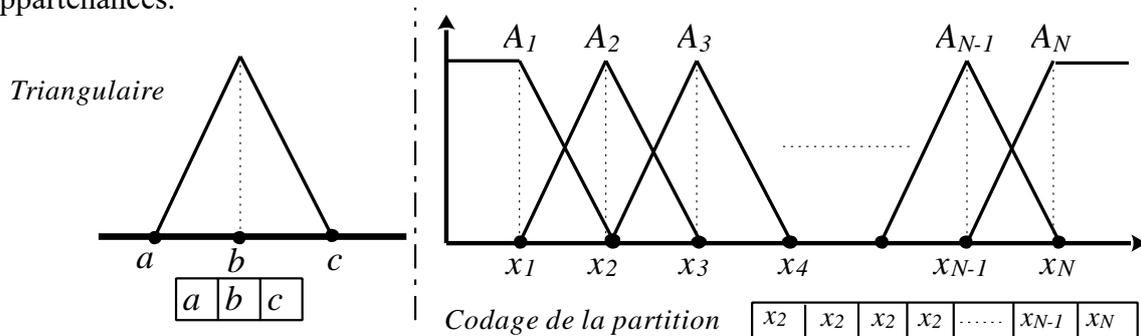
### III.4.Optimisation du Contrôleur flou par GWO algorithme

La figure III.8 illustre la stratégie de cette approche d'optimisation du contrôleur flou avec l'algorithme GWO.



**Figure III.8:** Approche d'optimisation d'une commande MPPT floue

Notre objectif c'est d'utiliser cet algorithme évolutionnaire afin d'optimiser les paramètres des fonctions d'appartenance. L'idée c'est de faire partager deux paramètres entre les fonctions d'appartenance afin de réduire leur nombre initial. Sans cette approche, et considérant cinq fonctions triangulaires par partition, cela donne un total de 45 paramètres, par contre avec cette stratégie de partage de paramètre leur nombre totale est réduit à juste. 15 soit un tiers du nombre initial [22]. La (figure III.9) montre le partage des paramètres des fonctions d'appartenances.



**Figure III.9:** Structure et codage des Fonction d'appartenances [22]

L'ensemble des paramètres optimisés formant la structure d'un individu au sein de l'algorithme GWO est composer des fonctions d'apparences des entrées-sortie en plus des facteurs d'échèles. Cette structure est illustrée dans la (figure III.10) ci-dessous.

$x_1$ $x_2$ ... $x_{N1}$	$x_1$ $x_2$ ... $x_{N2}$	$x_1$ $x_2$ ... $x_{N3}$	$G_{e(t)}$	$G_{\Delta e(t)}$	$G_{u(t)}$
Partition de $e(t)$	Partition de $\Delta e(t)$	Partition de $u(t)$	Facteurs d'échelle		

**Figure III.10:** Structure des solutions du GWO

### III.4.1 Fonction objective

L'évaluation du score de chaque position à chaque itération, nous permet de distinguer entre les différentes partitions existantes dans la population des solutions manipulées par le GWO. Ce score est formulé de sorte à améliorer le temps de réponse et réduire les fluctuations de la puissance autour du PPM. Pour cela nous avons utilisé le critère ISE (*Intégrale du carré de l'erreur*) à minimiser donné par l'équation III.6 :

$$ISE = \sum_{k=1}^N (P_{th} - P_{pv})^2 \quad \text{III.6}$$

Avec  $P_{th}$  et  $P_{pv}$ : C'est la puissance théorique, et la puissance générée par le PV respectivement.

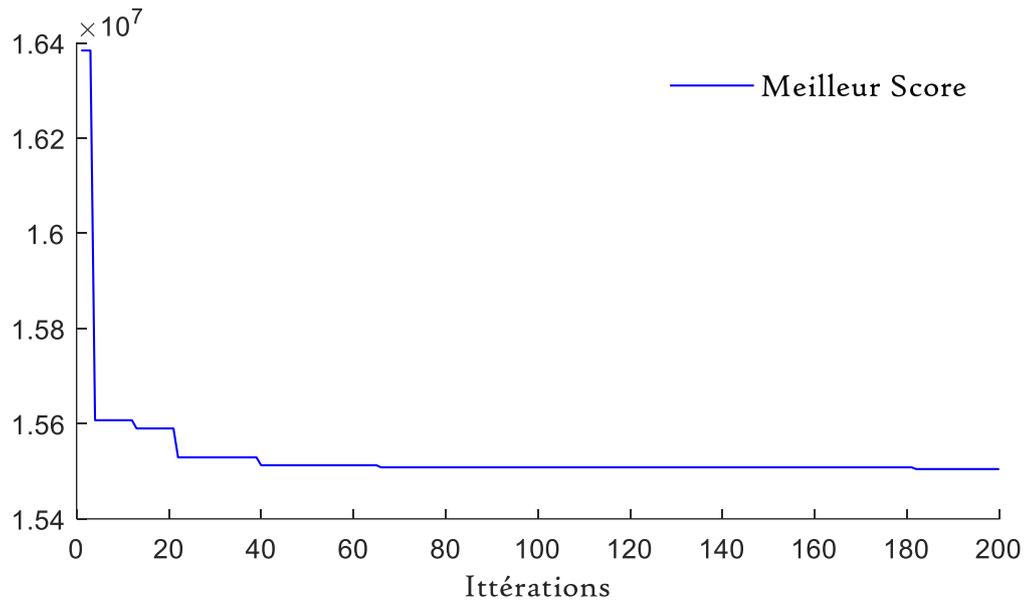
Pour l'optimisation de ce contrôleur flou, nous avons utilisé le même système PV présentée en (figure III.1) avec le même profil pour l'irradiance et la température. Les paramètres du GWO ont été ajustés comme indiqué dans le tableau III.3.

