

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITÉ MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ÉLECTRIQUE**  
N° : .....



**DOMAINE : Sciences et technologie**  
**FILIERE : Energies Renouvelables**  
**OPTION : Energies Renouvelables en**  
**Electrotechnique**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Intitulé**

---

**Commande floue pour l'optimisation de la puissance**  
**d'un générateur photovoltaïque**

---

**Proposé et dirigé par :**

BENHAMADOUCHE Abdelouahab

**Présenté par :**

BOUDJELLAL Houssam eddine  
ABI Walid

**Soutenu devant le jury composé de :**

K. DJAZIA	Université Mohamed Boudiaf - m'sila	Président
A. BENHAMADOUCHE	Université Mohamed Boudiaf - m'sila	Rapporteur
M. MAYOUF	Université Mohamed Boudiaf - m'sila	Examineur

**ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2018 / 2019**

## *Dédicaces*

*J*e dédie ce travail :

- À mon père, qui peut être fier de trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie et aussi pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent ;
- À ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie ;
- À mes frères et mes sœurs que dieu les protège, surtout mon frère Bilal qui m'a beaucoup soutenu ;
- À la mémoire de ma grand-mère ;
- À mon binôme Walid ;
- À tous mes professeurs et mes camarades de la promotion 2018/2019 ;
- Enfin, à tout ce ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans ce travail.

*BOUDJELLAL houssam eddine*

*M'sila, le 26 juin 2019*

## *Dédicaces*

*J*e dédie ce travail :

- À mon père qui a toute ma gratitude, car c'est grâce à lui que j'ai atteint mon but ;
- À ma mère que je remercie pour son soutien moral, ses encouragements et ses conseils qui m'ont guidés durant mon parcours ;
- À mon grand-père, mes cousins et toute ma famille ;
- À mon binôme Houssam ;
- À tous mes amis(es) et spécialement pour Charf eddine ABI et Fares ABI qui m'ont beaucoup soutenu ;

*ABI walid*  
*M'sila, le 26 juin 2019*

## *Remerciements*

Avant tout, nous remercions *ALLAH* le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et que grâce à lui que ce travail a pu être réalisé.

Nous souhaitons témoigner notre reconnaissance envers Dr. Bilal BOUDJELLAL qui nous ont accompagné au cours de cette période, et qui se sont facilement intervenues dans le déroulement de ces travaux de mémoire.

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude et nos remerciements les plus sincères à notre encadreur Mr BENHAMADOUCHE Abdelouahab, qui nous a encadré durant tout le long de ce travail et pour sa disponibilité, et pour son soutien, encouragements, gentillesse et précieux conseils.

Nous tenons aussi à adresser nos remerciements au président du jury et aux membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'évaluer notre travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre reconnaissance et de notre profond respect.

Nos remerciements vont aussi à tous les enseignants du département d'électrotechnique qui ont contribué à notre formation.

Nous remercions évidemment nos parents et nos familles, qui, pendant tant d'années, nous ont encouragé et soutenu dans la poursuite de nos études.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude à tous nos amis et collègues pour le soutien moral et matériel...

## Résumé

L'adaptation entre un générateur PV qui a un comportement non linéaire et une charge continue est un problème technique qui nécessite l'utilisation d'un convertisseur DC-DC avec une commande MPPT pour assurer le maximum de puissance du générateur PV à la charge.

Notre contribution dans ce mémoire pour l'optimisation de la puissance d'un générateur photovoltaïque d'une part est d'une part le dimensionnement du système, notamment le convertisseur SEPIC et d'autre part la conception du contrôleur MPPT flou. La commande floue est choisie particulièrement pour ces performances et son adaptation aux systèmes non linéaire.

La simulation dans l'environnement Matlab/Simulink et la mise en œuvre l'algorithme proposé ont montrés la validité du système et la pertinence de son implémentation. Les résultats d'analyse par simulations ont montré l'importances du suivi du point de puissance maximale, et de ce fait ont montrées l'efficacité du système conçu et du contrôleur flou proposé. Ceci, Sous conditions des changements rapides de l'ensoleillement et de la température.

**Mots clés :** Générateur photovoltaïque, MPPT, Convertisseur SEPIC, commande floue.

### ملخص :

يعد التكيف بين مولد الكهروضوئي ذو سلوك غير خطي و الحمولة المستمرة مشكلة فنية تتطلب استخدام محول التيار-DC مع تقنية التحكم MPPT لضمان أقصى طاقة من المولد الكهروضوئي الى الحمولة.

إن مساهمتنا في هذه المذكرة هي من اجل تحسين قدرة المولد الكهروضوئي و بلخصوص من ناحية تحجيم النظام ، ولا سيما محول التيار SEPIC ومن ناحية أخرى تصميم وحدة تحكم الغامض MPPT. يتم اختيار التحكم الغامض خاصةً بالنسبة لهذا الغرض ومن اجل التكيف مع الأنظمة غير الخطية.

أظهرت المحاكاة في بيئة Matlab / Simulink وتنفيذ الخوارزمية المقترحة صحة النظام وأهميته. و أظهرت نتائج تحليل المحاكاة أهمية تتبع الحد الأقصى لنقطة الطاقة الاعظمية، وبالتالي أظهرت كفاءة النظام المصمم ووحدة التحكم الغامضة المقترحة. و هذا ، في ظل ظروف التغيرات السريعة لأشعة الشمس ودرجة الحرارة.

الكلمات المفتاحية: مولد كهروضوئي ، MPPT ، محول SEPIC ، تحكم غامض.

**Abstract:**

The adaptation between a PV generator that has a nonlinear behavior and a continuous load is a technical problem that requires the use of a DC-DC converter with a MPPT command to ensure the maximum power of the PV generator to the load.

Our contribution to this memory for optimizing the power of a photovoltaic generator is on the one hand the sizing of the system, in particular the SEPIC converter and on the other hand the design of the MPPT blur controller. Fuzzy control is chosen especially for these performances and its adaptation to nonlinear systems.

The simulation in the Matlab / Simulink environment and the implementation of the proposed algorithm showed the validity of the system and the relevance of its implementation. The simulation analysis results showed the importance of tracking the maximum power point, and thus showed the efficiency of the designed system and the fuzzy controller proposed. This, Under conditions of rapid changes of sunshine and temperature.

Key words: Photovoltaic generator, MPPT, SEPIC converter, fuzzy control.

# Table des matières

<b>Table des matières.....</b>	<b>i</b>
<b>Liste des Figures.....</b>	<b>iv</b>
<b>Liste des Tableaux.....</b>	<b>vii</b>
<b>Glossaire.....</b>	<b>viii</b>
<b>Nomenclature .....</b>	<b>ix</b>
<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I. L'énergie photovoltaïque (description et problématique).....</b>	<b>4</b>
I.1 Introduction.....	4
I.2 L'énergie solaire .....	4
I.2.1 Les types de rayonnement.....	5
I.2.2 Caractéristiques du Rayonnement Solaire .....	6
I.2.3 Situation actuel de l'énergie solaire photovoltaïque .....	6
I.2.4 Potentiel solaire en Algérie .....	7
I.2.5 La future d'énergie solaire photovoltaïque en Algérie.....	8
I.3 Le générateur photovoltaïque .....	8
I.3.1 Constitution d'un générateur photovoltaïque.....	9
I.3.2 La cellule photovoltaïque.....	9
I.3.2.1 Définition .....	9
I.3.2.2 Effet photovoltaïque.....	10
I.3.2.3 Les différents types de cellules photovoltaïques.....	10
I.3.3 Association des cellules photovoltaïques.....	11
I.3.3.1 Association en série .....	12
I.3.3.2 Association en parallèle .....	12
I.3.3.3 Association hybride (en série et en parallèle) .....	13
I.3.4 Protections d'un générateur photovoltaïque.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
I.4 Caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque .....	13
I.4.1 Caractéristique courant tension ( $I_{pv}$ - $V_{pv}$ ).....	15
I.4.2 Caractéristique puissance tension ( $P_{pv}$ - $V_{pv}$ ) .....	15
I.4.3 Zones de fonctionnement d'un module photovoltaïque.....	16
I.5 Influence de la température et de l'éclairement sur un module photovoltaïque .....	16
I.5.1 Influence de la température.....	17
I.5.2 Influence de l'éclairement.....	18
I.6 Les différentes architectures des systèmes PV .....	19
I.6.1 Système connecté au réseau.....	19
I.6.2 Système autonome .....	19
I.6.3 Système hybride.....	20
I.7 Avantages et inconvénients d'énergie photovoltaïque .....	21
I.7.1 Les avantages .....	21
I.7.2 Les inconvénients :.....	21
I.8 Conclusion .....	22
<b>Chapitre II. Modélisations et dimensionnement d'un système photovoltaïque .....</b>	<b>24</b>

II.1	Introduction.....	24
II.2	Les principes de conversion dans les systèmes PV .....	24
II.2.1	Couplage direct d'un générateur PV et une charge résistive .....	24
II.2.2	Etage d'adaptation entre un générateur PV et une charge .....	26
II.2.3	Convertisseurs DC-DC .....	27
II.2.3.1	Les topologies isolées de la source .....	27
II.2.3.2	Les topologies non isolées de la source .....	27
II.3	Modélisation du système étudié.....	28
II.3.1	Modélisation du générateur photovoltaïque.....	28
II.3.1.1	Modèle d'une cellule photovoltaïque.....	28
II.3.1.2	Modèle d'un générateur photovoltaïque .....	30
II.3.1.3	Caractéristiques électrique du module photovoltaïque choisi.....	30
II.3.2	Modélisation d'un convertisseur DC-DC SEPIC .....	32
II.4	Dimensionnement du SEPIC .....	34
II.4.1	Dimensionnement des paramètres.....	35
II.4.1.1	Rapport cyclique .....	35
II.4.1.2	Choix des inductances.....	35
II.4.1.3	Condensateur de couplage.....	36
II.4.1.4	Condensateur de de filtrage.....	36
II.4.1.5	Transistor .....	36
II.4.1.6	Diode.....	37
II.4.2	Cahier des charges .....	37
II.4.3	Calcul numérique des paramètres .....	38
II.4.3.1	Rapport cyclique .....	38
II.4.3.2	Inductances.....	38
II.4.3.3	Condensateur de couplage.....	38
II.4.3.4	Condensateur de de filtrage.....	38
II.4.3.5	Transistor .....	39
II.4.3.6	Diode.....	39
II.4.4	Calcul numérique des paramètres sous Matlab.....	39
II.5	Conclusion .....	40
<b>Chapitre III. Techniques de commande MPPT d'un système photovoltaïque .....</b>		<b>42</b>
III.1	Introduction.....	42
III.2	Commandes MPPT .....	42
III.2.1	Principe de la recherche du point de puissance maximale(MPPT).....	43
III.3	Synthèse des différentes techniques de maximisation de la puissance.....	44
III.3.1	Les méthodes indirectes .....	44
III.3.2	Les méthodes directes .....	44
III.4	La méthode Perturbe & Observe (P&O).....	45
III.4.1	Principe de la commandes P&O .....	45
III.4.2	Algorithme de la commandes P&O .....	47
III.5	La logique floue .....	49
III.5.1	Description de la logique floue .....	49
III.5.2	Domaine d'application.....	50
III.5.3	Base de la logique floue .....	50
III.5.3.1	Principe de base de la logique floue.....	50
III.5.3.2	Fonctions d'appartenance.....	51
III.5.3.3	Opérateurs en logique floue .....	54
III.5.4	Règles floues .....	56
III.5.4.1	La logique floue et l'intelligence artificielle .....	56
III.5.4.2	Principe et étapes de mise en œuvre d'un mécanisme d'inférence floue .....	57
III.5.5	Avantages et inconvénients du réglage par logique floue.....	60
III.5.5.1	Les Avantages .....	60

---

III.5.5.2	Les inconvénients.....	61
III.5.6	La commande MPPT flou.....	61
III.5.6.1	Fuzzification.....	62
III.5.6.2	Les variables linguistiques .....	63
III.5.6.3	Méthodes d'inférence (les règles floues) .....	64
III.5.6.4	Défuzzification.....	66
III.6	Conclusion .....	67
<b>Chapitre IV. Simulations et évaluation des résultats .....</b>		<b>69</b>
IV.1	Introduction.....	69
IV.2	Description du système photovoltaïque global .....	69
IV.3	Résultats de simulation de la méthode P&O.....	71
IV.3.1	Fonctionnement sous un ensoleillement variable .....	71
IV.3.2	Fonctionnement sous une température variable .....	73
IV.4	Résultats de simulation de la méthode MPPT flou .....	76
IV.4.1	Fonctionnement sous un ensoleillement variable .....	77
IV.4.2	Fonctionnement sous une température variable .....	79
IV.5	Étude comparative entre MPPT P&O et MPPT flou .....	81
IV.5.1	Fonctionnement sous un ensoleillement variable .....	81
IV.5.2	Fonctionnement sous une température variable .....	83
IV.6	Conclusion .....	85
<b>Conclusion générale.....</b>		<b>88</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>		<b>91</b>

## Liste des Figures

Figure I.1 – Les différents rayonnements solaires. ....	5
Figure I.2 – Heure de puissance crête. ....	6
Figure I.3 – Capacité ajouts annuels mondiaux d'énergie solaire photovoltaïque 2005–2015. ....	7
Figure I.4 – Potentiel solaire en Algérie. ....	8
Figure I.5 – Structure d'une source solaire photovoltaïque (cellule, module et panneau PV)...	9
Figure I.6 – Une cellule photovoltaïque. ....	9
Figure I.7 – Schéma de principe de la conversion photoélectrique. ....	10
Figure I.8 – Différents types de la cellule photovoltaïque : (a) silicium monocristallin, (b) silicium polycristallin, (c) silicium amorphe. ....	10
Figure I.9 – Courbe $I=f(V)$ d'une association série de cellules photovoltaïques. ....	12
Figure I.10 – Courbe $I-V$ d'une association parallèle de cellules photovoltaïques.....	12
Figure I.11 – Caractéristique résultante d'un groupement hybride de $(N_p+ N_s)$ cellules identiques. ....	13
Figure I.12 – Schéma d'un générateur photovoltaïque avec diodes by-pass et diode anti-retour . ....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
Figure I.13 – Caractéristique $I-V$ d'un module photovoltaïque.....	15
Figure I.14 – Caractéristique $P-V$ d'un module photovoltaïque.....	15
Figure I.15 – Caractéristique $I-V$ d'un module photovoltaïque.....	16
Figure I.16 – Influence de la température sur la caractéristique $I-V$ avec un éclairement de $1000W/m^2$ . ....	17
Figure I.17 – Influence de la température sur la caractéristique $P-V$ avec un éclairement de $1000W/m^2$ . ....	17
Figure I.18 – Influence de l'éclairement sur la caractéristique $I-V$ avec un température de $25^\circ C$ . ....	18
Figure I.19 – Influence de l'éclairement sur la caractéristique $P-V$ avec une température de $25^\circ C$ . ....	18
Figure I.20 – Système PV connecté au réseau électrique. ....	19
Figure I.21 – Système PV autonome. ....	20
Figure I.22 – Système PV hybride.....	20
Figure II.1 – Couplage direct d'un GPV et une charge résistive.....	25
Figure II.2 – Caractéristique $I/V$ d'un GPV et d'une charge résistive.....	25
Figure II.3 – Points de fonctionnement pour différents niveaux de rayonnement.....	25
Figure II.4 – Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de $P_{MAX}$ du GPV. ....	26
Figure II.5 – Schéma de convertisseur DC/DC. ....	27
Figure II.6 – Schéma du système photovoltaïque étudié. ....	28
Figure II.7 – Modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque. ....	29

Figure II.8 – Caractéristiques I–V et P–V de panneau photovoltaïque en fonction de l’ensoleillement. ....	31
Figure II.9 – Caractéristiques I–V et P–V de panneau photovoltaïque en fonction de la température. ....	31
Figure II.10 – Schéma de convertisseur inverseur « SEPIC ». ....	32
Figure II.11 – Convertisseur SEPIC Durant l’état ON. ....	32
Figure II.12 – Convertisseur SEPIC Durant l’état OFF. ....	33
Figure II.13 – Formes d’onde des tensions et des courants d’un convertisseur SEPIC. ....	34
Figure III.1 – Schéma de principe du convertisseur MPPT. ....	43
Figure III.2 – Relation entre le rapport cyclique d’un CS et la puissance du GPV. ....	43
Figure III.3 – Commande d’un panneau photovoltaïque par la (P&O). ....	46
Figure III.4 – Divergence de la commande P&O lors de variations d’irradiation. ....	47
Figure III.5 – Algorithme de la méthode P&O. ....	48
Figure III.6 – Commande du convertisseur DC–DC associé à la source PV avec l’algorithme MPPT. ....	49
Figure III.7 – Des caractéristiques du raisonnement humain. ....	49
Figure III.8 – Comparaison d’un ensemble classique et un ensemble flou. ....	51
Figure III.9 – Fonction caractéristique. ....	51
Figure III.10 – Fonction d’appartenance. ....	51
Figure III.11 – Fonction d’appartenance, variable et terme linguistique. ....	52
Figure III.12 – Fonctions d’appartenance linéaires par morceaux. ....	52
Figure III.13 – Fonction d’appartenance singleton. ....	53
Figure III.14 – Différentes formes de fonctions d’appartenance. ....	53
Figure III.15 – L’opérateur NON (complément). ....	55
Figure III.16 – L’opérateur ET (intersection). ....	55
Figure III.17 – L’opérateur OU (union). ....	56
Figure III.18 – Traitement flou. ....	57
Figure III.19– Implication. ....	57
Figure III.20– Fuzzification. ....	58
Figure III.21– Activation. ....	58
Figure III.22– Implication. ....	59
Figure III.23– Agrégation des règles. ....	59
Figure III.24– Défuzzification par centre de gravité. ....	60
Figure III.25 – Schéma synoptique d’un système PV avec une commande MPPT flou. ....	61
Figure III.26 – Structure de base du contrôleur flou. ....	62
Figure III.27 – variation de la puissance par rapport à la variation de la tension. ....	63
Figure III.28– Fonctions d’appartenances de : (a) L’entrée erreur E, (b) L’entrée changement d’erreur CE et (c) La sortie dD. ....	64
Figure III.29 – La variation du point de puissance maximal. ....	65
Figure III.30 – Organigramme de la technique MPPT basée sur le contrôleur flou. ....	67
Figure IV.1–Schéma bloc du système PV avec MPPT Floue et P&O . ....	69
Figure IV.2 – Caractéristiques I–V et P–V de panneau photovoltaïque. ....	70
Figure IV.3 – Modèle ‘SIMULINK’ du contrôleur MPPT P&O. ....	71
Figure IV.4 – Profil de l’ensoleillement considéré. ....	71