**Tableau III.3:** Paramètres du GWO

Valeur	Paramètre
Taille de la population	12
Maximum d'itération	200
Limites Espace de recherche	[0, 1]
Dimension de l'espace de recherche	18
a	Décroissance linéaire de 2 à 0

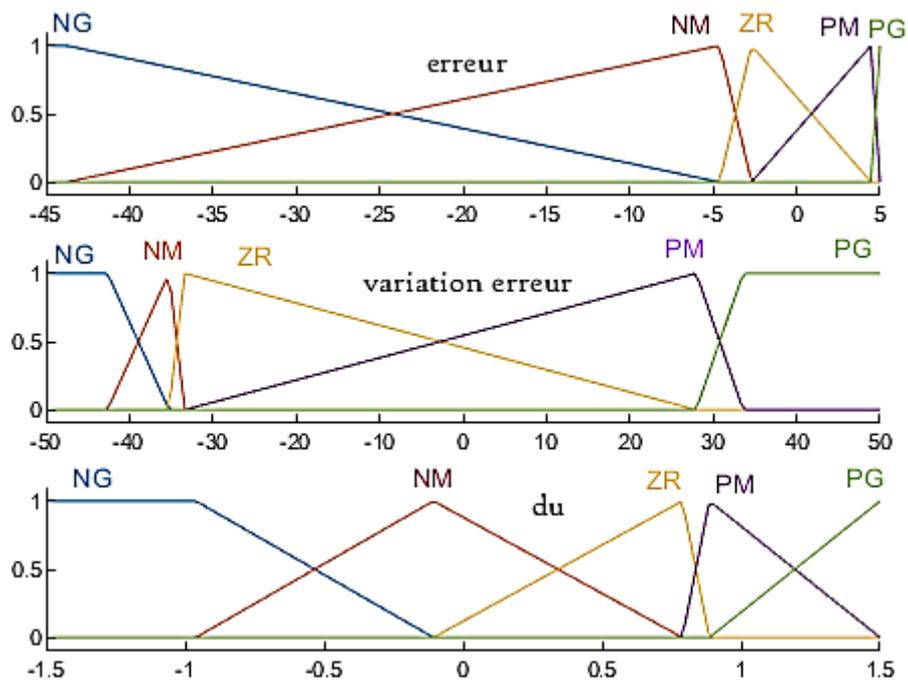
### III.4.2 Résultats de l'optimisation

Après l'exécution de l'algorithme GWO, nous avons obtenu les résultats suivants, la (figure III.11) illustre l'évolution du score de la meilleure position des Loups. On remarque une diminution rapide durant la première itération correspond à la recherche globale et puis une diminution très petite reflétant la recherche locale.



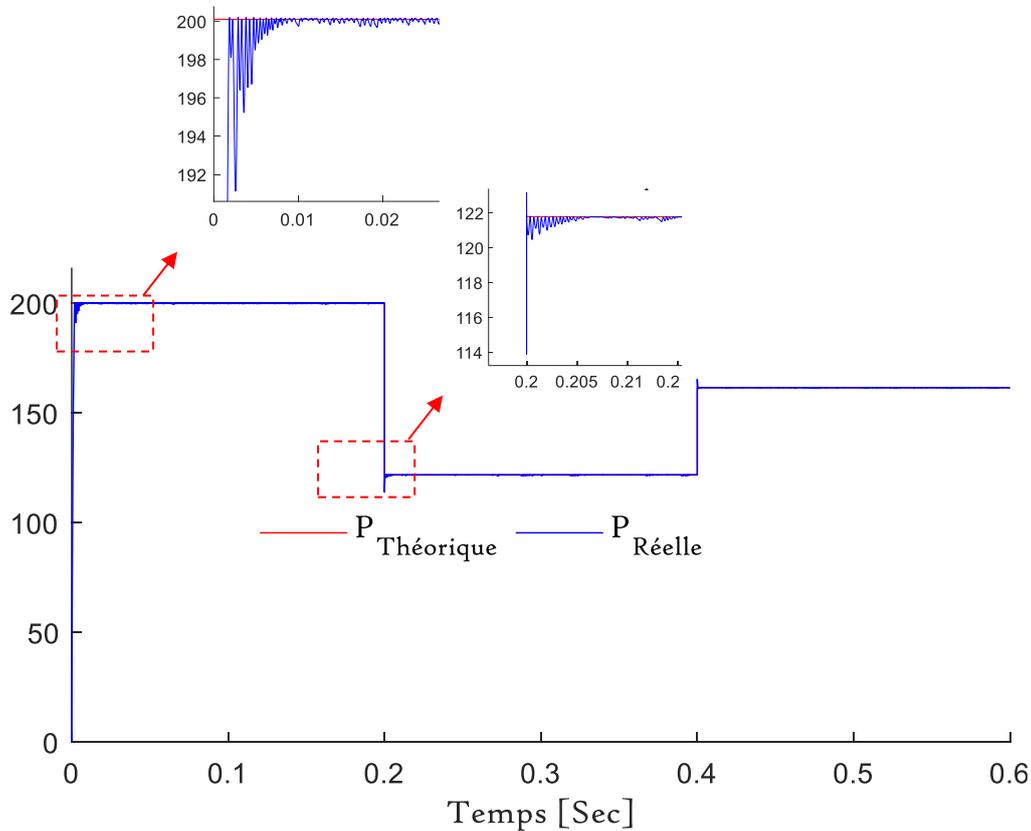
**Figure III.11:** Evolution de la fonction d'optimisation en fonction des itérations