Figure IV.5 – Evolution de puissance, tension et courant du GPV (P&O). .....	72
Figure IV.6 – Courbe de rapport cyclique D du GPV (P&O). .....	73
Figure IV.7 – Profil de la température considéré.....	74
Figure IV.8 – Evolution de puissance, tension et courant du GPV (P&O). .....	75
Figure IV.9 – Courbe de rapport cyclique D du GPV (P&O). .....	76
Figure IV.10 – Modèle ‘SIMULINK’ du contrôleur MPPT flou. ....	76
Figure IV.11 – Schéma générale du contrôleur MPPT flou. ....	77
Figure IV.12 – Evolution de puissance, tension et courant du GPV (flou). ....	78
Figure IV.13 – Courbe de rapport cyclique D du GPV (flou). ....	79
Figure IV.14 – Evolution de puissance, tension et courant du GPV (flou). ....	80
Figure IV.15 – Courbe de rapport cyclique D du GPV (flou). ....	81
Figure IV.16 – Evolution de puissance, tension et courant du GPV (flou et P&O). ....	82
Figure IV.17 – Courbe de rapport cyclique D du GPV (P&O). ....	83
Figure IV.18 – Evolution de puissance, tension et courant du GPV (flou et P&O). ....	84
Figure IV.19 – Courbe de rapport cyclique D du GPV (flou). ....	85

## Liste des Tableaux

Tableau I.1 – Taux d’ensoleillement pour chaque région de l’Algérie. ....	7
Tableau I.2 – Avantages et inconvénients des cellules solaires à base de silicium. ....	11
Tableau II.1 – Paramètres du module photovoltaïque de type VICTRON 100W. ....	31
Tableau II.2 – Paramètres du système photovoltaïque étudiée. ....	37
Tableau III.1 – Caractéristiques majeures des commandes MPPT. ....	45
Tableau III.2 – Les modes de perturbation de la méthode P&O. ....	46
Tableau III.3 – Les règles du contrôleur flou. ....	65
Tableau III.4 – Tableau des règles d’inférence. ....	65
Tableau III.5 – Interprétation des opérations logiques. ....	66
Tableau IV.1 – Paramètres électriques du système étudié. ....	70

## Glossaire

GPV	Générateur photovoltaïque
FLC	Fuzzy Logic Controller.
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
MPPT	Maximum Power Point Tracking
P&O	Méthode de Perturbation et observation
MLI	Modulation de Largeur d'Impulsion
PI	Proportionnel Intégral
PV	Photovoltaïque
STC	Standard test conditions
CS	Convertisseur Statique
MOSFET	Metal Oxide Silicon Field Effect Transition
DC/DC	Conversion continue/continue
I-V	Courant-Tension
P-V	Puissance-Tension
CDER	Centre de Développement des Énergies Renouvelable
W <sub>c</sub>	Watt-crête
GTO	Gate Turn-Off Thyristor
LF	logique floue
WARP	Weight Associative Rule Processor

## Nomenclature

$P_m$	Puissance maximale	W
$I$	Courant	A
$I_L$	Courant photo-génère par la cellule photovoltaïque	A
$R_s$	Résistance série	$\Omega$
$R_{sh}$	Résistance parallèle	$\Omega$
$K$	Constante de Boltzmann ( $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K)	-
$T$	Température de la cellule	K
$T_a$	Température ambiante	$^{\circ}\text{C}$
$E_g$	Irradiation solaire	$\text{W/m}^2$
$V_{oc}$	La tension en circuit ouvert	V
$I_{sc}$	Le courant de court-circuit	A
$N_s$	Nombre de cellule en Série	-
$N_p$	Nombre de cellule en Parallèle	-
$G$	Eclairement	$\text{W/m}^2$
$I_{pv}$	Courant délivrée par la cellule (PV)	A
$I_{ph}$	Le courant du photo	A
$I_c$	Courant de Capacité	A
$I_{cc}$	Courant de court de circuit	A
$K_i$	Coefficient de la température de $I_{ph}$	K
$R$	Résistance	$\Omega$
$V_{MPP}$	Tension correspond au maximum de puissance	V
$I_{MPP}$	Courent correspond au maximum de puissance	A
$P_{MPP}$	Puissance au Point de puissance maximale	W
$dE$	Changement d'erreur	-
$D$	Rapport cyclique du convertisseur	-
$\Delta\alpha$	Changement du Rapport cyclique du convertisseur	-
$E$	Erreur	-
$\text{Sign}$	Fonction signe	-

# **Introduction générale**

# **Introduction générale**

Depuis les crises successives du pétrole des dernières décennies et face aux prévisions d'épuisement inéluctable des ressources mondiales en énergie fossile (Pétrole, gaz, charbon...) d'un côté, et face aux débats sur l'énergie nucléaire et le réchauffement climatique d'un autre côté ; la nécessité de la diversification énergétique, de la sécurisation des approvisionnements et de la protection de l'environnement est devenue une urgence mondiale. Cette situation a conduit à la recherche d'autres ressources d'énergies de remplacement.

Les énergies renouvelables et notamment l'énergie solaire photovoltaïque représente une solution de remplacement par excellence et elle est de plus en plus utilisée dans nos jours. Ce type d'énergies n'est pas seulement gratuit et inépuisable, mais aussi très propre pour l'environnement. D'ailleurs, on parle souvent d'une « énergie verte », puisqu'elle permet d'éviter totalement la pollution produite par les sources traditionnelles. Elle présente l'avantage de s'intégrer facilement à l'habitat (façades de bâtiments, toits). L'absence de pièces mécaniques mouvantes réduit l'entretien de ces systèmes à un minimum et maximiser leur fiabilité (durée de vie d'environ 25 ans).

Son exploitation permettrait de fournir en électricité des sites isolés des réseaux électriques et les zones agricoles et éviterait la création de nouvelles lignes électriques qui demandent généralement un lourd investissement, et elle est polyvalente et peut être ajustée selon les besoins. En conséquence une question de grande importance se pose : Quels sont les méthodes les plus efficaces d'optimiser l'utilisation d'énergie photovoltaïque ?

Dans cette perspective, nous nous intéressons dans ce travail à l'optimisation de la puissance des générateurs photovoltaïques essentiellement en utilisant la commande par logique floue.

Le manuscrit ici présent est devisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présenterons une synthèse de l'état de l'art actuel sur l'énergie photovoltaïque. Ainsi que les différentes technologies des cellules solaires, leur principe de fonctionnement, leur modélisation et leur comportement.

Dans le deuxième chapitre, nous exposerons la modélisations et dimensionnement d'un système photovoltaïque, ainsi que les différentes topologies des convertisseurs DC/DC.

Dans le troisième chapitre, nous allons présenter deux techniques de poursuite du point de puissance maximale MPPT P&O et commande MPPT flou pour l'optimisation de la puissance des générateurs photovoltaïques.

Dans le quatrième chapitre, nous présenterons les résultats de simulation obtenus au cours de ce travail. Nous analyserons dans ce chapitre les différents résultats de simulation où nous allons expliquer en détail les différents résultats obtenus des méthodes MPPT proposées. Ainsi qu'un simulateur MPPT des modules photovoltaïques sous conditions des changements rapides d'ensoleillement et de température développé sous l'environnement de simulation Matlab/Simulink.

Enfin, nous terminerons notre mémoire par une conclusion générale, dont nous rappelons quelques les grandes lignes de notre contribution ainsi les perspectives futures qui pourront faire suite à notre travail.

# **Chapitre I. L'énergie photovoltaïque (description et problématique)**

*« Savoir ce que tout le monde sait, c'est ne rien savoir ».*

*Remy de Gourmont.*

# Chapitre I. L'énergie photovoltaïque (description et problématique)

## I.1 Introduction

Dans ce premier chapitre nous allons présenter une brève description des éléments fondamentaux de l'énergie photovoltaïque. En effet, nous allons revoir la structure d'un générateur photovoltaïque et les différents constituant principalement la cellule photovoltaïque. Toutefois, nous commencerons ce chapitre par une introduction à l'énergie solaire photovoltaïque et son potentiel dans le développement humain et dans le développement des pays tel que l'Algérie.

## I.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire représente une alternative aux énergies fossiles habituelles. Disponible en grande quantité à notre échelle et répartie sur toute la surface de la terre, elle permet de récupérer jusqu'à  $1000\text{W/m}^2$  dans les zones tempérées. Que l'on soit en milieu urbain ou au contraire, en site isolé, cette énergie peut être récupérée et utilisée sous forme thermique ou électrique [1], il existe différents types d'énergies solaires [2] :

- a) **L'énergie passive** : Ce type d'énergie va être utilisé pour le chauffage, l'éclairage naturel et la climatisation des locaux.
- b) **L'énergie solaire thermique** : Cette énergie est la transformation des rayons du soleil en énergie thermique (chaleur).
- c) **L'énergie thermodynamique** : Cette énergie est l'un des modes de valorisation du rayonnement solaire direct. Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire à l'aide de collecteurs pour chauffer un fluide à haute température qui va produire de vapeur à haute pression qui est ensuite turbinée.
- d) **L'énergie photovoltaïque** : Énergie solaire photovoltaïque Désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. Elle résulte de la conversion directe dans un semi-conducteur d'un photon en électron.

Dans notre travail, nous nous intéressons particulièrement à l'énergie solaire photovoltaïque.

## I.2.1 Les types de rayonnement

On définit quatre types de rayonnement (voir Figure I.1) :

- a) **Le rayonnement direct** : Est le rayonnement reçu directement du Soleil. Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.
- b) **Le rayonnement diffus** : Est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec écran masquant le soleil.
- c) **Le rayonnement solaire réfléchi ou l'albédo du sol** : Est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige) [2] [3].
- d) **Le rayonnement global** : Est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran [4] [5] [6].

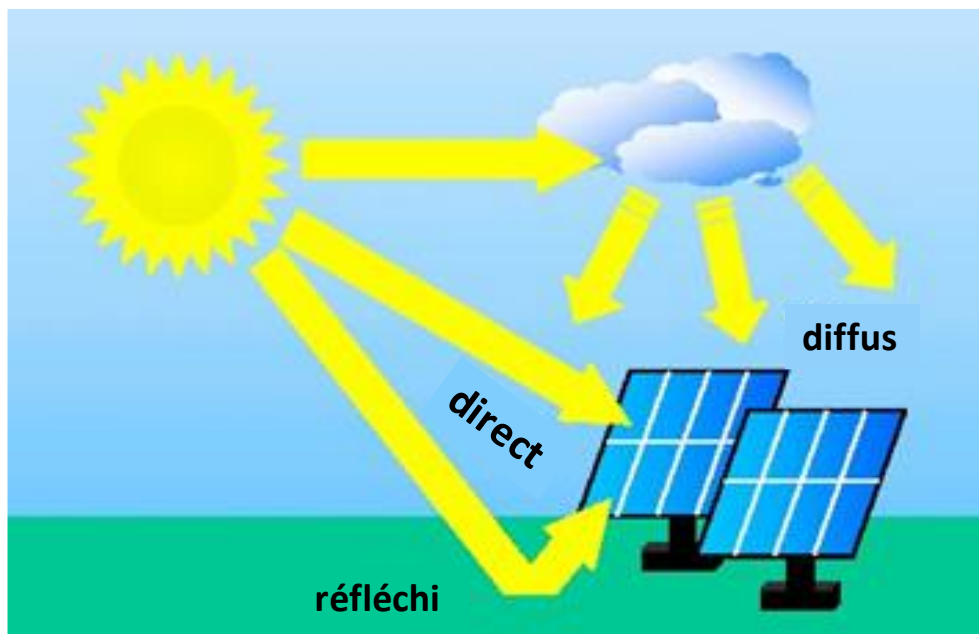


Figure I.1 – Les différents rayonnements solaires.

## I.2.2 Caractéristiques du Rayonnement Solaire

L'irradiance est la mesure de la densité de puissance de la lumière du soleil, elle est mesurée en  $\text{W}/\text{m}^2$ . L'irradiance est ainsi, une quantité instantanée. La constante solaire correspond à l'irradiance venant du soleil et reçue par la terre au-dessus de l'atmosphère.

L'irradiation est la mesure de la densité d'énergie de la lumière du soleil, elle est mesurée en  $(\text{kWh} / \text{m}^2)$ . L'irradiation est souvent exprimée en « heures de puissance crête », qui correspond à la durée en heures, à un niveau d'irradiance constant de  $1\text{kW} / \text{m}^2$ , nécessaire pour produire l'irradiation quotidienne. Le nombre d'heures de puissance crête est obtenu par intégration de l'irradiance sur toutes les heures de clarté (Figure I.2).

L'irradiance et l'irradiation dépendent de l'emplacement, des conditions climatiques et de la période de l'année. Elles dépendent aussi de l'ombre des arbres et des bâtiments qui pourrait exister et de l'inclinaison de la surface.

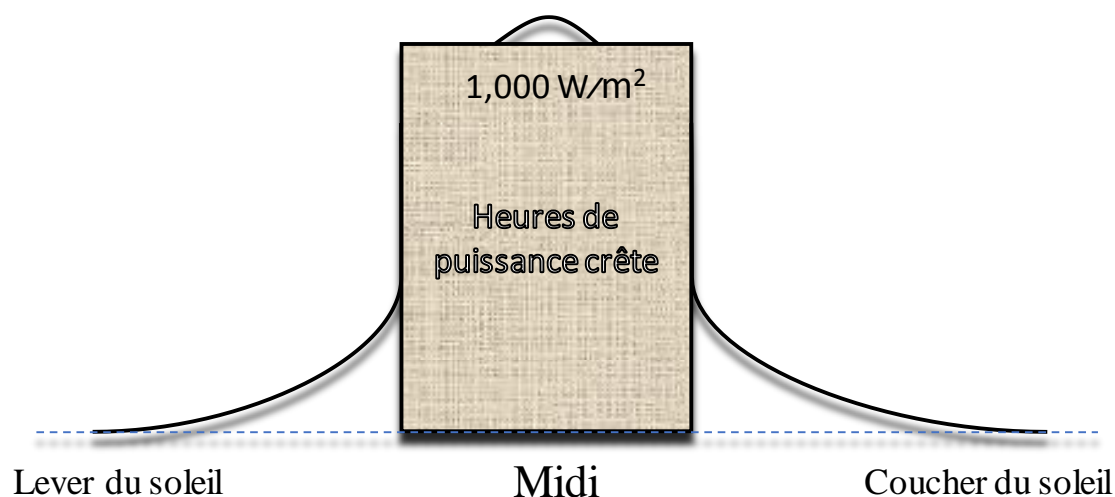


Figure I.2 – Heure de puissance crête.

## I.2.3 Situation actuelle de l'énergie solaire photovoltaïque

La Figure I.3 donne l'évolution de la capacité et ajouts annuels mondiaux d'énergie solaire photovoltaïque de 2011 à 2020, cela confirme l'augmentation exponentielle de l'énergie produite de nature photovoltaïque [7].

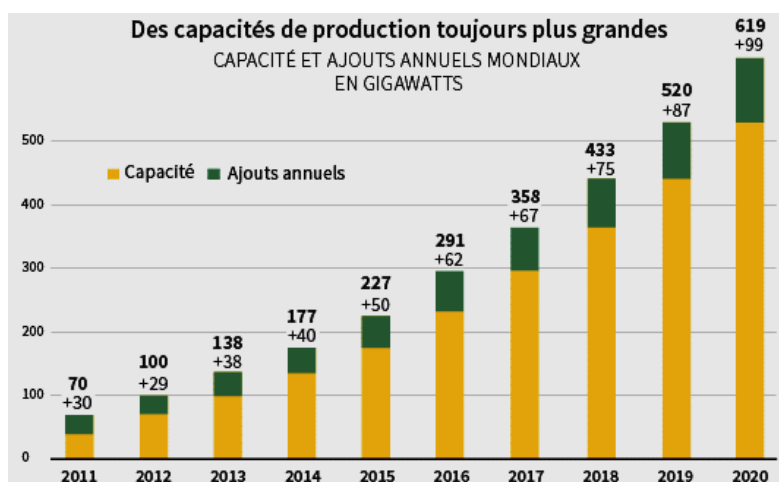


Figure I.3 – Capacité ajouts annuels mondiaux d'énergie solaire photovoltaïque 2011-2020.

## I.2.4 Potentiel solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de  $1\text{m}^2$  est de l'ordre de 5KWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de  $1700\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}$  au nord et  $2263\text{kwh}/\text{m}^2/\text{an}$  au sud du pays. Au Sahara, ce potentiel peut constituer un facteur important de développement durable s'il est exploité de manière économique. Le tableau suivant indique le taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie [2] [8] [9].

Tableau I.1 – Taux d'ensoleillement pour chaque région de l'Algérie.

Régions	Régions côtières	Hauts plateaux	Sahara
<b>Superficie</b>	4 %	10 %	86 %
<b>Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)</b>	2650	3000	3500
<b>Energie moyenne reçue (<math>\text{KWh}/\text{m}^2/\text{an}</math>)</b>	1700	1900	2650

Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh/an.

Le volet de l'énergie solaire le plus utilisé dans notre pays est le solaire photovoltaïque, les autres volets solaire, thermique et thermodynamique, restent toujours au stade expérimental. Toutefois, la complexité des procédés de fabrication des modules photovoltaïques et les rendements de production faibles entraînent des coûts très élevés, ce qui freine son développement.