A la fin de la phase d'apprentissage, nous obtenons la meilleure position ( $X_{\alpha}$ ) qui correspond à nos partitions floues (figure III.12) et les facteurs d'échelles d'entrées-sortie :  $G_{E(K)} = 5$ ;  $G_{\Delta E(K)} = 1$ ;  $G_{u(K)} = 0.1$ .



**Figure III.12:** Fonctions d'appartenance du contrôleur flou optimal

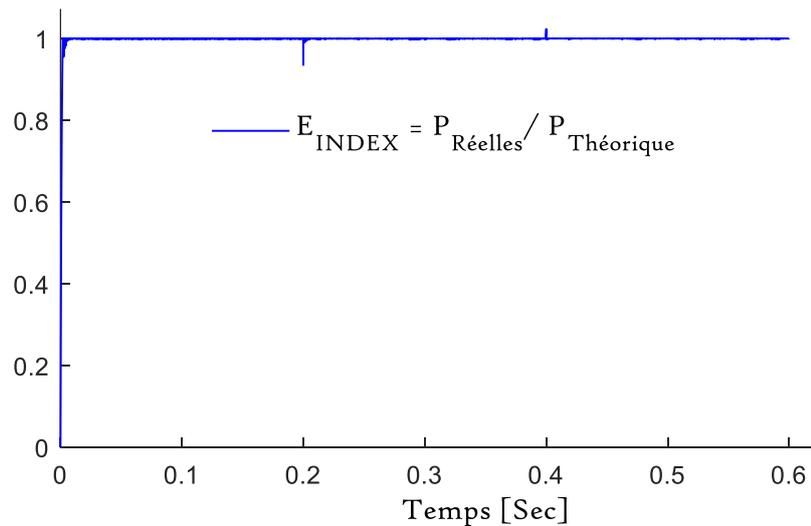
La (figure III.13) illustre la performance du contrôleur flou optimale vis-à-vis de la poursuite du Point de puissance maximale. Dans cette figure nous avons juste présenter l'évolution de la puissance théorique et la puissance réelle du panneau.



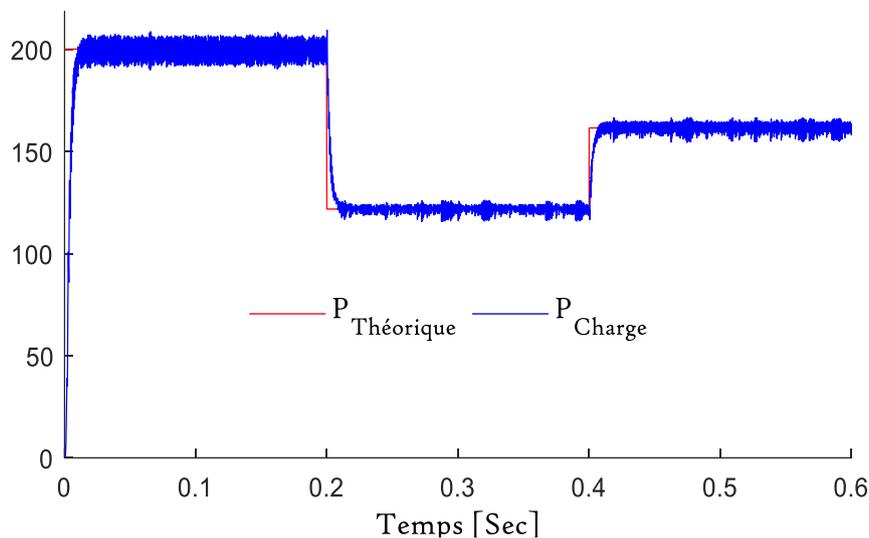
**Figure III.13:** Variation de la puissance en fonction du temps

A travers cette (figure III.13) on peut facilement constater la performance du contrôleur flou, où les deux puissances sont pratiquement similaires malgré la variation de l'irradiance. Le contrôleur flou a pu extraire à chaque instant la puissance maximale du panneau. Pour vérifier cette conclusion, nous avons utilisé un critère numérique permettant justement d'estimer le niveau de performance de la commande MPPT. Ce dernier donné par l'équation III.7 et illustré dans la (figure III.14) est le rapport entre la puissance théorique et la puissance réelle. Plus ce critère est proche de 1 plus la commande est performante. Et inversement plus il s'éloigne de 1 plus la commande est mauvaise.

$$E_{index} = \frac{\sum_{k=1}^N P_{PV}}{\sum_{k=1}^N P_{Th}} \quad \text{III.7}$$



**Figure III.14:** Rapport entre la puissance réelle et la puissance théorique



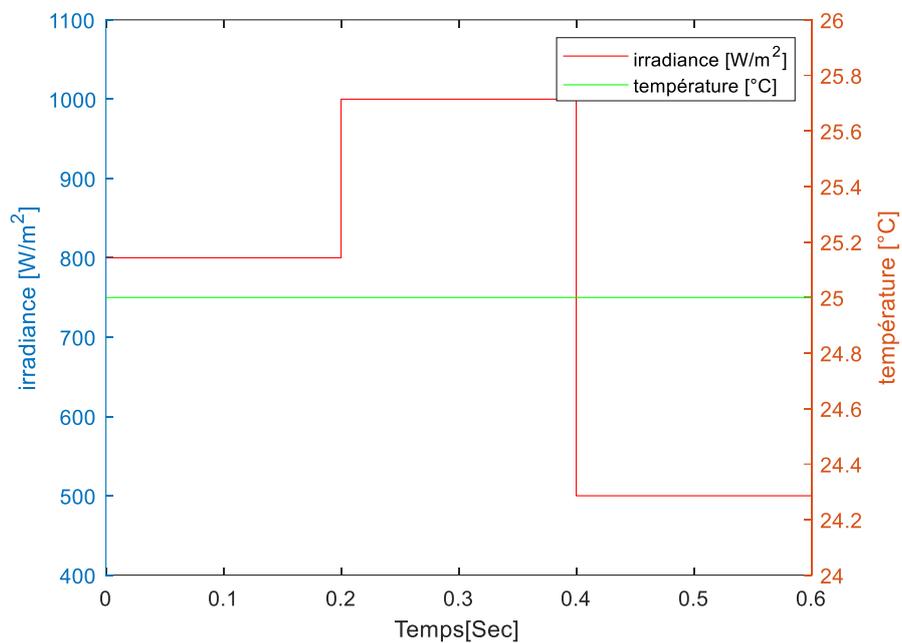
**Figure III.15:** Variation de la puissance charge et la puissance théorique en fonction du temps.

A partir de la (figure III.15), on remarque que la puissance de la charge suit la puissance théorique avec un temps de réponse qui est considéré rapide moins de 0.05 (sec) dans le cas d'un changement brusque dans l'irradiation. Ce qui conforme aux conclusions tirées juste avant sur la performance du contrôleur flou.

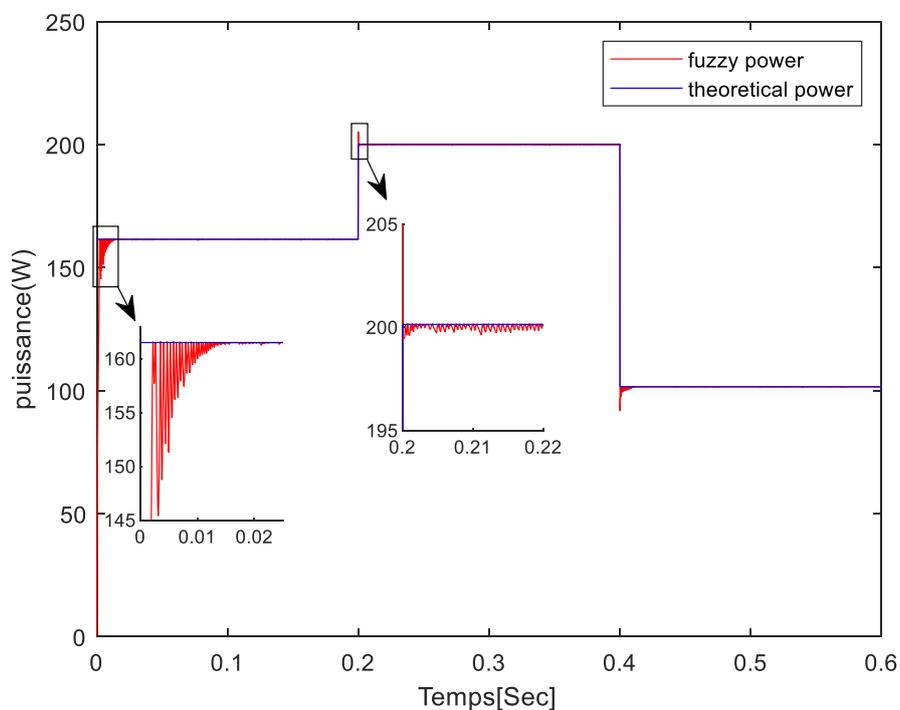
### III.4.2.a Test sur la variation d'irradiance