La Figure I.4 quant à elle donne le potentiel solaire en Algérie [8].

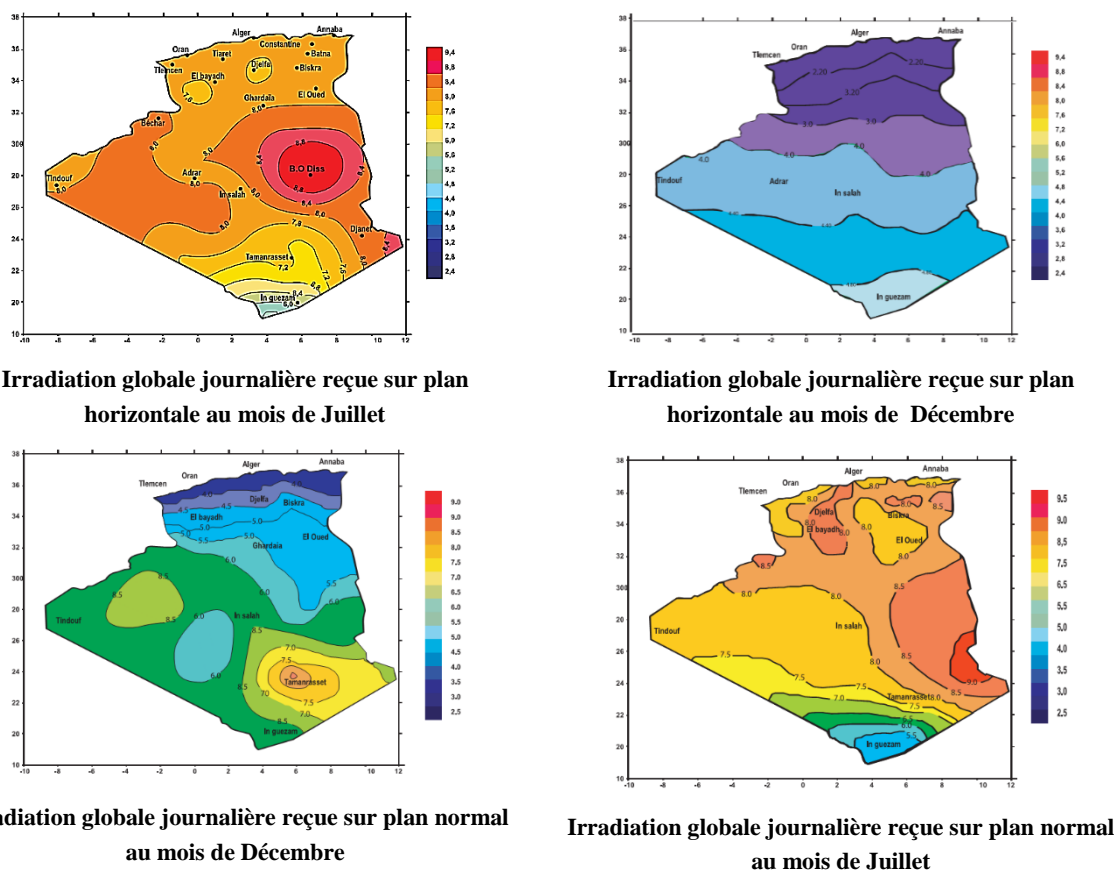


Figure I.4 – Potentiel solaire en Algérie.

## I.2.5 La future d'énergie solaire photovoltaïque en Algérie

Cette énergie est une source d'énergie non polluante qui répond parfaitement aux besoins des sites isolés et dont le raccordement au réseau électrique est trop onéreux. Modulaires, ses composants se prêtent bien à une utilisation innovante et esthétique en architecture. La stratégie énergétique de l'Algérie repose sur l'accélération du développement de l'énergie solaire. Le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques d'une capacité totale d'environ 800 MW d'ici 2020. D'autres projets d'une capacité de 200 MW par an devraient être réalisés sur la période 2021-2030 [2] [10].

## I.3 Le générateur photovoltaïque

Notre travail est consacré à la valorisation de l'énergie photovoltaïque, de ce fait nous allons dans un premier temps décrire l'élément essentiel de la chaîne de conversion photovoltaïque, qui est le générateur PV. Le générateur PV permet de transformer l'énergie issue des photons en électricité, en utilisant le principe de l'effet photovoltaïque [1].

### I.3.1 Constitution d'un générateur photovoltaïque

La cellule photovoltaïque élémentaire constitue un générateur de très faible puissance [11]. La cellule PV fait à peu près  $150 \text{ cm}^2$ , produit 2,3 Watt-crête (Wc) sous approximativement 0,5 Volt. Cette faible puissance est généralement insuffisante pour la majorité des applications PV domestiques ou industrielles. Afin de fournir au récepteur extérieur une tension et une puissance adéquates, plusieurs cellules PV doivent être connectées entre elles en série, pour former ce qu'on appelle : « un module ». Les modules peuvent être assemblés en série et/ou en parallèle pour former des panneaux (Figure I.5), eux-mêmes interconnectés pour former un champ PV.

La Figure I.5, représente une cellule, un module et un panneau PV.

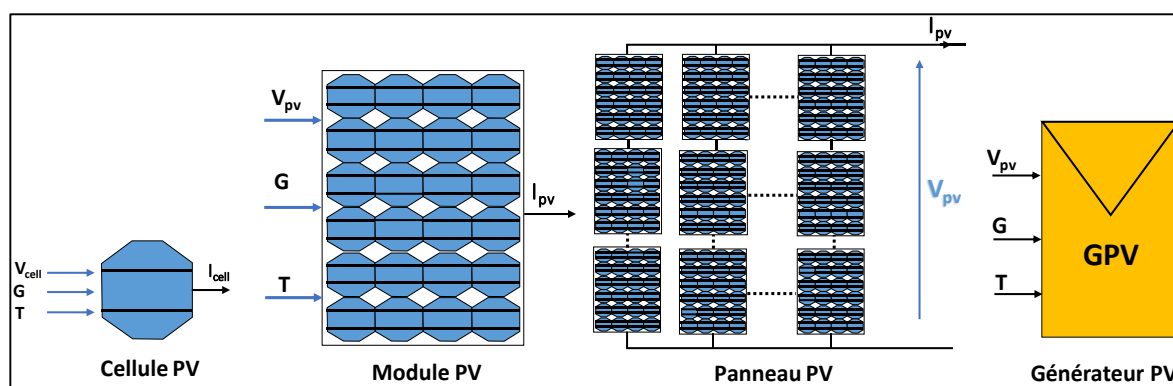


Figure I.5 – Structure d'une source solaire photovoltaïque (cellule, module et panneau PV).

### I.3.2 La cellule photovoltaïque

#### I.3.2.1 Définition

Les cellules photovoltaïques (voir Figure I.6) sont des composants électroniques à semi-conducteurs (généralement faites de silicium sous ses différentes formes). Elles convertissent directement l'énergie lumineuse en électricité courant continu basse tension (effet photovoltaïque). Comme l'énergie lumineuse est le soleil, on parle alors de cellules solaires [8].



Figure I.6 – Une cellule photovoltaïque.

### I.3.2.2 Effet photovoltaïque

Le composant de base de la transformation lumière-électricité est la cellule photovoltaïque, elle est réalisée en associant un matériau semi-conducteur dopé P à un autre semi-conducteur dopé N pour obtenir ainsi une jonction PN (voir Figure I.7) [12]. L'énergie produite par l'absorption d'un photon dans un matériau se traduit du point de vue électrique par la création d'une paire électron-trou. Cette réaction entraîne une différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, c'est l'effet photovoltaïque [13].

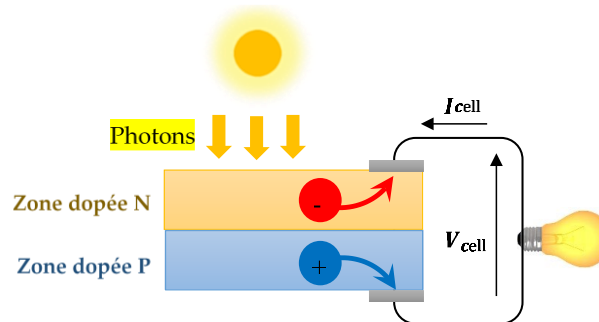


Figure I.7 – Schéma de principe de la conversion photoélectrique.

### I.3.2.3 Les différents types de cellules photovoltaïques

Plusieurs technologies sont actuellement développées pour réaliser des cellules photovoltaïques dont les degrés de maturité, de performance et de durée de vie sont très différents.

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, on le trouve dans la nature sous forme de pierre de silice.

Les différents types de cellules PV existants sont [14] :

- Cellule en silicium amorphe (rendement : 6 à 10%) ;
- Cellule en silicium monocristallin (rendement : 13 à 17%) ;
- Cellule en silicium polycristallin (rendement : 11 à 15%).

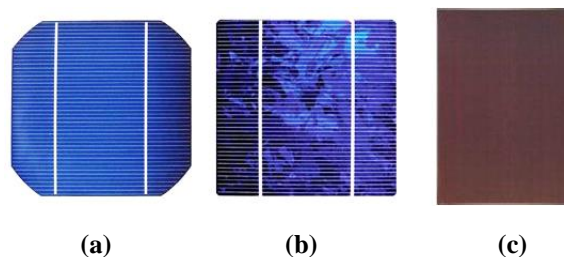


Figure I.8 – Différents types de la cellule photovoltaïque : (a) silicium monocristallin, (b) silicium polycristallin, (c) silicium amorphe.

Le tableau suivant résume les principaux avantages et inconvénients de différentes catégories des cellules [15] :

**Tableau I.2 – Avantages et inconvénients des cellules solaires à base de silicium.**

<b>Matériau de la cellule</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>	<b>Principales utilisations</b>
<b>Cellule en Silicium Amorphe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Très faibles épaisseurs.</li> <li>- Fonctionne avec un faible éclairement et sous ombrage Partiel.</li> <li>- Moins sensible aux températures élevées.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rendement faible en plein soleil.</li> <li>- Dégradation sous lumière (instabilité dite de Staebler-Wronski ).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Appareils électroniques.</li> <li>-Intégration dans le bâtiment</li> </ul>
<b>Cellule en Silicium Monocristallin</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Très bon rendement.</li> <li>- Le plus retrouvé sur le marché mondial</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Coût élevé.</li> <li>- Sensible à la température élevée.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aérospatiale, modules pour toits, façades</li> </ul>
<b>Cellule en Silicium polycristallin</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Bon rendement de conversion, environ 100 w/m<sup>2</sup>.</li> <li>- Lingot moins cher à produire.</li> <li>- Le moins sensible à la température élevée.</li> <li>- Adapté à la production à grande échelle.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rendement faible sous un faible éclairement.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Dans les zones chaudes pour toits, façades et générateurs.</li> </ul>

### I.3.3 Association des cellules photovoltaïques

A partir de l'association en série et/ou en parallèle on obtient un module photovoltaïque. La connexion en série augmente la tension pour un même courant alors que la connexion en parallèle augmente le courant pour une tension identique [16] [17].

Pour que l'électricité générée soit utilisable pour nos applications, il est donc nécessaire d'associer entre elles un grand nombre de cellules. La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V [17].

### I.3.3.1 Association en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné.

La Figure I.9 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série  $N_s$  cellules Identiques.

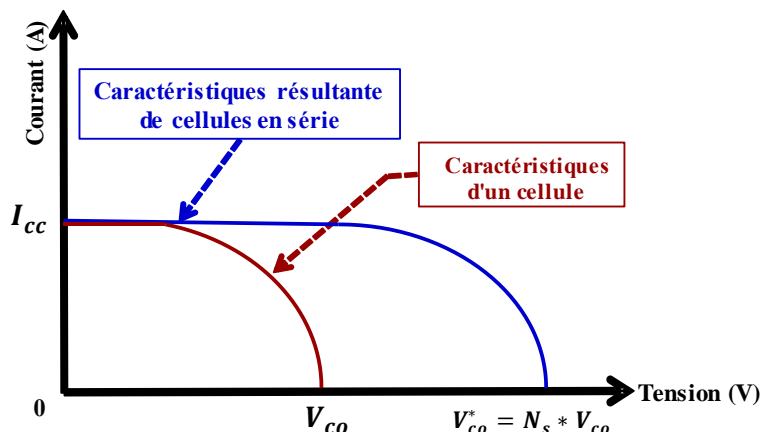


Figure I.9 – Courbe  $I=f(V)$  d'une association série de cellules photovoltaïques.

### I.3.3.2 Association en parallèle

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante de groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée.

La Figure I.10 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèles  $N_p$  cellules identiques.

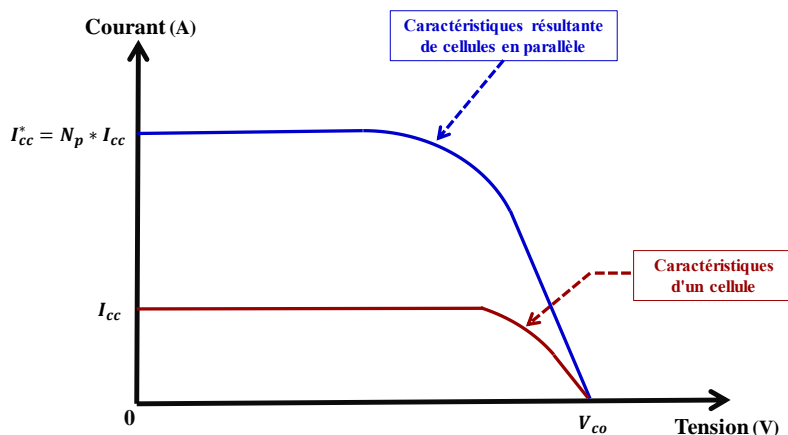


Figure I.10 – Courbe I-V d'une association parallèle de cellules photovoltaïques.

### I.3.3.3 Association hybride (en série et en parallèle)

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à circuit ouvert totale sont données par les relations :

$$\begin{cases} I_{CC} = N_p \times I_{CC} \\ V_{OC} = N_s \times V_{OC} \end{cases} \quad (I.1)$$

Avec :

- $N_p$  : nombre des cellules en parallèle ;
- $N_s$  : nombre des cellules en série.

La Figure I.11 montre la caractéristique résultante obtenue en associant en série  $N_s$  et en parallèle  $N_p$  cellules identiques.

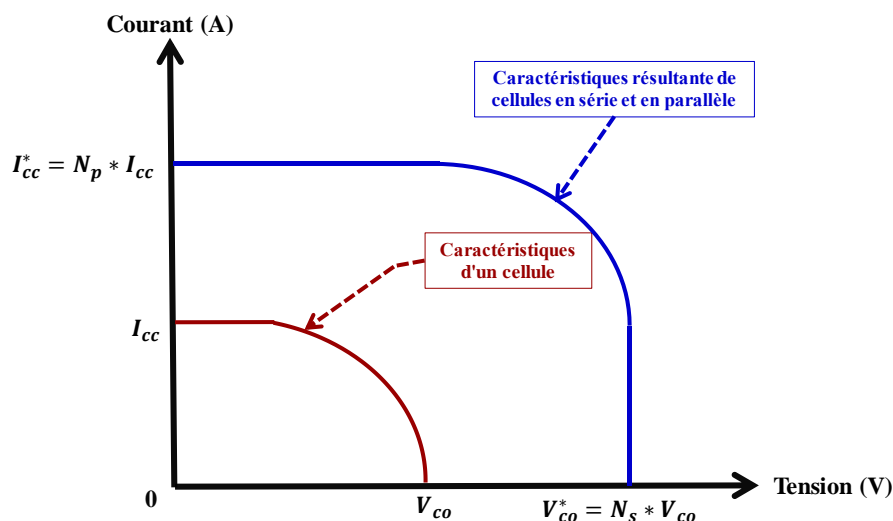


Figure I.11 – Caractéristique résultante d'un groupement hybride de  $(N_p + N_s)$  cellules identiques.

Selon l'association en série et/ou parallèle de ces cellules, les valeurs du courant de court-circuit  $I_{cc}$  et de la tension à vide  $V_{oc}$  sont plus ou moins importantes (Figure I.11). La caractéristique d'un générateur PV constitué de plusieurs cellules à une allure générale assimilable à celle d'une cellule élémentaire, sous réserve qu'il n'y ait pas de déséquilibre entre les caractéristiques de chaque cellule (irradiation et température uniformes) [18] [19].

## I.4 Caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque

Sous un éclairage donné, tout module photovoltaïque est caractérisé par une courbe courant-tension ( $I_{PV} - V_{PV}$ ) et par une courbe puissance-tension ( $P_{PV} - V_{PV}$ ). Trois grandeurs physiques définissent ces caractéristiques :

- **La tension en circuit ouvert** -  $V_{CO}$  (tension à vide) : Cette valeur représente la tension générée par un module éclairée non raccordée.
- **Le courant de court-circuit** -  $I_{CC}$  : Cette valeur représente le courant généré par un module éclairée raccordée à elle-même.
- **Le Point de Puissance Maximal** - PPM : Obtenu pour une tension et un courant optimal :  $V_{OPT}$ ,  $I_{OPT}$  (parfois appelés aussi  $V_{PPM}$ ,  $I_{PPM}$ ). [16].

Dans la suite de ce chapitre, nous allons présenter les différentes données et caractéristiques électriques correspondants au module photovoltaïque commercial **VICTRON** référencé **PE1080150**. Les principales informations récoltées de ces modules sont données dans la Tableau I.3.