Dans ce cas, nous avons effectué un test dans lequel on garde la température constante  $T=25^{\circ}\text{C}$  et on fait varier l'irradiance qui augmente de  $800 \text{ W/m}^2$  à  $1000 \text{ W/m}^2$  et puis

diminue jusqu'à atteindre  $500 \text{ W/m}^2$  (Voir figure III.16) l'ensemble des résultats obtenues sont illustrés dans la (figure III.17) ci-dessous :



**Figure III.16:** Variation de la puissance théorique et réelle du panneau



**Figure III.17:** Variation de la puissance théorique et réelle du panneau

A partir de la (figure III.17), on remarque que malgré les variations d'irradiance, la puissance réelle reste très proche de la puissance théorique, ce qui démontre encore la performance remarquable du contrôleur flou même pour un scénario qui n'a jamais vu lors de la phase d'apprentissage.

### III.5. Comparaison entre la P&O et la commande flou optimisée

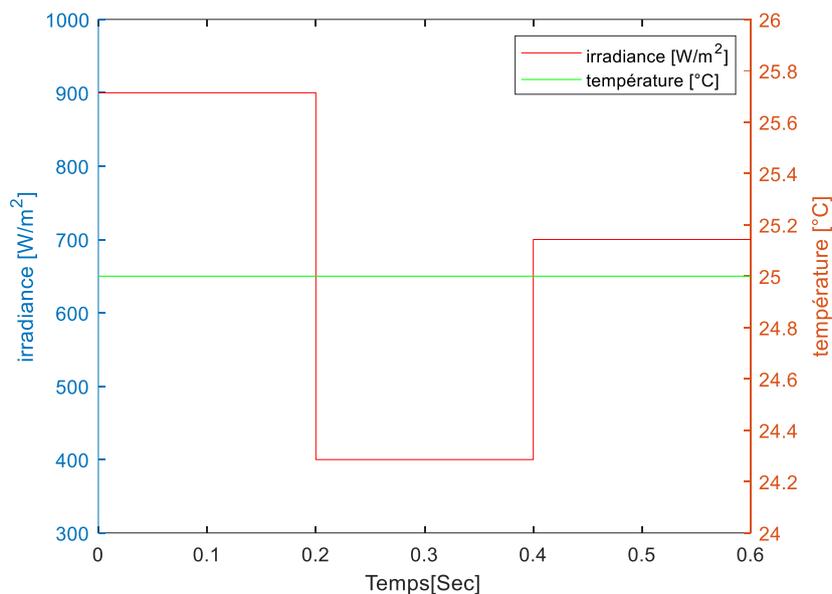


Figure III.18: Profile de l'irradiance et de température

Etant donné l'impact remarquable de l'irradiance sur la variation de puissance réelle, la méthode la plus appropriée pour cette comparaison consiste à maintenir une température fixe à 25°C tout en effectuant un changement de l'irradiance qui va augmenter de 800W/m<sup>2</sup> jusqu'à 1000W/m<sup>2</sup>, puis elle va diminuer jusqu'à atteindre 500W/m<sup>2</sup> comme illustré dans la (figure III.18). La (figure III.19) montre les résultats obtenus.

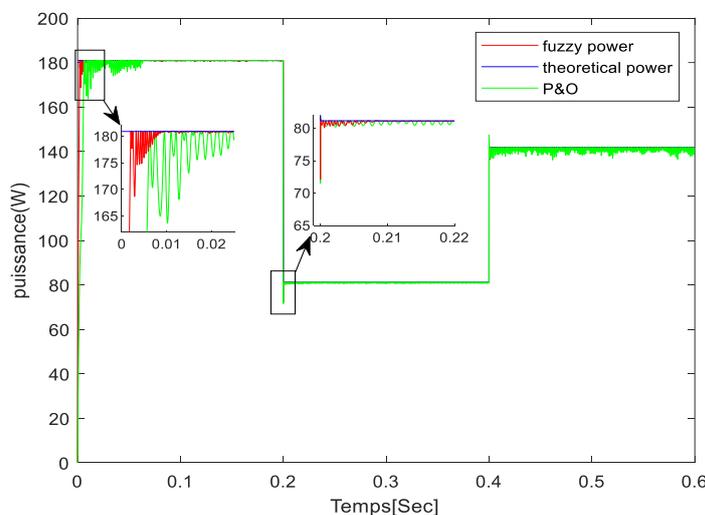


Figure III.19: Comparaison des performances : P&O et logique floue

En comparant les deux résultats illustrés dans la (figure III.19) on peut conclure facilement que le contrôleur flou présente des avantages indéniables par rapport à la commande P&O. En effet, la logique floue surpasse la commande P&O en termes de temps de réponse qui apparaissent clairement au démarrage. D'autre part, en régime permanent, la logique floue arrive à surmonter le problème d'oscillation autour du point de fonction qui est en soi le principe de la P&O.