**Tableau I.3 –Paramètres du module photovoltaïque de type VICTRON 100W.**

Dimensions Module	1195 x 545 x 35 mm
Poids	<b>8 kg</b>
Puissance nominale $P_{mpp}^*$	<b>100 W</b>
Tension à puissance max. $V_{mpp}^*$	<b>18 V</b>
Courant à puissance max. $I_{mpp}^*$	<b>5,56 A</b>
Tension en circuit ouvert $V_{oc}$	<b>22,4 V</b>
Courant de court-circuit $I_{sc}$	<b>6,53 A</b>
Puissance nominale (tolérance +/- 3%)	<b>100 W</b>
Type de cellules	<b>Monocristallin</b>
Nombre de cellules couplées en série	<b>36</b>
Tension maximale système	<b>1000 V</b>
Coefficient de température de $P_{mpp}$ (%)	<b>-0,48/°C</b>
Coefficient de température de $V_{oc}$ (%)	<b>-0,34/°C</b>
Coefficient de température de $I_{sc}$ (%)	<b>+0,037/°C</b>

### I.4.1 Caractéristique courant tension ( $I_{pv}$ - $V_{pv}$ )

Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante. La caractéristique réelle est représentée sur Figure I.12.

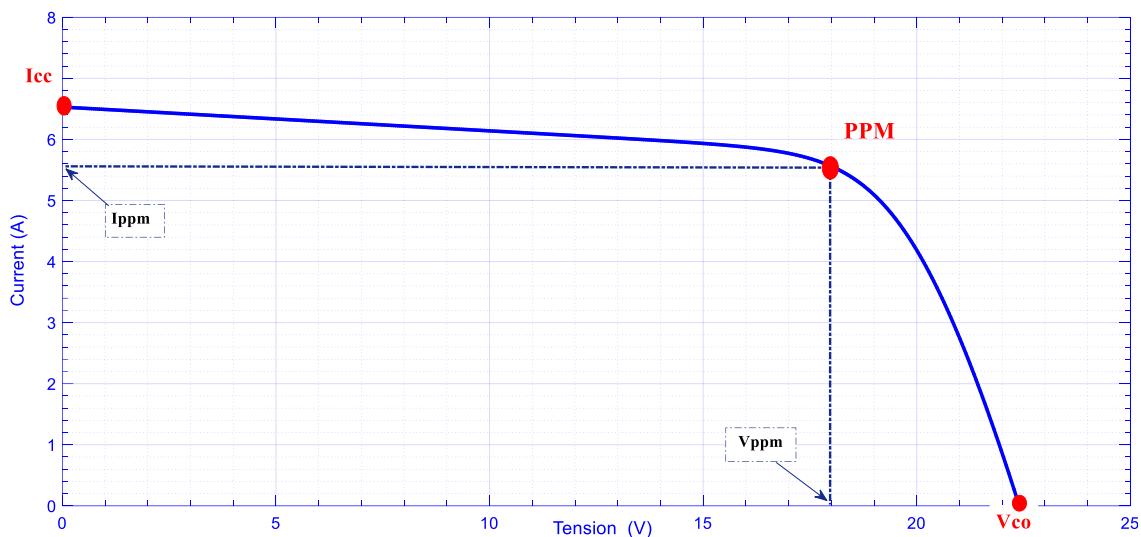


Figure I.12 – Caractéristique I-V d'un module photovoltaïque.

### I.4.2 Caractéristique puissance tension ( $P_{pv}$ - $V_{pv}$ )

La puissance débitée par le module photovoltaïque dépend du point de fonctionnement de cette dernière, c'est le produit de l'intensité de courant et de la tension entre ses bornes. La caractéristique réelle ( $P_{pv}$ - $V_{pv}$ ) est représentée sur la Figure I.13.

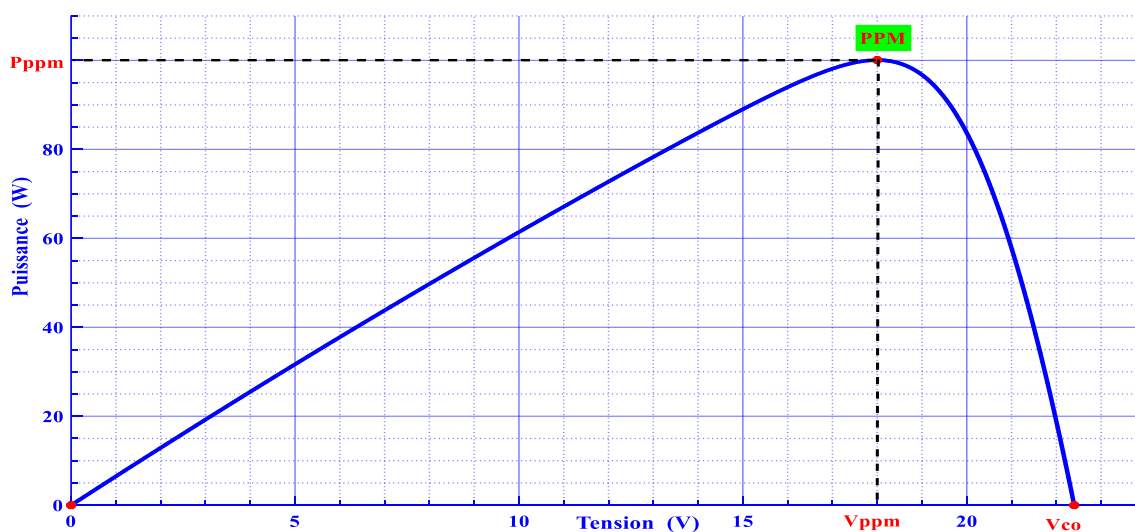


Figure I.13 – Caractéristique P-V d'un module photovoltaïque.

### I.4.3 Zones de fonctionnement d'un module photovoltaïque

La Figure I.14 montre les différentes zones de fonctionnement d'un module photovoltaïque sur la caractéristique ( $I_{PV}$ - $V_{PV}$ ).

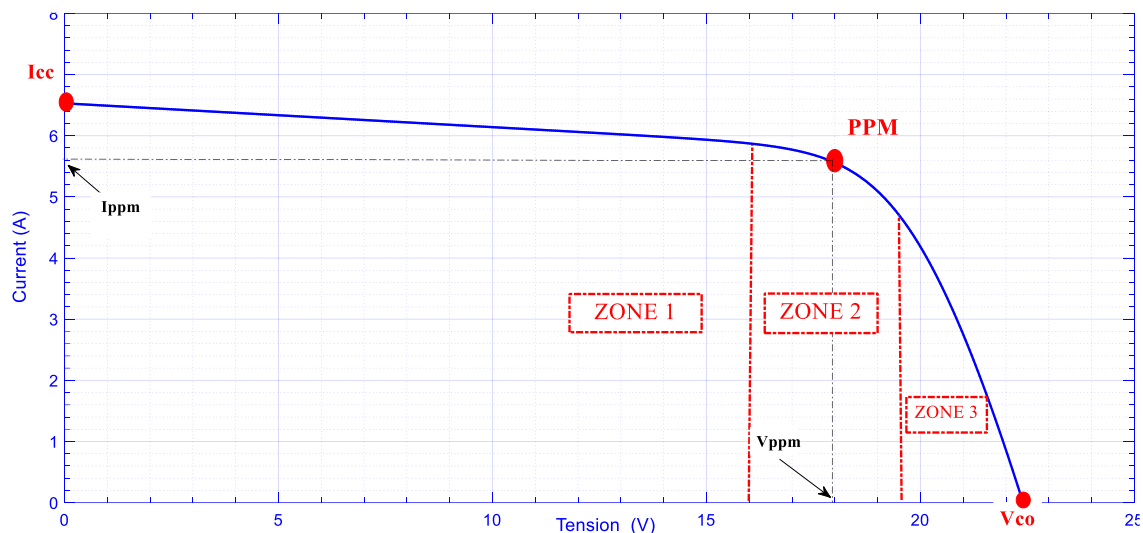


Figure I.14 – Caractéristique I-V d'un module photovoltaïque.

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairement et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe  $I_{pv}$  ( $V_{pv}$ ) est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque. La Figure I.14 représente trois zones essentielles de fonctionnement : [23][24] [25] :

- ❖ **Zone 1** : Le courant est quasiment constant quel que soit la variation de la tension. (Le module se comporte comme un générateur de courant).
- ❖ **Zone 2** : C'est la zone où le module délivre son maximum de puissance.
- ❖ **Zones 3** : La tension est presque constante, et le courant varie. (Le module se comporte comme un générateur de tension).

## I.5 Influence de la température et de l'éclairement sur un module photovoltaïque

L'éclairement et la température dans le milieu où est situé le module sont les deux paramètres qui influent sur la caractéristique courant tension et par conséquent sur la puissance délivrée par le module.

## I.5.1 Influence de la température

La température du milieu où se situe le module est un paramètre qui influence le profil de la caractéristique courant-tension d'un module photovoltaïque. Un module photovoltaïque convertit une partie du rayonnement en énergie électrique et le reste est convertit en grande partie sous forme de chaleur. La température du module photovoltaïque induit un effet notable sur la tension de celle-ci. Par contre, l'effet de la température sur le courant du module photovoltaïque est négligeable [16].

Il apparaît que plus la température du milieu du module augmente, plus la tension à vide de celle-ci diminue. La puissance du module étant égale au produit du courant et de la tension, la même remarque s'applique sur la courbe puissance (Figure I.16).

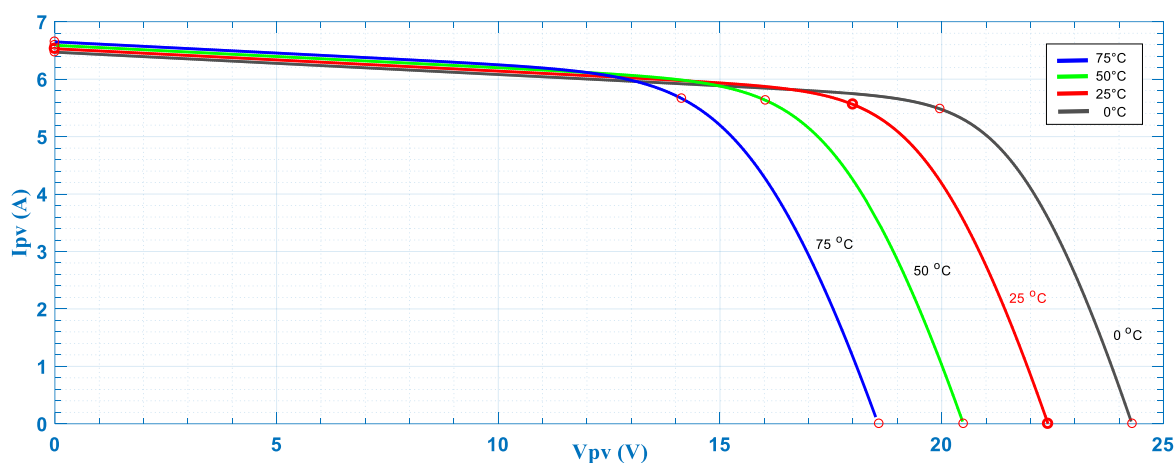


Figure I.15 – Influence de la température sur la caractéristique I-V avec un éclairement de 1000W/m<sup>2</sup>.

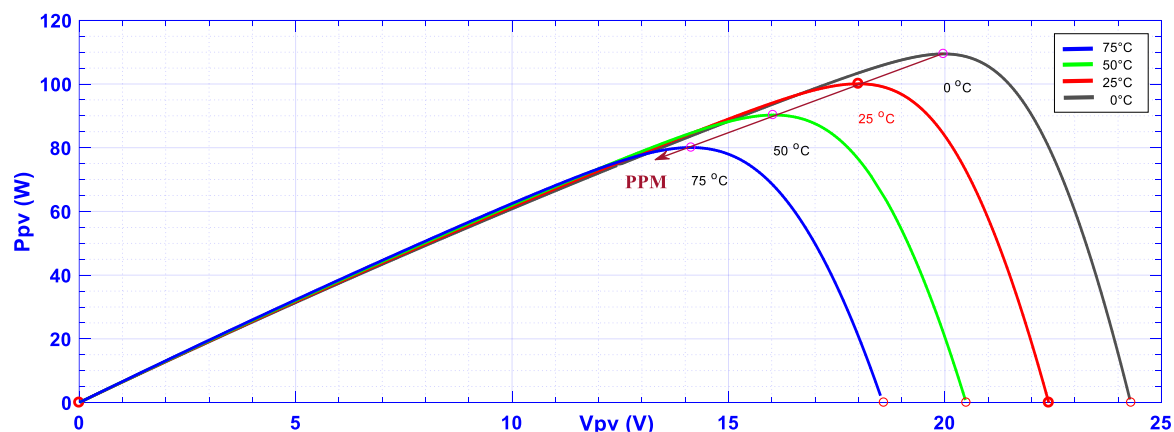


Figure I.16 – Influence de la température sur la caractéristique P-V avec un éclairement de 1000W/m<sup>2</sup>.

## I.5.2 Influence de l'éclairement

Le courant débité par le module dépend fortement du niveau d'éclairement. Le courant de court-circuit est directement proportionnel à l'éclairement, quant à la tension, celle-ci est peu sensible aux variations du niveau d'éclairement.

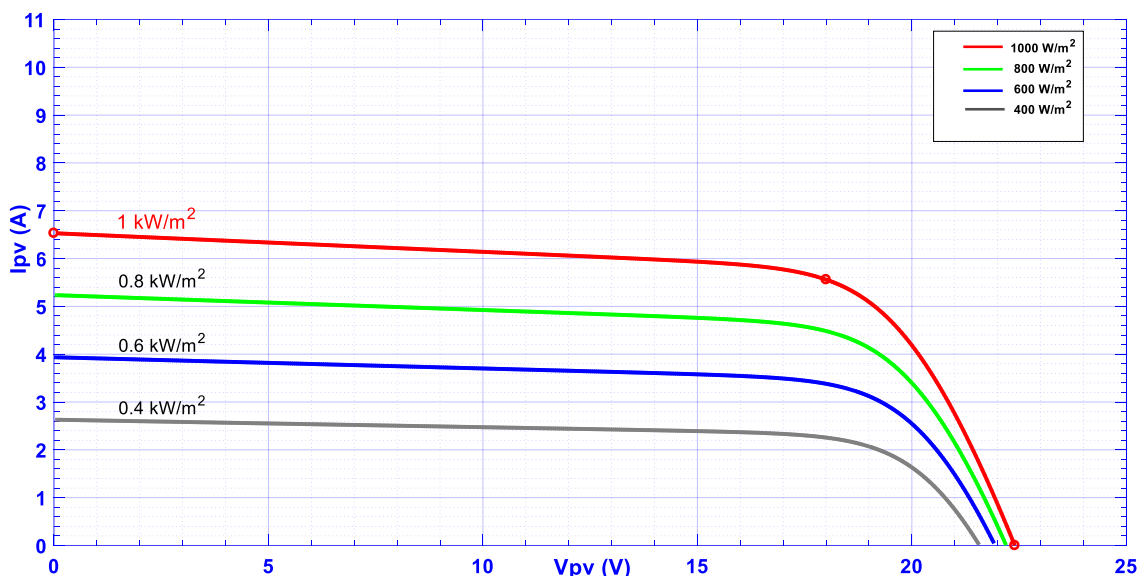


Figure I.17 – Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V avec un température de 25°C.

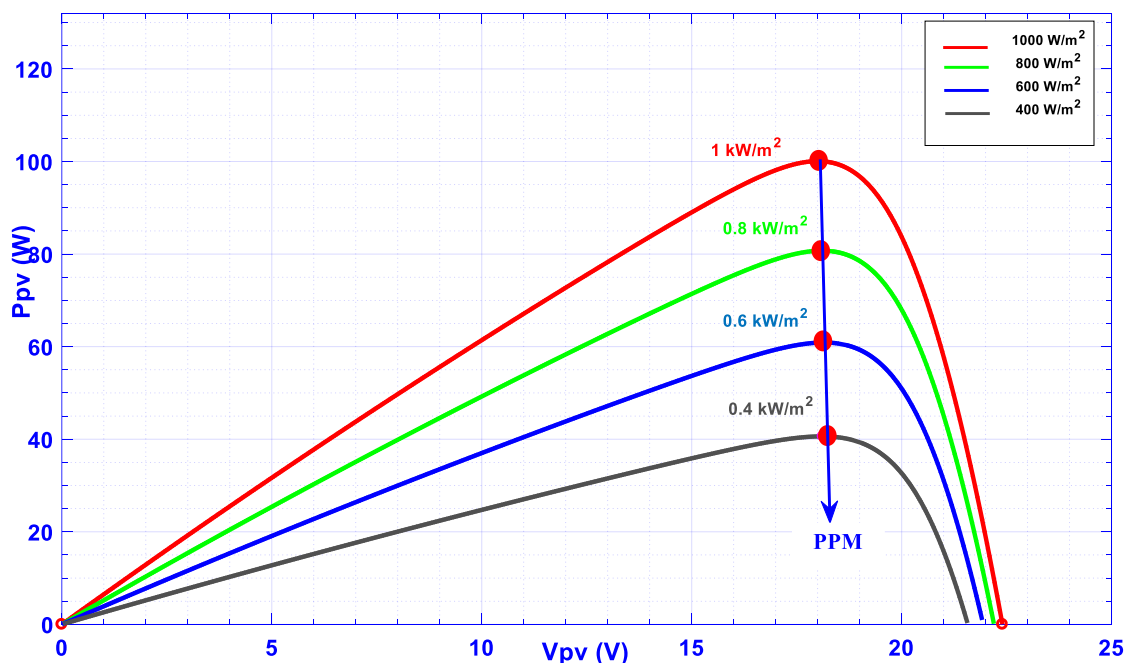


Figure I.18 – Influence de l'éclairement sur la caractéristique P-V avec une température de 25°C.

## I.6 Les différentes architectures des systèmes PV

En général, il existe trois types d'installation des systèmes photovoltaïques : système connecté au réseau, système autonome et système hybride. Les deux derniers sont indépendants du service public de distribution d'électricité ; on les retrouve souvent dans les régions éloignées du réseau électrique.

### I.6.1 Système connecté au réseau

Dans ce système, l'énergie issue des panneaux PV est injectée dans le réseau local ou national, ce qui permet la décentralisation du réseau électrique. Une telle approche permet de produire sa propre électricité en périodes ensoleillées et d'acheminer son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel le client s'approvisionne au besoin.