La (figure III.19), confirme bien que le contrôleur flou proposé arrive à suivre la consigne lors de l'apparition de n'importe quel scénario de perturbation de température ou d'irradiance et cela due à l'expérience qu'il apprend sur le système durant la phase d'apprentissage. Ce résultat satisfait pleinement la question établie dans l'introduction de ce manuscrit à savoir : « *comment peut-on assurer le transfert maximal de puissance malgré les variations des conditions de changement climatiques ?* »

En partant d'une simple base de règles et en ajustant uniquement la base de données par l'algorithme « *GWO* », on a pu améliorer la rapidité et la précision de la réponse, contrairement à l'utilisation d'une commande MPPT classique de type P&O qui peut facilement entraîner une perte de précision et le graphe de la (figure III.19) démontre bien cette conclusion.

### III.6. Conclusion

Ce dernier chapitre est consacré à l'étude, la conception et la simulation des divers étages détaillés dans les deux chapitres antérieurs construisant un système photovoltaïque complet. De plus, il aborde également la conception d'un contrôleur flou en utilisant l'algorithme « *GWO* » présenté en détail dans le chapitre II.

Afin d'assurer une bonne compréhension nous avons d'abord présenté des généralités sur les deux commandes proposées : la P&O et la commande floue. Ensuite nous avons implémentés les deux commandes séparément, les différents résultats de simulation confirment la réussite de l'algorithme « *GWO* » à construire un contrôleur flou efficace.

Enfin, nous avons récapitulé toutes les nuances qui mettent en évidence les avantages de la technique de contrôle intelligente présentée dans cette étude.

# **Conclusion générale**

A travers cette étude, nous visons à étudier l'un des dilemmes les plus posés dans la littérature des systèmes photovoltaïques. Il s'agit de la conception d'une commande MPPT intelligente pour un système autonome et sans stockage. Pour bien préciser le terme intelligent, la commande présentée dans ce manuscrit est destinée à l'extraction de la puissance maximale fournie par le panneau photovoltaïque et ce peu importe le scénario qui se présente à elle.

Pour atteindre un tel objectif, la problématique a été traitée de façon graduelle et le manuscrit était organisé en conséquence en trois chapitres, chacun traitant une question particulière : le système photovoltaïque, le convertisseur DC-DC et la commande MPPT.

Le chapitre I contient des généralités sur les systèmes photovoltaïques, à savoir l'effet photovoltaïque, les différentes technologies utilisées, la modélisation mathématique de la photopile puis l'étude de l'influence de l'espace externe qui est représentée par la température et l'irradiance. Une fois que les informations nécessaires à l'étude d'un tel système sont prêtes, on appuie par simulation sous Matlab/Simulink d'un modèle de panneau photovoltaïque de type Kyocera Solar KC200GT qui fournit une puissance maximale de 200 W sous des conditions atmosphériques standards.

Le chapitre II est consacré à l'étude de l'étage d'adaptation utilisant « hacheur Boost ». Chaque unité est examinée individuellement dans lequel chaque décision prise sur le choix des composants est justifiée. Une fois toutes les informations nécessaires fournies, le problème de suivi du point de puissance maximale est abordé, ainsi que les différentes approches de commande MPPT présentées dans la littérature que nous avons classées par familles, certaines d'entre elles sont nos propres propositions. Une méta heuristique appelée « *Grey Wolf* » est également présentée, qui sera utilisée ultérieurement dans le chapitre trois pour le réglage automatique des paramètres du contrôleur flou décrit en détail dans le même chapitre.

Dans le dernier chapitre, l'attention se porte sur deux commandes : le contrôleur flou et la commande P&O. Tout d'abord, une étude est menée sur la conception d'un convertisseur statique. Puis, la commande P&O est détaillée dans un premier temps suivie d'une implémentation. Les tests effectués montrent l'apparition de ses diverses imperfections.

Ensuite, pour répondre à la question initiale posée dans l'introduction {page2}, la conception d'un contrôleur flou optimisé par l'algorithme « *GWO* » est présentée. Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de cette commande. Donc cet algorithme a surmonté le problème de conception du contrôleur flou optimal.

Enfin, une étude comparative entre la P&O et le contrôleur flou optimisé fait preuve d'une grande supériorité en termes d'efficacité en faveur de ce dernier.

## **Perspectives**

Le domaine de la commande des panneaux photovoltaïques est vaste. Il serait plus captivant d'explorer des aspects pratiques tels que l'utilisation d'un moteur comme charge afin de rendre l'étude plus concrète.

Par ailleurs, il serait également intéressant d'analyser l'effet d'ombrage pour aborder le sujet de manière plus complète.

D'autre part, l'aspect de la construction d'un système entièrement autonome devient plus attrayant lorsqu'on envisage une hybridation entre plusieurs sources d'énergies différentes.