La Figure I.19 illustre une architecture d'un système PV connecté « Grid-Connected PV System ».

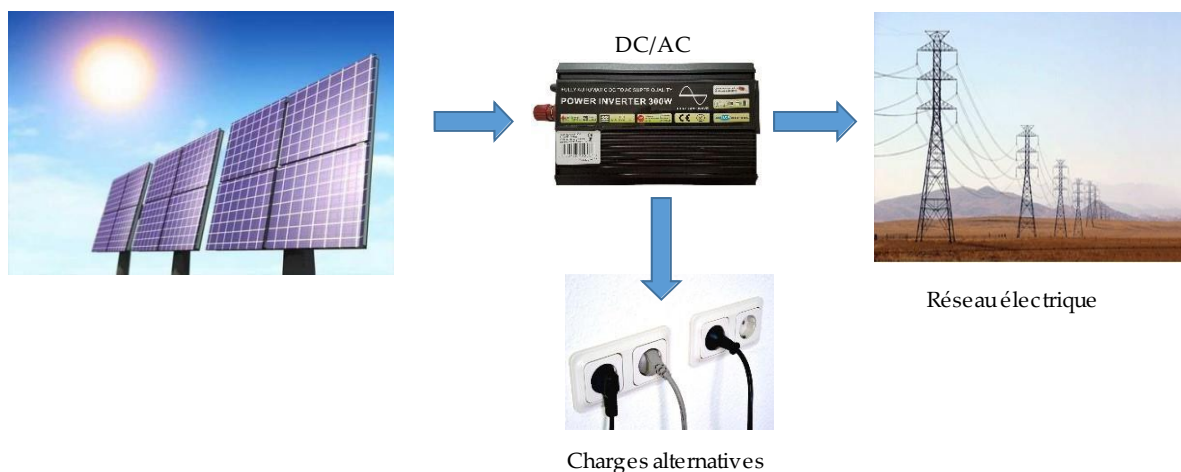


Figure I.19 – Système PV connecté au réseau électrique.

### I.6.2 Système autonome

Le système PV autonome « Stand Alone PV system » (Figure I.20) est utilisé en général dans les localités isolées. Dans ce cas, il est souvent nécessaire d'utiliser une batterie pour stoker l'énergie et un onduleur (convertisseur DC/AC) pour faire fonctionner les appareils à courant alternatif [26].

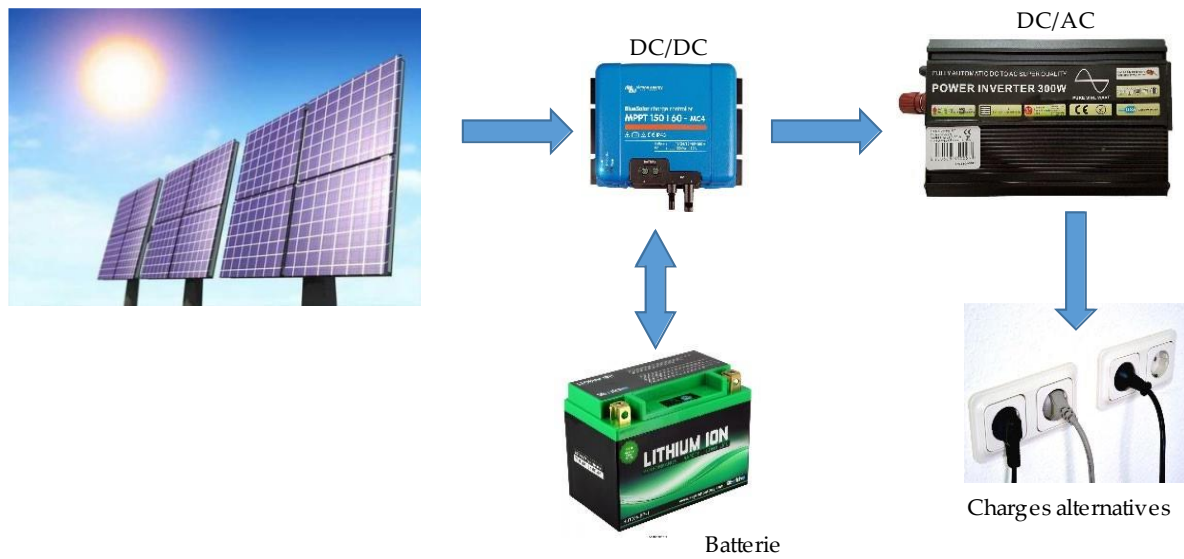


Figure I.20 – Système PV autonome.

### I.6.3 Système hybride

Le système PV peut être connecté avec d'autres sources renouvelables (Eolien par exemple) et un groupe électrogène pour former un système hybride pouvant fonctionner dans toutes les conditions avec une génération optimale d'énergie, la Figure I.21 schématise un système hybride [27].

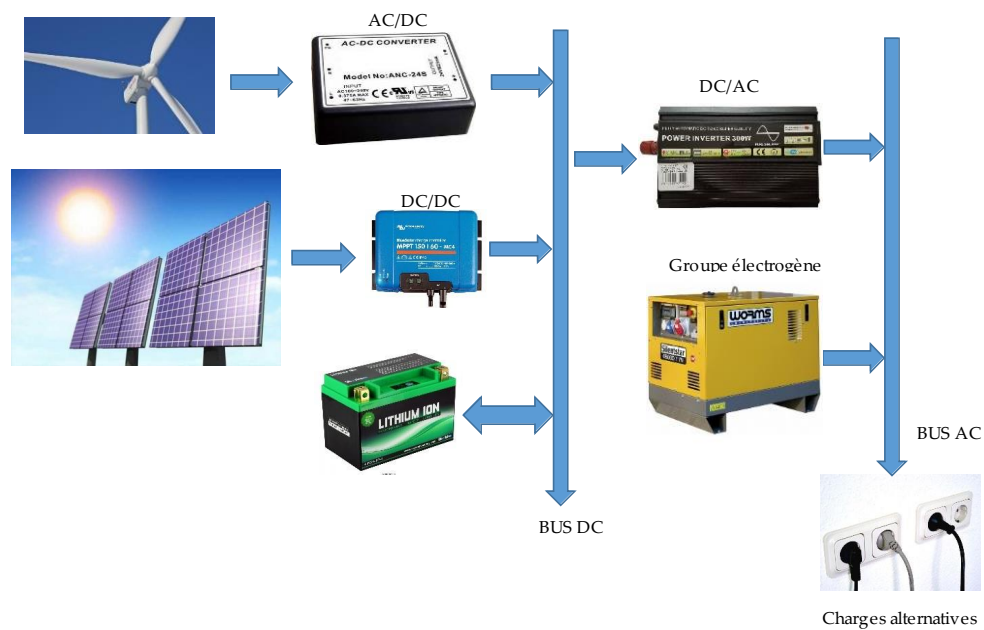


Figure I.21 – Système PV hybride.

## **I.7 Avantages et inconvénients d'énergie photovoltaïque**

Les systèmes photovoltaïques offrent de nombreux avantages tout en ayant quelques inconvénients [8] [19] [29] :

### **I.7.1 Les avantages**

Les principaux avantages de l'énergie photovoltaïque sont :

- Sa fiabilité et la longue vie de l'installation.
- Longue durée de vie des panneaux solaires
- Son coup de maintenance bas.
- Son potentiel illimité. 5% de la surface des déserts suffiraient pour alimenter la planète entière.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- L'utilisation de l'énergie solaire permet d'éviter l'utilisation d'énergies fossiles ou nucléaires pour fabriquer la même quantité d'électricité et donc de diminuer d'autant les émissions de gaz à effet de serre ou la production de déchets nucléaires.
- Sa flexibilité (dimensionnement selon les besoins, modularité).

### **I.7.2 Les inconvénients :**

Les inconvénients de l'énergie photovoltaïque sont :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%).
- Beaucoup d'appareils vendus dans le marché fonctionnent au 220 à 230 V alternatif. Or, l'énergie issue du générateur PV est unidirectionnelle et de faible voltage (<30V), elle doit donc être transformée par l'intermédiaire d'un onduleur.
- Lorsque le stockage de l'énergie électrique est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru. La fiabilité et les performances du système dépendent de la batterie et les composants de régulations associés.

- La puissance est réduite lorsque les conditions climatiques sont défavorables.
- Occupation d'un espace important pour les installations de grandes dimensions.

## **I.8 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelques notions sur le rayonnement solaire, ainsi nous avons représenté le principe de la conversion photovoltaïque. Nous avons présenté également l'influence des conditions climatiques (irradiation solaire, degré de température) et les différentes associations des cellules pour la réalisation de module PV. Les modules peuvent également être connectés en série et/ou en parallèle pour construire le générateur photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation.

## **Chapitre II. Modélisations et dimensionnement d'un système photovoltaïque**

*« Une personne qui n'a jamais commis d'erreurs n'a jamais tenté d'innover ».*

*Albert Einstein.*

# Chapitre II. Modélisations et dimensionnement d'un système photovoltaïque

## II.1 Introduction

Un générateur photovoltaïque peut fonctionner dans une large gamme de tension et de courant de sortie mais la caractéristique de la puissance d'un panneau photovoltaïque n'est pas linéaire en fonction de la tension à ses bornes. On a vu dans le chapitre précédent que les caractéristiques I-V et P-V du générateur dépendent de l'éclairement solaire et de la température. À cause de cela, on intercale souvent entre le générateur et le récepteur un convertisseur statique commandé permettant de poursuivre le point de puissance maximale.

Après avoir étudié et citer les différents composants du système photovoltaïque, nous procédons à la modélisation du système. De nombreux articles publiés dans la littérature scientifique portent sur le développement de modèles pour chacun des composants du système.

Dans ce chapitre nous allons présenter les principes de conversion dans les systèmes PV. Ensuite nous allons présenter les différents couplages du générateur avec charge résistive, où nous allons mettre en avons la modélisation différents dispositifs du système photovoltaïque. Enfin, nous allons dimensionner les différentes parties du notre système, ceci après avoir fixé notre cahier des charges.

## II.2 Les principes de conversion dans les systèmes PV

Le générateur PV est le cœur d'un système PV. Cependant, pour une application pratique, d'autres éléments sont nécessaires, par exemple pour le stockage de l'énergie, pour la régulation de la circulation du flux d'énergie ou pour l'alimentation du réseau alternatif. Ces composants supplémentaires représentent une part considérable de chaîne de conversion et qui provoquent la réduction du rendement et influencent considérablement le comportement et les performances de tout le système [8].

### II.2.1 Couplage direct d'un générateur PV et une charge résistive

Actuellement, il reste encore beaucoup d'applications où une connexion directe entre un GPV et une charge est effectuée. Ce choix est principalement lié à la simplicité de l'opération et au très haut degré de fiabilité et son faible coût [30]. Mais elle ne garantit pas un transfert optimal de l'énergie du GPV vers la charge. Cette configuration est illustrée à (Figure II.1) la diode anti-retour placée entre le GPV et la charge sert de protection.

Dans le cas où une charge résistive est directement connectée à une source linéaire, les valeurs du courant et de la tension pour chaque point de fonctionnement sont facilement calculées en utilisant la loi d'Ohm. Par contre, lorsque la source est de nature non linéaire, comme c'est le cas pour le GPV, une méthode graphique est nécessaire. Le point de fonctionnement est alors déterminé par l'intersection de la caractéristique I/V du GPV et la courbe de la charge.

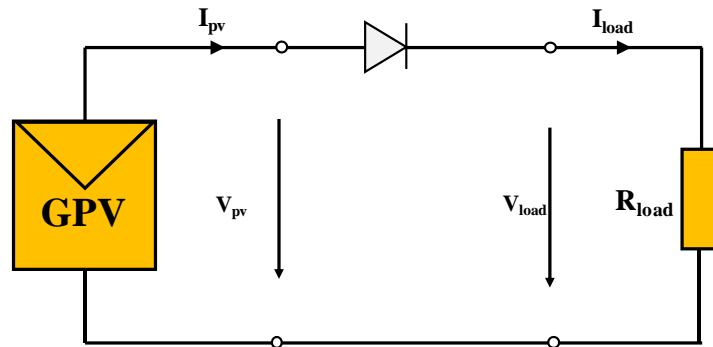


Figure II.1 – Couplage direct d'un GPV et une charge résistive.

La Figure II.2 montre les caractéristiques I/V d'un GPV et d'une résistance. Pour une charge résistive, la caractéristique I/V est une droite de pente  $1/R$ . Dans la région BC sur la courbe, le GPV ne peut être caractérisé ni par une source de courant, ni par une source de tension. C'est dans cette zone que se trouve le MPP pour des conditions atmosphériques fixées. La valeur de la résistance correspondant à ce point est notée  $R_{eq}$ .

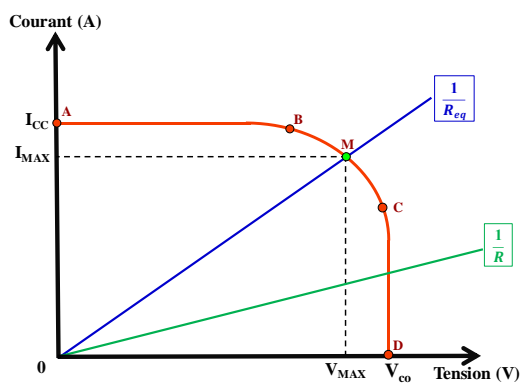


Figure II.2 – Caractéristique I/V d'un GPV et d'une charge résistive.

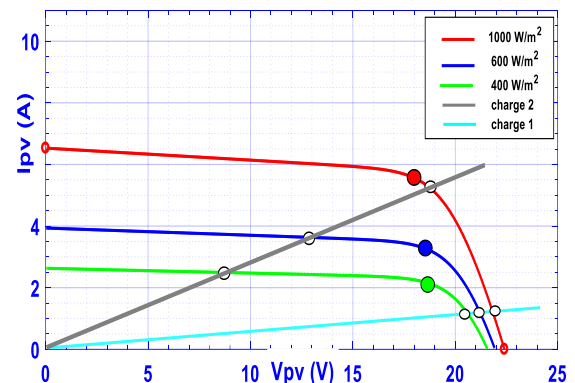


Figure II.3 – Points de fonctionnement pour différents niveaux de rayonnement.

Les courbes caractéristiques d'un GPV pour différents niveaux de rayonnement, ainsi que celles de deux charges résistives sont représentées sur Figure II.3. L'intersection des courbes indique le point de fonctionnement (la température est supposée constante). Il est clair que l'impédance de la charge impose les conditions de fonctionnement du GPV.

Pour la charge 2, la puissance transmise est optimale pour un niveau de rayonnement de  $1000\text{W/m}^2$ , car le point de fonctionnement dans ce cas est très proche du MPP. À mesure que le niveau de rayonnement baisse, le point de fonctionnement s'éloigne du MPP. La puissance transmise n'est alors plus optimale. La charge 2 est donc plus appropriée pour des niveaux de rayonnement élevés. Par contre, la charge 1 est plus adaptée pour de faibles niveaux de rayonnement. Dans les deux cas, il y a pertes de puissance lors de la variation de l'irradiation. On peut conclure que lors d'un couplage direct d'un GPV et la charge, le point de fonctionnement coïncide rarement avec le MPP. Pour pallier à ce problème, un étage d'adaptation entre la source et la charge est nécessaire.

## II.2.2 Etage d'adaptation entre un générateur PV et une charge

Il est connu qu'un GPV présente des caractéristiques I-V non linéaires avec des MPP. Ces caractéristiques dépendent entre autres du niveau d'éclairement et de la température des cellules. De plus, selon les caractéristiques de la charge sur laquelle le GPV débite, nous pouvons trouver un très fort écart entre la puissance potentielle du générateur et celle réellement transférée à la charge en mode connexion directe.

Afin d'extraire, à chaque instant, le maximum de puissance disponible aux bornes du GPV et de la transférer à la charge, un étage d'adaptation est utilisé (Figure II.4). Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments. Il assure, à travers une action de contrôle, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de  $P_{\text{max}}$  disponible [19].

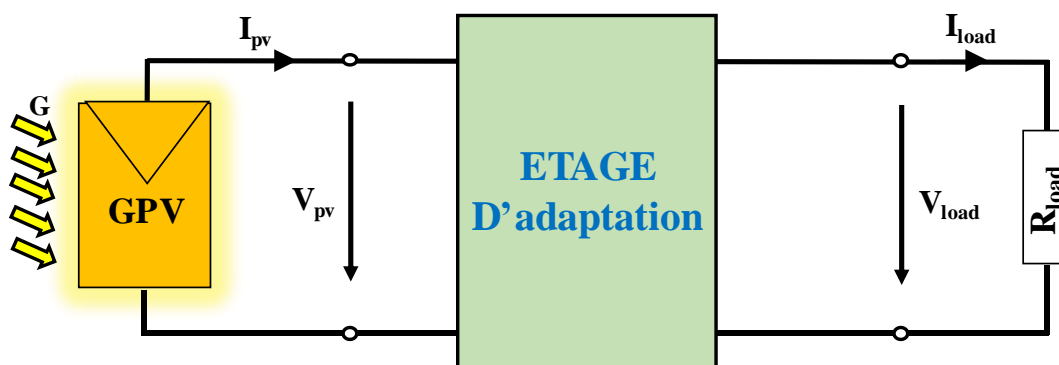


Figure II.4 – Etage d'adaptation jouant le rôle d'interface de puissance entre un GPV et une charge pour le transfert de  $P_{\text{MAX}}$  du GPV.

L'adaptateur communément utilisé en PV est un convertisseur statique (convertisseur de puissance DC/DC). La structure de conversion est choisie en fonction de la charge à alimenter. Elle peut être survolteur ou dévolteur. Si par exemple la charge est une batterie au plomb, ce sont ses plages de tension de charge et de décharge qui vont permettre d'établir le choix et la structure du convertisseur de puissance la plus adéquate.