L'étude s'est limitée sur le plan théorique en raison de contraintes de ressources. Toutefois, pour parvenir à une conclusion définitive, il serait plus réaliste de valider ces méthodes sur le terrain pratique.

## Références

---

- [1] Y.-H. Liu, H. Shyh-Ching, H. Jia-Wei et L. Wen-Cheng, «A Particle Swarm Optimization-Based Maximum Power Point Tracking Algorithm for PV Systems Operating Under Partially Shaded Conditions,» *IEEE*, vol. 27, n° %113136478, pp. 1027 - 1035, 2012. [10.1109/TEC.2012.2219533](https://doi.org/10.1109/TEC.2012.2219533)
- [2] E. Becquerel, «Recherches sur les effets de la radiation chimique de la lumiere solaire au moyen des courants electriques,» *Comptes Rendus de L'Academie des Sciences*, vol. 9, n° %11, pp. 145-149, 1839.
- [3] C. KONG, «A general maximum power transfer theorem,» *IEEE*, vol. 38, n° %15053510, pp. 296 - 298, 1995. [10.1109/13.406510](https://doi.org/10.1109/13.406510)
- [4] P. Bessemoulin et J. Oliviéri, «Le rayonnement solaire et sa composante ultraviolette,» *Météo et Climat*, n° %131, pp. 42-59, 2000. [10.4267/2042/36135](https://doi.org/10.4267/2042/36135)
- [5] A. Piel et H. Murray, «Effets photovoltaïques de transitions interbandes dans des structures métal/photoconducteur/métal,» *Journal de Physique Archives*, vol. 11, n° %13, pp. 397 - 402, 1976. <https://doi.org/10.1051/rphysap:01976001103039700>
- [6] Z. Sun, X. Chen, Y. He, J. Li, J. Wang, H. Yan et Y. Zhang, «Toward Efficiency Limits of Crystalline Silicon Solar Cells: Recent Progress in High-Efficiency Silicon Heterojunction Solar Cells,» *Advanced Energy Materials*, vol. 12, n° %123, p. 2200015, 2022. <https://doi.org/10.1002/aenm.202200015>
- [7] I. S. BRAHAMI, « Optimisation du fonctionnement d'un générateur photovoltaïque par guidage automatique des panneaux solaires,» Doctoral dissertation, UNIVERSITE DJILLALI LIABES , SIDI-BEL-ABBES, 2018.
- [8] N. Benadla, «Etude comparative de différentes cellules photovoltaïques à contacts arrières interdigités,» Doctoral dissertation, Université Aboubakr Belkaid, Tlemcen, 2020.
- [9] A. Vauthelin, «Fabrication et caractéristiques de cellules photovoltaïques multi-jonctions à base de matériaux antimoniures (III-Sb) pour applications sous fortes concentrations solaires.,» Doctoral dissertation, Unité de recherche Institut d'Electronique et des Systèmes IES, Université Mnotpellier, Montpellier, 2018.
- [10] A. BELKAID, «Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome,» Doctoral dissertation; université Ferhat Abbas-Setif 1, SETIF, 2015.
- [11] I. Ziemelis, H. Putans, I. Pelece et A. Snegovs, «COMPARATIVE INVESTIGATION OF FIXED AND TRACKING THE SUN SOLAR PHOTOVOLTAIC PANELS,»

*Proceedings of the 16th International Scientific Conference*, pp. 540-545, 2017.  
[10.22616/ERDev2017.16.N107](https://doi.org/10.22616/ERDev2017.16.N107)

- [12] W. Benmoussa, S. Amara et A. Zerga, «Etude comparative des modèles de la caractéristique,» *Revue des Energies Renouvelables ICRES-07*, vol. 6, pp. 301-306, 2007.
- [13] A. C. Pastor, «Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques,» Doctoral dissertation de l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Toulouse, 2006.
- [14] M. ZEGRARI, A. BADRI, B. OUKARFI et Y. ELKOUARI, «Elaboration d'un système d'optimisation de puissance d'une structure photovoltaïque,» *Revue Méditerranéenne des Télécommunication*, vol. 4, n° %12, pp. 39-43, 2014.
- [15] V. Jatly, B. Azzopardi, J. Joshi, A. Sharma et S. Arora, «Experimental Analysis of hill-climbing MPPT algorithms under low irradiance levels,» *www.elsevier.com/locate/rser*, vol. 150, n° %1111467, p. 16, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.111467>
- [16] D. Clarke, «Adaptive predictive control,» chez *Annual Reviews in Control*, vol. 20, United Kingdom, Department of Engineering Science, University of Oxford Parks Road, Oxford OX1 3PJ, U.K., 1996, pp. 83-94. [https://doi.org/10.1016/S1367-5788\(97\)00007-2](https://doi.org/10.1016/S1367-5788(97)00007-2)
- [17] L. Jyothy et M. Sindhu, «"An Artificial Neural Network based MPPT Algorithm For Solar PV System",» chez *4th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)*, Chennai, India, 2018. [10.1109/ICEES.2018.8443277](https://doi.org/10.1109/ICEES.2018.8443277)
- [18] O. Bozorg-Haddad, *Advanced Optimization by Nature-Inspired Algorithms*, 1 éd., Singapore: Springer Singapore, 2018, pp. XV, 159. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5221-7>
- [19] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili et A. Lewis, «"Grey Wolf Optimizer,Advanced in Engineering Software",» *Advanced in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46-61, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
- [20] A. O. Baba, G. Liu et X. Chen, «Classification and Evaluation Review of Maximum Power Point Tracking Methods,» *Sustainable Futures*, vol. 2, n° %1100020, p. 100020, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.sfr.2020.100020>
- [21] L. ZADEH, «"Fuzzy Sets",» *Information and control*, vol. 8(3), n° %10019-9958, pp. 338-353, 1965. [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

- [22] M. A. KACIMI, «Contribution à la conception des systèmes flous de type Mamdani par les algorithmes d'optimisation multi-objectif,» Doctoral dissertation, université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2021.
- [23] R. Kumar, «Grey wolf optimizer (GWO),» Electrical Engineering MNIT, Jaipur, 2017.

## Résumé

L'énergie photovoltaïque est l'une des formes d'énergie renouvelable les plus importantes sur lesquelles nous pouvons compter à l'avenir. Malgré la nature épuisable des énergies fossiles qui sont mal répartis, il est difficile d'y renoncer aujourd'hui en raison de leur large empreinte en termes de fourniture continue d'électricité. Le travail entrepris a pour objectif d'améliorer l'efficacité des panneaux photovoltaïques afin de permettre à l'énergie solaire de rivaliser avec ces formes d'énergie. Ce manuscrit, retrace la genèse du problème MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) en mettons en évidence les différentes contraintes climatiques. Il introduit une étude complète et détaillée des principaux éléments des systèmes photovoltaïques, suivie d'une étude approfondie du convertisseur statique de type hacheur BOOST. D'autre part, ce manuscrit introduit deux différentes propositions de commande MPPT : la première concerne la commande classique P&O et la seconde s'oriente vers l'optimisation d'un contrôleur flou. Les résultats obtenus à partir des deux propositions vis-à-vis les changements brusques des conditions climatiques, montrent un potentiel très prometteur du contrôleur flou à la fois rapide et précis.

**Mots-Clés :** Système photovoltaïque, optimisation du contrôleur flou de Mamdani.

## Abstract:

Solar energy is one of the most important forms of renewable energy that can be relied upon in the future. Despite the damages caused by fossil fuels, which are unevenly distributed and environmentally destructive, it is difficult to abandon them at the current time due to their ability to provide a wide supply of electricity. The work undertaken aims to improve the efficiency of photovoltaic panels to enable solar energy to compete with other forms of energy. This study tracks the evolution of the Maximum Power Point Tracking (MPPT) problem and sheds light on various climatic challenges. It begins with a comprehensive and detailed analysis of the key elements in solar power systems, followed by a detailed study of the DC-DC BOOST converter. Additionally, this study proposes two different MPPT control techniques. The first proposal relates to conventional P&O control, while the second proposal aims to use an optimized fuzzy controller. The results obtained from these two techniques demonstrate very promising potentials for fuzzy control in dealing with sudden changes in climatic conditions in terms of speed and accuracy.

**Keywords:** Photovoltaic system, Mamdani fuzzy controller optimization.

## ملخص

الطاقة الشمسية هي واحدة من أهم أشكال الطاقات المتجددة التي يمكن الاعتماد عليها في المستقبل. على الرغم من الأضرار التي تسببها الطاقة الأحفورية والتي تكون موزعة بشكل غير منتظم ومدمرة للبيئة، فمن الصعب التخلي عنها في الوقت الحالي نظراً لقدرتها على توفير إمداد مستمر للكهرباء بشكل واسع. الهدف من هذه الدراسة هو تحسين كفاءة الألواح الشمسية لتمكين الطاقة الضوئية من منافسة الأشكال الأخرى للطاقة. تقوم هذه الدراسة بتتبع تطور مشكلة MPPT (تتبع نقطة الاستطاعة القصوى) وتسلط الضوء على التحديات المناخية المختلفة. تتمهد هذه الدراسة بتحليل شامل ومفصل للعناصر الرئيسية في أنظمة الطاقة الشمسية، تليها دراسة مفصلة للمحول الثابت مضخم جهد الخرج. وبالإضافة إلى ذلك، تقترح هذه الدراسة تقنيتين مختلفتين من تقنيات التحكم: الاقتراح الأول يتعلق بالتحكم التقليدي P&O في حين يهدف الاقتراح الثاني إلى استخدام متحكم ضبابي محسن. تظهر النتائج المستخلصة من هاتين التقنيتين إمكانات واعدة جداً للتحكم الضبابي في مواجهة التغيرات المفاجئة في الظروف المناخية من حيث السرعة والدقة.

**كلمات مفتاحية:** نظام الكهروضوئية، تحسين المتحكم الضبابي Mamdani