## II.2.3 Convertisseurs DC-DC

Par objectif, le présent chapitre traite de la conversion DC/DC (continue - continue) qui a pour but de contrôler l'écoulement de l'énergie entre le panneau solaire et la charge (Figure II.5). Les convertisseurs continu-continu sont devenus une composante essentielle des applications industrielles et militaires au cours des dernières décennies. Grâce à leurs rendements de plus en plus élevés, leurs faibles encombrements ainsi que leurs poids et coûts réduits, ils ont remplacé les alimentations classiques linéaires, même pour de faibles niveaux de puissance. Un convertisseur de puissance peut être caractérisé comme un système périodique, non-linéaire et variant au cours du temps en raison de son fonctionnement basé sur le découpage. La topologie des éléments dynamiques du système dépend de l'état instantané de chaque interrupteur commandé, ce qui rend la modélisation complexe [31].

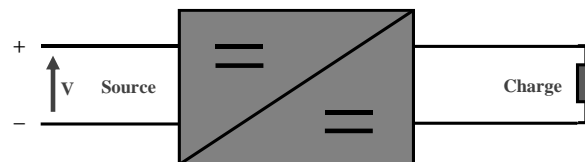


Figure II.5 – Schéma de convertisseur DC/DC.

La gamme de puissance que l'on peut traiter pour ce type de convertisseur s'étend de quelques watts, à des centaines de kilowatts. Cependant, l'apparition de composants de puissance sans cesse plus performants, permet d'envisager le traitement de puissances plus élevées.

Les convertisseurs DC-DC sont de plusieurs topologies. Ils sont classés par catégorie selon la topologie isolée ou non isolée.

### II.2.3.1 Les topologies isolées de la source

Elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage, et qui emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Flyback, en demi-point et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté.

### II.2.3.2 Les topologies non isolées de la source

Ne comportent pas de transformateurs d'isolement, elles sont généralement utilisées dans l'entraînement des moteurs à courant continu. On peut classer les convertisseurs de type non-isolés selon le niveau de tension de sortie sous trois catégories principales :

- Convertisseur élévateur « Boost » ;
- Convertisseur abaisseur « Buck » ;
- Convertisseur abaisseur-élévateur « Buck-Boost ».

Comme on peut ajouter aussi :

- Convertisseur « CUK » ;
- Convertisseur « SEPIC ».

La topologie Buck est employée pour diminuer la tension. La topologie Boost est employée pour augmenter la tension. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le Buck-Boost, le Cuk, et le SEPIC. Les convertisseurs DC-DC peuvent être vus comme des transformateurs DC-DC.

## II.3 Modélisation du système étudié

De nombreuses topologies des systèmes photovoltaïques sont utilisables. Dans notre travail nous allons choisir à étudier un système photovoltaïque autonome. Le schéma du système étudié est représenté sur la Figure II.6. Ce système intégrant une source photovoltaïque (PV), charges de type DC et un convertisseurs DC-DC non-isolés de type SEPIC.

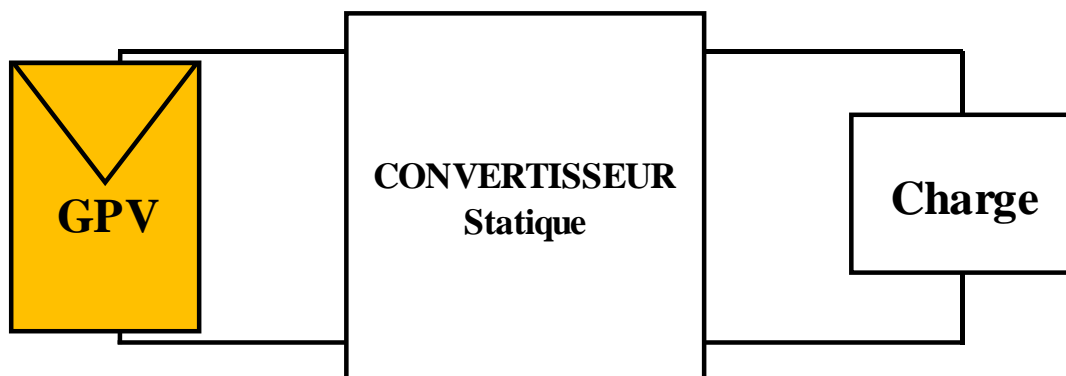


Figure II.6 – Schéma du système photovoltaïque étudié.

### II.3.1 Modélisation du générateur photovoltaïque

#### II.3.1.1 Modèle d'une cellule photovoltaïque

La Figure II.7 illustre un circuit équivalent électrique représentant le comportement statique d'une cellule photovoltaïque réelle. Ce circuit équivalent est constitué d'une source de courant connectée en parallèle avec une diode, ainsi que des résistances série  $R_s$  et parallèle

$R_p$  pour tenir compte des phénomènes dissipatifs au niveau de la cellule. En pratique, la résistance parallèle  $R_p$  est beaucoup plus importante que celle de la résistance série  $R_s$  [32].

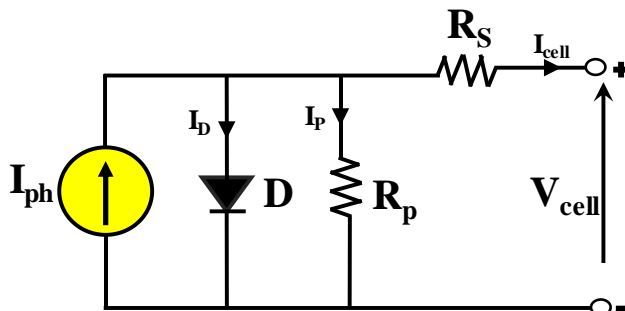


Figure II.7 – Modèle électrique équivalent de la cellule photovoltaïque.

Le modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque est donné par :

$$I_{cell} = I_{ph} - I_D - I_p = I_{ph} - I_{sat} \left[ e^{\frac{q(V_{cell} + R_s I_{cell})}{nkT}} - 1 \right] - \frac{V_{cell} + R_s I_{cell}}{R_p} \quad (II.1)$$

Le courant photonique  $I_{ph}$ , dépendant de l'ensoleillement  $G$  [ $W/m^2$ ] solaire et de la température  $T$  [ $^{\circ}K$ ],  $I_{ph}$  est donné par l'expression :

$$I_{ph} = \frac{G}{1000} (I_{sc} + \alpha(T - T_r)) \quad (II.2)$$

Le courant de saturation  $I_{sat}$  est donné par :

$$I_{sat} = I_{rr} \left( \frac{T}{T_r} \right)^{\frac{3}{n}} e^{-\frac{qE_g}{nk} \left( \frac{T}{T_r} - \frac{T_r}{T} \right)} \quad (II.3)$$

Le courant de saturation  $I_{rr}$  de la diode pour la température  $T_r$  est calculé par l'équation suivante :

$$I_{rr} = \frac{I_{sc} - (V_{oc} / R_{sh})}{e^{\left( \frac{qV_{oc}}{nkT_r} \right)} - 1} \quad (II.4)$$

Avec :

- $V_{cell}$  : La tension aux bornes de la cellule ;
- $I_{cell}$  : Le courant fourni par la cellule ;
- $I_{sc}$  : Le courant de court-circuit ;
- $V_{oc}$  : La tension de circuit-ouvert ;
- $q$  : La charge de l'électron [ $1.602 \times 10^{-19}$  C] ;

- $n$  : Le facteur d'idéalité de la jonction ;
- $E_g$  : L'énergie du band gap ;
- $\alpha$  : Coefficient de température de  $I_{ph}$  ;
- $k$  : La constante de Boltzmann [ $1.381 \times 10^{-23}$  J/K].

### II.3.1.2 Modèle d'un générateur photovoltaïque

La connexion en série des cellules permet d'augmenter facilement la tension de l'ensemble, tandis que la mise en parallèle permet d'accroître le courant. Le câblage série/parallèle est donc utilisé pour obtenir globalement un générateur photovoltaïque (GPV) aux caractéristiques souhaitées. L'expression du courant débité par l'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle est définie par l'équation suivante [32] :

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p I_{sat} \left[ e^{\frac{qF}{nkT}} - 1 \right] - \frac{N_p F}{R_p}, F = \frac{V_{pv}}{N_s} + \frac{R_s I_{pv}}{N_p} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

- $N_s$  : Le nombre de cellules connectées en série ;
- $N_p$  : Le nombre de cellules connectées en parallèle ;
- $V_{pv}$  : La tension aux bornes de GPV ;
- $I_{pv}$  : Le courant fourni par le GPV.

### II.3.1.3 Caractéristiques électrique du module photovoltaïque choisi

Dans la suite de ce chapitre, nous allons présenter les différentes données et caractéristiques électriques correspondants au module photovoltaïque commercial **VICTRON** référencé **PE1080150**. Les principales informations récoltées de ces modules sont données dans la Tableau II.1[33].

Tableau II.1 – Paramètres du module photovoltaïque de type VICTRON 100W.

Paramètre	Valeur
Dimensions Module	1195 x 545 x 35 mm
Poids	8 kg
Puissance nominale P <sub>mp</sub>	100 W
Tension à puissance max. V <sub>mp</sub>	18 V
Courant à puissance max. I <sub>mp</sub>	5,56 A
Tension en circuit ouvert V <sub>oc</sub>	22,4 V
Courant de court-circuit I <sub>sc</sub>	6,53 A
Puissance nominale (tolérance +/- 3%)	100 W
Type de cellules	Monocristallin
Nombre de cellules couplées en série	36
Tension maximale système	1000 V
Coefficient de température de P <sub>mp</sub> (%)	-0,48/°C
Coefficient de température de V <sub>oc</sub> (%)	-0,34/°C
Coefficient de température de I <sub>sc</sub> (%)	+0,037/°C

Sur les deux figures ci-dessous, nous pouvons observer l'évolution des caractéristiques I-V et P-V d'un module photovoltaïque VICTRON 100W en fonction de l'ensoleillement (Figure II.8) et de la température (Figure II.9).

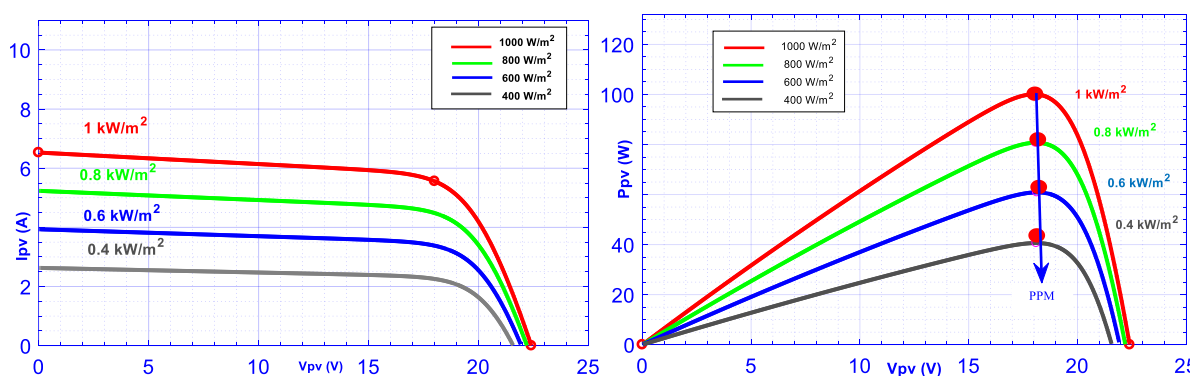


Figure II.8 – Caractéristiques I-V et P-V de panneau photovoltaïque en fonction de l'ensoleillement.

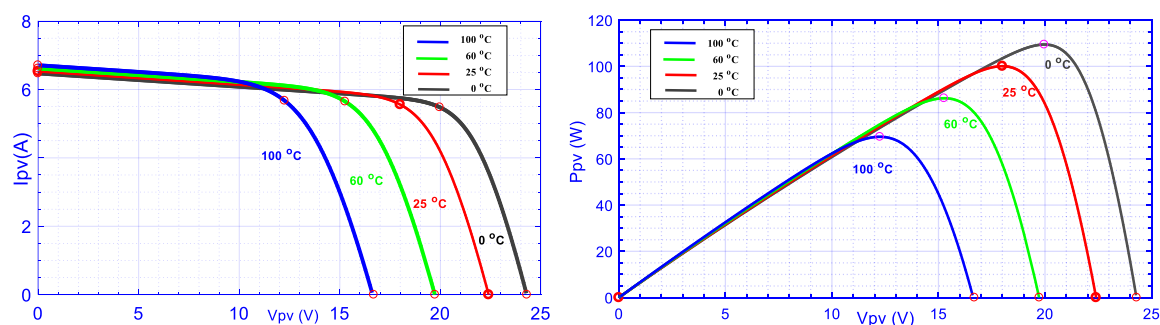


Figure II.9 – Caractéristiques I-V et P-V de panneau photovoltaïque en fonction de la température.

### II.3.2 Modélisation d'un convertisseur DC-DC SEPIC

Dans notre travail, qui consiste en la conception d'une chaîne de conversion et d'optimisation de l'énergie photovoltaïque, nous avons choisi d'utiliser un convertisseur de puissance de type SEPIC, et ceci vu les avantages et les performances que peut fournir un tel convertisseur. Un convertisseur SEPIC (Single Ended Primary Inductor Converter) est essentiellement un convertisseur Boost suivi d'un convertisseur Buck-Boost inversé [34]. Il est donc similaire à un convertisseur Buck-Boost traditionnel, mais présente l'avantage d'avoir une sortie non inversée, il utilise un condensateur en série pour coupler l'énergie de l'entrée à la sortie, c'est un convertisseur à stockage capacitif.

Ce convertisseur (voir Figure II.10) peut avoir une multitude d'extensions de sorties directionnelles, de façon plus simple que dans le cas du convertisseur Ćuk, en ajoutant un transformateur à deux enroulements secondaires, une diode, et un condensateur pour chaque sortie additionnelle.

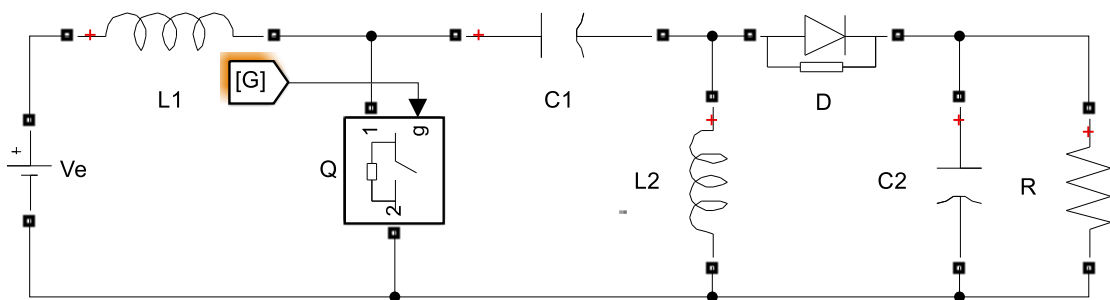


Figure II.10 – Schéma de convertisseur inverseur « SEPIC ».

Pendant la phase de conduction,  $Q$  est en état passant ( $T_{ON}$ ), la tension aux bornes de l'inductance  $L_1$  est égale à  $V_e$ , le condensateur  $C_1$  est connecté en parallèle avec  $L_2$  et la tension aux bornes de  $L_2$  est la même que la tension du condensateur égale à  $(-V_e)$  (Figure II.11). La diode  $D$  est en polarisation inverse donc bloquée. Le courant de la charge est fourni par le condensateur  $C_2$ . Pendant cette période le courant est stocké en  $L_1$  par l'entrée et en  $L_2$  par  $C_1$ .

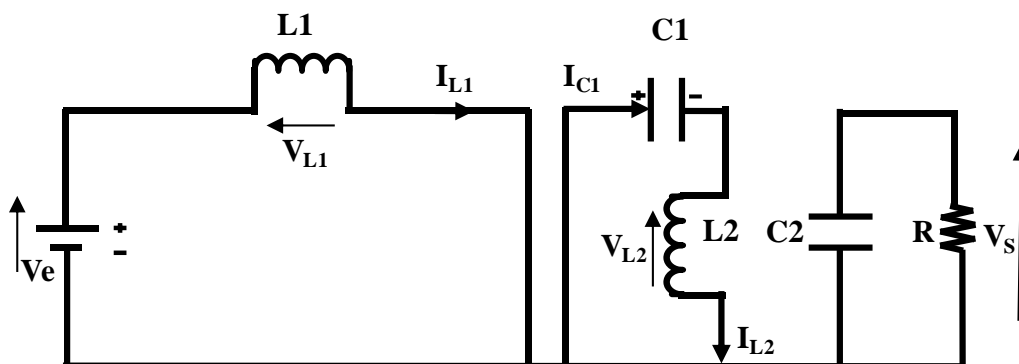


Figure II.11 – Convertisseur SEPIC Durant l'état ON.

L'opération dans le mode de conduction discontinue (Figure II.12) ajoute une séquence additionnelle. Ce régime est atteint lorsque le courant dans la diode s'annule avant la fin de la période de commutation. Ceci se produit lorsque la valeur moyenne du courant,  $I_L = I_{L1} + I_{L2}$ , devient inférieure à la demie-ondulation crête à crête de ce même courant.

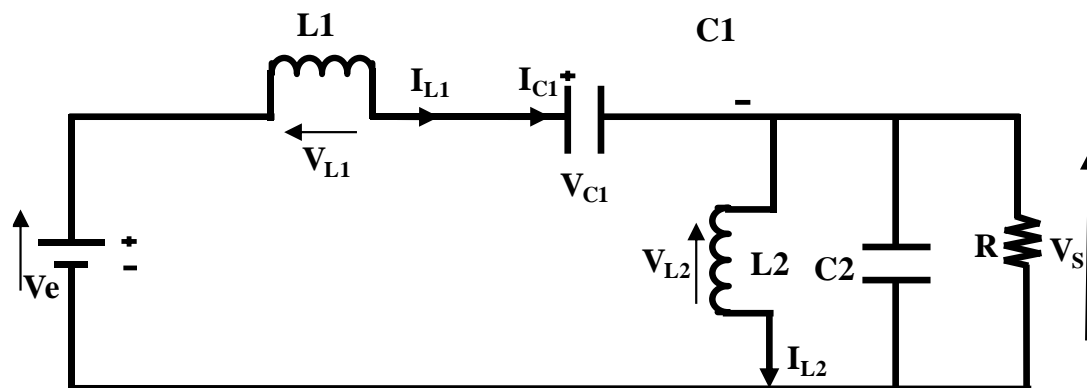


Figure II.12 – Convertisseur SEPIC Durant l'état OFF.

On déduit que la fonction de transfert de sortie est :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{(\alpha^2) \cdot (V_e)}{2 \cdot L_{eq} \cdot f \cdot I_s} \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$$L_{eq} = \frac{L_1 \cdot L_2}{L_1 + L_2} \quad (\text{II.7})$$

La tension de sortie est alors :

$$V_s = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} V_e \quad (\text{II.8})$$

Et la relation entre les courants moyens est :

$$I_{L1} = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} I_{L2} = \frac{\alpha}{(1-\alpha)} I_s \quad (\text{II.9})$$

Les caractéristiques des tensions et des courants du convertisseur SEPIC dans le cas de la conduction continue sont décrites par les Figure II.13, comme suit :

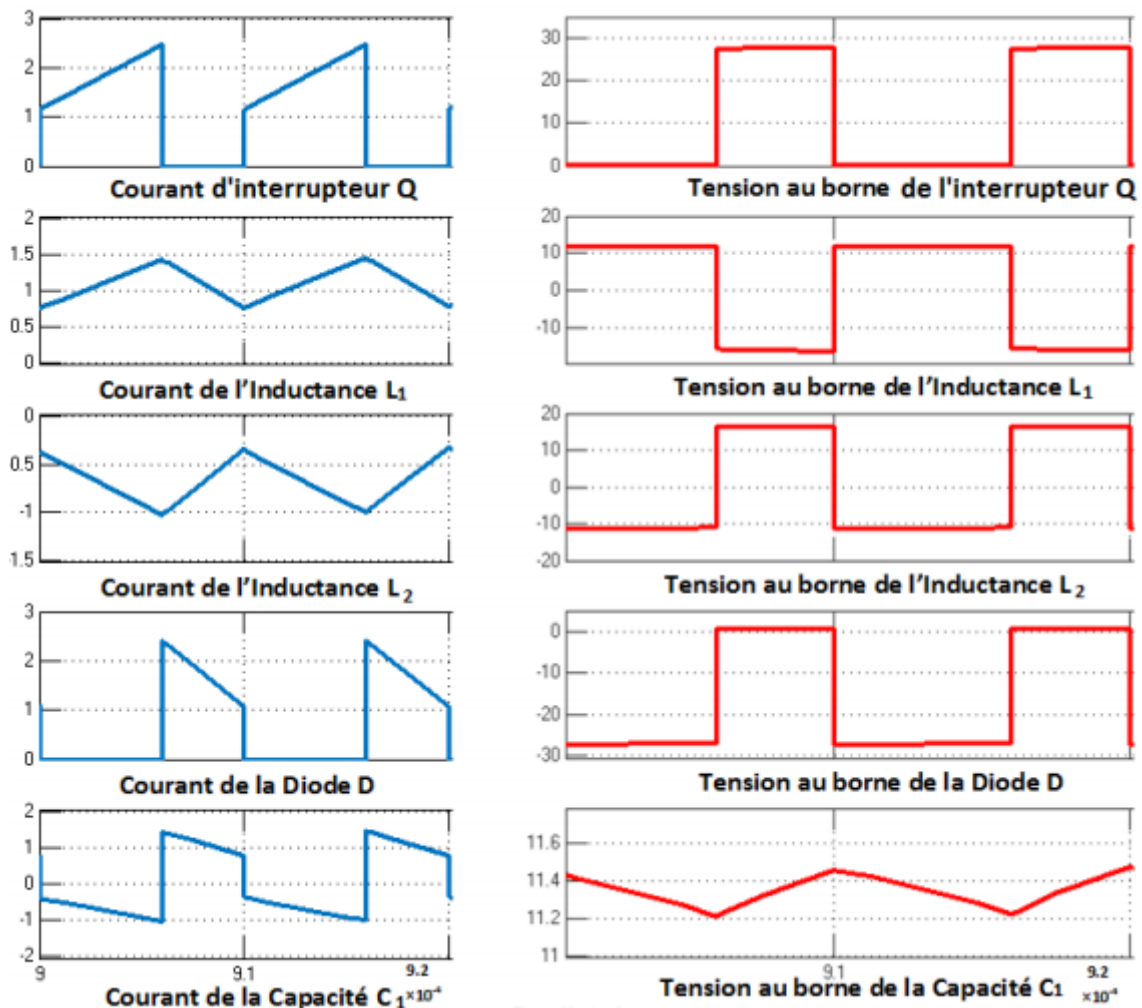


Figure II.13 – Formes d'onde des tensions et des courants d'un convertisseur SEPIC.

## II.4 Dimensionnement du SEPIC

Seul le fonctionnement en conduction continue du convertisseur est étudié, c'est-à-dire que le courant dans l'inductance ne s'annule jamais en zéro avant la fin d'un cycle de fonctionnement.

De par la complexité de cet hacheur, nous ne l'étudierons pas phase par phase. Nous utiliserons seulement les équations finales permettant de dimensionner les éléments du convertisseur [27].

## II.4.1 Dimensionnement des paramètres

### II.4.1.1 Rapport cyclique

En supposant un rendement de 100 % on aura la relation suivante

$$\alpha = \frac{V_s + V_D}{V_e + V_s + V_D} \quad (\text{II.10})$$

Avec  $V_e$  la tension d'entrée,  $V_s$  la tension de sortie et  $V_D$  la tension de seuil de la diode. Avec un rapport cyclique proche de 50 %, la tension d'entrée est égale à la tension de sortie, le gain est unitaire.

Le rapport cyclique varie en fonction de la tension d'entrée appliquée afin d'avoir une tension de sortie constante. Le rapport cyclique maximum est :

$$\alpha_{MAX} = \frac{V_s + V_D}{V_e(MIN) + V_s + V_D} \quad (\text{II.11})$$

Le rapport cyclique minimum est :

$$\alpha_{MIN} = \frac{V_s + V_D}{V_e(MAX) + V_s + V_D} \quad (\text{II.12})$$

### II.4.1.2 Choix des inductances

Pour la détermination de l'inductance on calcule  $\Delta I_L$  avec 20 à 40 % du courant d'entrée maximum.

$$\Delta I_L = I_e \times 30\% = I_s \times \frac{V_s}{V_e(MIN)} \times I_{ripple} \quad (\text{II.13})$$

Soit les valeurs d'inductances calculées par :

$$L_1 = L_2 = L = \frac{V_e(MIN)}{\Delta I_L \times f} \times \alpha_{MAX} \quad (\text{II.14})$$

Avec  $f$  la fréquence de commutation.

Pour s'assurer que le courant dans l'inductance ne sature pas, le courant crête est donné par :

$$\begin{cases} I_{L1(peak)} = I_s \times \frac{V_s + V_D}{V_e(MIN)} \times \left(1 + \frac{I_{ripple}}{2}\right) \\ I_{L2(peak)} = I_s \times \left(1 + \frac{I_{ripple}}{2}\right) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Si les inductances L1 et L2 sont bobinées sur le même circuit magnétique, les valeurs d'inductances sont remplacées par 2L à cause de la mutuelle inductance. Les valeurs d'inductances sont alors :

$$L_1' = L_2' = \frac{L}{2} = \frac{V_e(MIN)}{2 \times \Delta I_L \times f} \times \alpha_{MAX} \quad (II.16)$$

### II.4.1.3 Condensateur de couplage

Le condensateur de couplage doit être capable de laisser passer le courant efficace donné par :

$$I_{c1(RMS)} = I_s \times \sqrt{\frac{V_s + V_D}{V_e(MIN)}} \quad (II.17)$$

Le condensateur est dimensionné à partir de l'ondulation de tension crête à crête voulue définie par la formule suivante :

$$\Delta V_{c1} = \frac{I_s \times \alpha_{MAX}}{C_1 \times f} \quad (II.18)$$

### II.4.1.4 Condensateur de de filtrage

Le condensateur C2 à la sortie du convertisseur SEPIC permet de filtrer la tension et de maintenir celle-ci constante. La formule permettant de dimensionner le condensateur est donnée par :

$$C_2 = \frac{I_s \times \alpha_{MAX}}{V_{ripple} \times 0.5 \times f} \quad (II.19)$$

Avec  $I_s$  le courant dans la charge,  $V_{ripple}$  l'ondulation de tension.

### II.4.1.5 Transistor

Le transistor doit être capable de supporter une tension  $V_k = V_e + V_s$ , et être traverser par un courant crête égal à  $I_{k(peak)} = I_{L1(peak)} + I_{L2(peak)}$ .

Le courant efficace est donné par :

$$I_k(RMS) = I_s \times \sqrt{\frac{(V_s + V_e(MIN) + V_D) \times (V_s + V_D)}{V_e^2(MIN)}} \quad (II.20)$$

Il faudra veiller à ce que la puissance dissipable par le transistor soit inférieure aux pertes par conduction et par commutations.

#### II.4.1.6 Diode

La diode possède les mêmes contraintes que le transistor, elle doit supporter un courant  $I_{D(\text{peak})}=I_{k(\text{peak})}$ . Elle doit résister aussi à une tension inverse de  $V_D = V_{e(\text{MAX})} + V_{s(\text{MAX})}$ . Le courant moyen dans la diode est égal au courant de sortie  $I_s$ .

Il faudra veiller à ce que la puissance dissipable par la diode soit inférieure aux pertes par conduction et par commutations. Il est recommandé de choisir des diodes Schottky pour limiter ses pertes [27].

### II.4.2 Cahier des charges

Dans ce travail, le système photovoltaïque que nous étudions consiste en un panneau photovoltaïque de type **VICTRON** référencé **PE1080150** qui alimente une charge résistive de  $4\Omega$  à travers le convertisseur SEPIC. Alors, les contraintes de conception sont essentiellement liées au panneau PV et à la charge, ainsi que d'autres choix que nous avons jugé adéquat pour le bon fonctionnement de notre système, en suppose que le fonctionnement du système PV est dans les conditions optimale.

Tableau II.2 – Paramètres du système photovoltaïque étudiée.

Paramètres	Valeur
Tension d'entrée maximale	22,4 V
Tension d'entrée optimal	18 V
Courant d'entrée maximal	6,53 A
Courant d'entrée optimal	5.56 A
Puissance maximal transférée	100 Watts
Fréquence de commutation	20 KHz
Charge	4 $\Omega$
Ondulation du courant dans L1 et L2	30%
Ondulation de la tension de sortie	2 %

## II.4.3 Calcul numérique des paramètres

### II.4.3.1 Rapport cyclique

En négligeant la chute de tension aux bornes de la diode, on trouve

$$\alpha = 0.52 = 52\%$$

### II.4.3.2 Inductances

On autorise une ondulation de  $I_{ripple}$  le courant d'entrée maximal pour la tension d'entrée minimale. L'ondulation de courant est :

$$\Delta I_L = 1.669 \text{ A}$$

Soit les valeurs d'inductances calculées par :

$$L_1 = L_2 = L = 2.8395 \times 10^{-4} \text{ H}$$

Le courant maximum est :

$$I_{L_1(peak)} = 6.649 \text{ A}$$

$$I_{L_2(peak)} = 5.7523 \text{ A}$$

### II.4.3.3 Condensateur de couplage

Le courant efficace dans C1 est :

$$I_{C1(RMS)} = 5.3796 \text{ A}$$

En prenant une ondulation de tension de l'ordre de 40 % la tension d'entrée, on obtient :

$$C_1 = 2.4388 \times 10^{-05} \text{ F}$$

### II.4.3.4 Condensateur de de filtrage

La tension de sortie accepte une ondulation de 2 % :

$$C_2 = 1.3169 \times 10^{-04} \text{ F}$$

### II.4.3.5 Transistor

Le transistor doit être capable de supporter une tension  $V_k = V_e + V_s = 18 + 20.02 = 38.02V$ , et être traverser par un courant crête égal à  $I_k(\text{peak}) = I_{L1}(\text{peak}) + I_{L2}(\text{peak}) = 6.649 + 5.7523 = 12.4013 A$

Le courant efficace est donné par :

$$I_k(RMS) = 7.9002 A$$

### II.4.3.6 Diode

La diode possède les mêmes contraintes que le transistor, elle doit supporter un courant  $I_D(\text{peak}) = I_k(\text{peak}) = 12.4013 A$  Elle doit résister aussi à une tension inverse de  $V_D = V_e(\text{MAX}) + V_s(\text{MAX}) = 18 + 20.02 = 38.02V$ . Le courant moyen dans la diode est égal au courant de sortie  $I_s$ .

## II.4.4 Calcul numérique des paramètres sous Matlab

Pour déterminer les résultats obtenus par le calcul analytique précédent, on propose d'utiliser aussi le programme Matlab suivant qui assure un calcul précis et rapide des différents paramètres du convertisseur SEPIC, on peut alors avoir exactement les valeurs de dimensionnement de manière rapides et efficace :

```
Vin = 18 ;
Vout = 20 ;
Iin = 5.56;
Iout = 5 ;
f = 20000;
Di = 30/100 ;
Vr = 2 ;
Vd = 0.8;
Alpha = (Vout)/(Vin+Vout) ;
DI = Iout*Di*Vout/Vin ;
L1 = Alpha*Vin/(DI*f) ;
L2 = L1 ;
Ic1 = Iout*sqrt ((Vout+ Vd) /Vin) ;
C1 = (Iout*Alpha) / (Di*Vin*f) ;
C2 = (Iout*Alpha) / (Vr*0.5*f) ;
```

**Remarque :** Les résultats obtenus par le calcul numérique des paramètres est pratiquement le même que celui obtenue par le programme de Matlab, pour cela on peut confirmer alors nous résultats trouvés pour intégrer en toute sécurité le convertisseur SEPIC dans notre système PV.

## **II.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, on a traité la modélisation et la dimensionnement d'un système photovoltaïque. Ce système comprend une source GPV, une charges DC et un convertisseurs statiques DC–DC SEPIC. Dans un premier temps, les différents éléments de ce système ont été modélisé. Dans la deuxième partie de ce chapitre, le dimensionnement de la convertisseurs SEPIC a été effectué. Au chapitre suivant, nous allons nous intéresser aux techniques de poursuite de point maximum de puissance (MPPT) sont nécessaires pour maintenir le point du fonctionnement du panneau photovoltaïque à son puissance optimale.

## **Chapitre III. Techniques de commande MPPT d'un système photovoltaïque**

*« La folie est de toujours se comporter de la même manière et de s'attendre à un résultat différent ».*

*Albert Einstein.*

# Chapitre III. Techniques de commande MPPT d'un système photovoltaïque

## III.1 Introduction

La caractéristique de la cellule solaire I-V est non-linéaire et change avec l'irradiation et la température. Il y a un point unique sur la courbe (P-V), appelé le point de la puissance maximale (MPP), auquel le système PV fonctionne avec un rendement maximum et produit sa puissance maximale. Le point de la puissance maximale peut être situé, par des modèles de calcul. Par conséquent les techniques de poursuite de point maximum de puissance (MPPT) sont nécessaires pour maintenir le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque à son MPP.

Dans ce chapitre, nous étudierons deux méthodes de suivi MPPT notre propre méthode de poursuite utilisant le contrôleur flou et la méthode P&O.

## III.2 Commandes MPPT

Les générateurs photovoltaïques sont utilisés pour fournir de l'énergie dans de nombreuses applications électriques. Pour obtenir la puissance maximale du panneau solaire, un suiveur du point de puissance maximum (MPPT : Maximum Power Point Tracking) est utilisé pour la commande de le hacheur [7]. La technique de suivi du point à puissance maximal a été développé depuis 1968, cette commande est essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque.

La Figure III.1 représente le schéma de principe d'un convertisseur MPPT classique. La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (CS), à l'aide d'un signal électrique approprié, pour tirer le maximum de puissance que le GPV peut fournir. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP. Plusieurs algorithmes sont présents dans la littérature, nous présentons quelques-uns plus loin dans ce chapitre [8].

La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT. Il peut être représenté par le schéma de la Figure III.1.

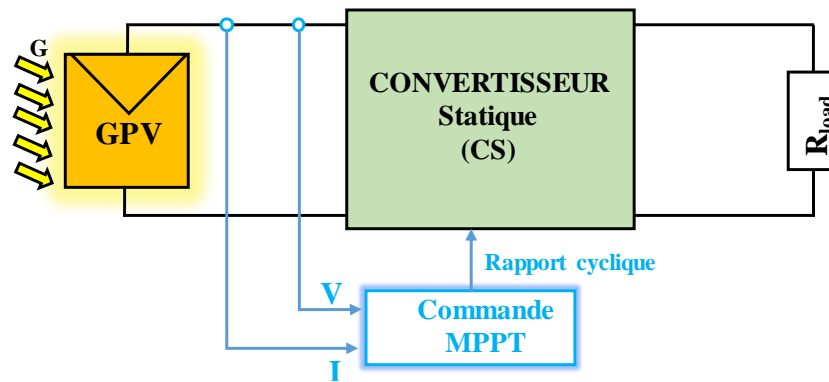


Figure III.1 – Schéma de principe du convertisseur MPPT.

### III.2.1 Principe de la recherche du point de puissance maximale(MPPT)

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum ( $V_{ppm}$ ,  $I_{ppm}$ ) [4].

La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du CS de telle sorte que la puissance fournie par le GPV soit maximale à ses bornes [35] [36]. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du CS jusqu'à se placer sur le PPM en fonction des évolutions des paramètres d'entrée du CS ( $I_{PV}$  et  $V_{PV}$ ) (voir Figure III.2). Dans la section suivante, nous présentons un bilan des différents types d'algorithmes MPPT présents dans la littérature.

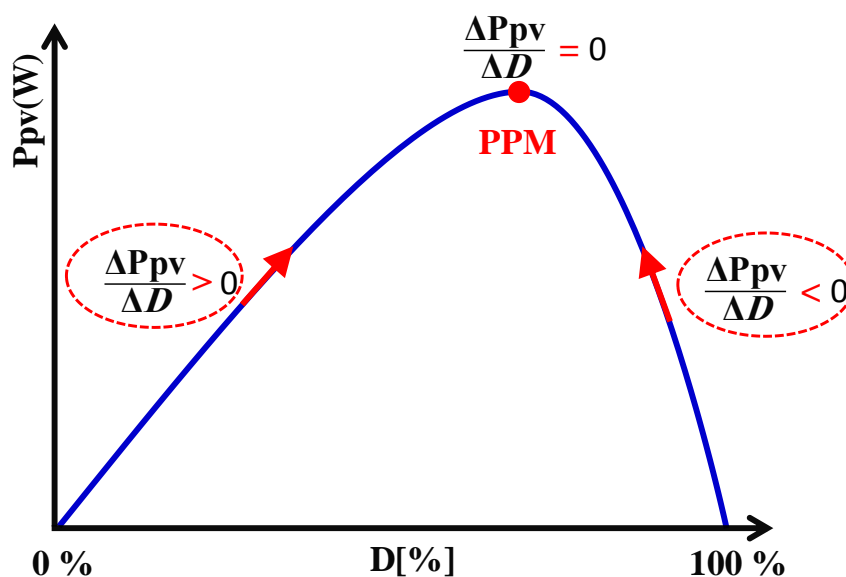


Figure III.2 – Relation entre le rapport cyclique d'un CS et la puissance du GPV.

## III.3 Synthèse des différentes techniques de maximisation de la puissance

Dans un système électrique comprenant une source et une charge, la recherche du point de fonctionnement optimal par des techniques d'optimisation représente ce qui est le plus important. Dans le cas du photovoltaïque, cette démarche est plus complexe du fait que la caractéristique des cellules dépend fortement de l'ensoleillement et de la température ambiante, entre autres. Il faut trouver un dispositif permettant de fonctionner à tout moment suivant le point de fonctionnement optimal. Ces dernières années plusieurs dispositifs ont été développés, aussi élaborés les uns que les autres. Il Ya différentes méthodes de maximisation de puissance classées en deux catégories : les méthodes indirectes et les méthodes directes [19].

### III.3.1 Les méthodes indirectes

Les méthodes indirectes utilisent des bases de données regroupant les caractéristiques des panneaux photovoltaïques (PV) dans différentes conditions climatiques (température, ensoleillement...) mais aussi des équations mathématiques empiriques permettant de déterminer le point de puissance maximum. Ces méthodes sont souvent propres à chaque type de panneau et donc difficile à généraliser. Parmi elles, on peut citer [3] [37] :

- La méthode d'ajustement de courbe ;
- La méthode "look-up table" ;
- La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur ;
- La méthode de court-circuit.

### III.3.2 Les méthodes directes

Les méthodes directes sont des méthodes qui utilisent les mesures de tension et de courant des panneaux et dont l'algorithme est basé sur la variation de ces mesures.

L'avantage de ces algorithmes est qu'ils ne nécessitent pas une connaissance préalable des caractéristiques des panneaux PV. Le Tableau II.5 résume les caractères majeurs des différentes techniques MPPT [11]. Ce tableau résume les différents MPPT connue dans la littérature selon [29] :

- La connaissance nécessaire des paramètres du GPV ;
- La nécessité d'une mise à jour périodique ;
- Le type d'implantation lors d'une réalisation pratique et le degré de complexité ;
- Le temps de réponse du traqueur (vitesse de recouvrement du PPM) ;

- Le nombre des capteurs nécessaires ;
- Le rendement qui caractérise les pertes dues à l'adaptation maximale de la charge.

Tableau III.1 – Caractéristiques majeures des commandes MPPT.

Méthode MPPT	Connaissance des paramètres du GPV	Nécessité D'une mise à jour périodique	Mode d'implantation	Complexité d'implantation	Vitesse de Recouvrement du PPM	Type et Nombre de capteur	Rendement (%)
<b>P&amp;O</b>	non	non	Analogique ou numérique	basse	Variable	1 capteur courant. 1 capteur tension.	81-96
<b>Inc-cond</b>	non	non	numérique	moyenne	Variable	1 capteur courant. 1 capteur tension.	90-98
<b>Hill climbing</b>	non	non	Analogique ou numérique	basse	Variable	1 capteur Courant. 1 capteur Tension.	
<b>Fonction de VCO</b>	oui	oui	Analogique ou numérique	moyenne	moyenne	1 capteur tension.	
<b>Fraction Icc</b>	oui	oui	Analogique ou numérique	moyenne	moyenne	1 capteur courant.	
<b>Logique Floue</b>	oui	oui	numérique	haute	rapide	variable	
<b>Réseau de Neurones</b>	oui	oui	numérique	haute	rapide	variable	
<b>RCC</b>	non		Analogique	basse	rapide	1 capteur courant. 1 capteur tension	
<b>Balayage du courant</b>	oui	oui	numérique	haute	lentement	1 capteur courant. 1 capteur tension	

Dans notre étude, nous nous intéressons au deux algorithmes de commande celui de la méthode Perturbe & Observe (P&O) et la commande logique floue.

## III.4 La méthode Perturbe & Observe (P&O)

La méthode Perturbe & Observe (P&O) est l'une des méthodes les plus utilisées [19] [20]. C'est une méthode itérative permettant d'obtenir le MPP : on mesure les caractéristiques du panneau PV puis on induit une petite perturbation sur la tension (ou le courant) afin d'analyser la variation de puissance qui en résulte.

### III.4.1 Principe de la commandes P&O

Le principe des commandes MPPT de type P&O consiste à perturber la tension  $V_{pv}$  d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance  $P_{pv}$  qui en résulte [38]. Ainsi, on peut déduire que si une incrémentation positive

de la tension  $V_{pv}$  engendre un accroissement de la puissance  $P_{pv}$ , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP. Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a déjà dépassé le MPP. Un raisonnement similaire peut être effectuée lorsque la tension décroît. A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique  $P_{pv}(V_{pv})$ , il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au MPP, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié.

En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau MPP. Le Tableau III.2 et la Figure III.3 résume le principe de fonctionnement de cette méthode.

Tableau III.2 – Les modes de perturbation de la méthode P&O.

Perturbation	Changement de la puissance	Perturbation Suivante
Positive	Positive	Positive
Positive	Négative	Négative
Négative	Positive	Négative
Négative	Négative	Positive

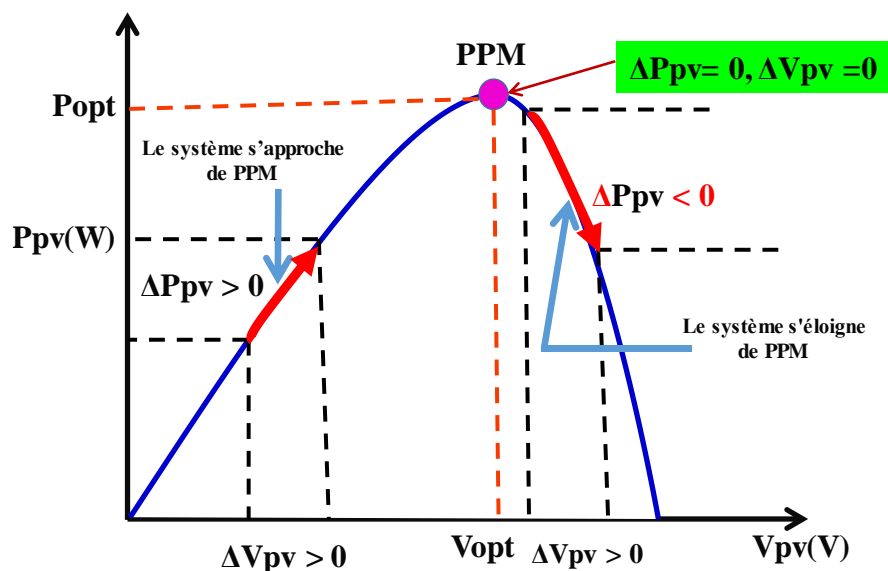


Figure III.3 – Commande d'un panneau photovoltaïque par la (P&O).

Si on analyse en détail ce mode de recherche, il présente des erreurs d'interprétation au niveau de la direction à suivre pour atteindre le MPP lorsque des variations brusques des conditions climatiques et/ou de charge apparaissent, comme cela est décrit sur la Figure III.4

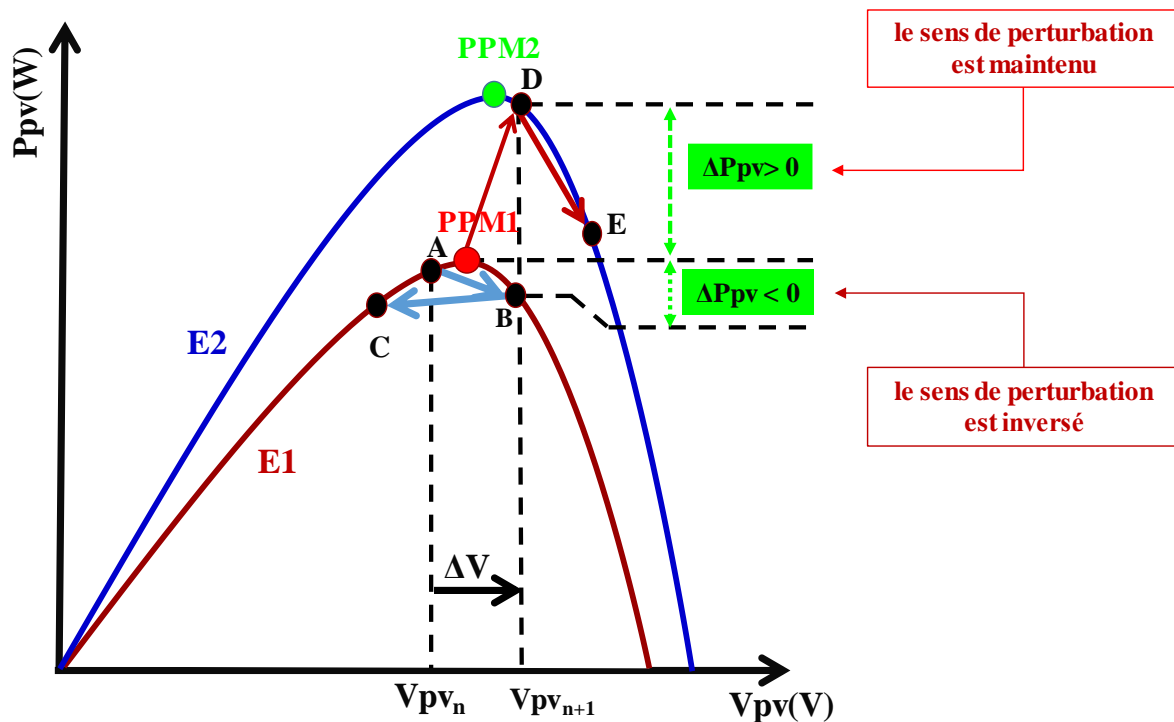


Figure III.4 – Divergence de la commande P&O lors de variations d'irradiation.

Pour comprendre, prenons l'exemple d'un éclairage donné, noté E1, avec un point de fonctionnement se situant en (A). Suite à une perturbation de tension de valeur ( $\Delta V$ ), cette dernière bascule en (B), impliquant, dans un fonctionnement sans variation d'éclairage, une inversion du signe de la perturbation due à la détection d'une dérivée de la puissance négative. Ceci entraîne en régime d'équilibre, des oscillations autour du MPP causées par la trajectoire du point de fonctionnement entre les points (B) et (C). On peut noter que des pertes de transfert de la puissance seront plus ou moins importantes en fonction des positions respectives des points (B) et (C) par rapport à (A). Lors d'un changement d'irradiation (évolution des caractéristiques P(V) du module de E1 à E2), le point de fonctionnement se déplace alors de (A) vers (D), qui est interprété dans ce cas-là, par une variation positive de la puissance. Le système n'ayant pas la possibilité de voir l'erreur de trajectoire liée au changement de caractéristique, le signe de la perturbation ne change pas et le système s'éloigne momentanément du MPP en direction du point E. Au mieux, ceci occasionne une non optimisation de la puissance momentanée. Au pire des cas, le système de recherche peut se perdre et se retrouver en butée, soit en circuit ouvert soit en court-circuit entraînant une perte définitive du MPP. Il en résulte donc, en cas de conditions météorologiques défavorables, de fortes lacunes au niveau de la commande.

### III.4.2 Algorithme de la commandes P&O

La Figure III.5 représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O, où l'évolution de la puissance est analysée après chaque perturbation de tension. Pour ce

type de commande, deux capteurs (mesurant le courant et la tension des panneaux PV) sont nécessaires pour déterminer la puissance du PV à chaque instant [19].

L'algorithme "P&O" a des limitations qui réduisent son efficacité, par exemple : le changement brusque du niveau d'ensoleillement et l'ombrage partiel, il est difficile au MPPT de discerner l'emplacement du MPP.

Un autre inconvénient de l'algorithme "P&O" quand il atteint le point MPP, le point de fonctionnement oscille autour de ce dernier [39]. En outre, il a été montré que l'algorithme "P&O" peut avoir un comportement erratique sous un changement rapide du niveau de l'ensoleillement.

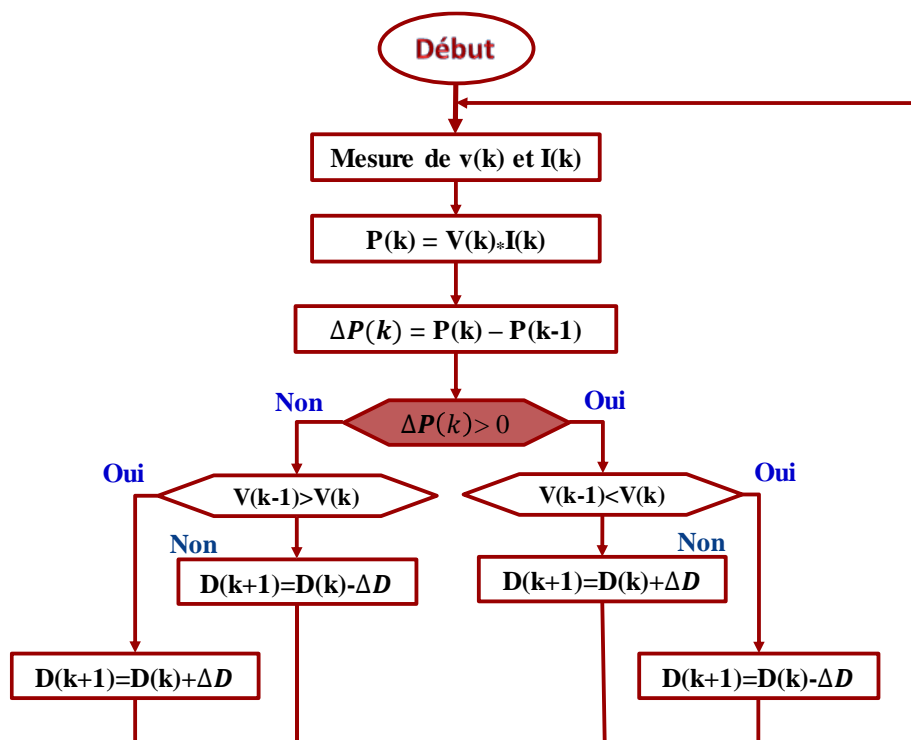


Figure III.5 – Algorithme de la méthode P&O.

La méthode P&O est aujourd'hui largement utilisée sur une grande échelle en raison de sa facilité d'implémentation. Cependant, elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du MPP qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du MPP doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du MPP. Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation. Cependant, une faible valeur d'incrément ralentit la recherche du MPP, il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité, ce qui rend cette commande difficile à optimiser.

Il est connu que ce type de commande permet d'obtenir un rendement plus important durant une journée relativement ensoleillée, où le MPP évolue lentement et proportionnellement avec le soleil. Par contre, pour une journée avec de forts et fréquents changements d'irradiations, cette commande présente beaucoup plus de pertes, en raison du temps de réponse de la commande pour atteindre le nouveau MPP.

La stratégie de la commande MPPT du convertisseur DC–DC associé au panneau PV est présentée à la Figure III.6 [20].

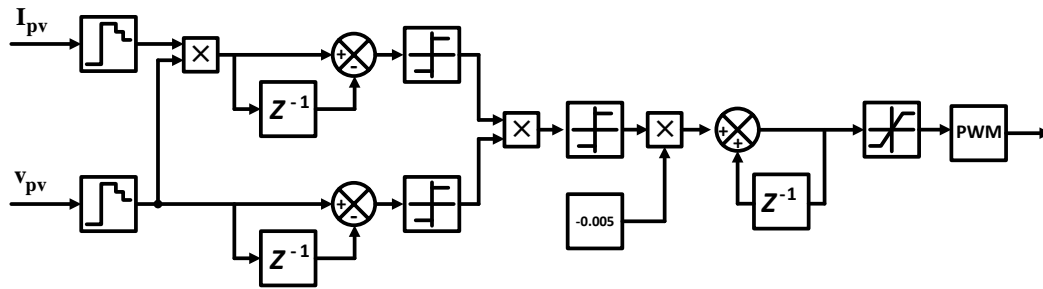


Figure III.6 – Commande du convertisseur DC–DC associé à la source PV avec l'algorithme MPPT.

## III.5 La logique floue

### III.5.1 Description de la logique floue

Une des caractéristiques du raisonnement humain est qu'il est basé sur des données imprécises ou incomplètes. Ainsi déterminer si une personne est de petite ou de grande taille est aisé pour n'importe lequel d'entre nous, et cela sans nécessairement connaître sa taille [40]. Un ordinateur, lui, est basé sur des données exactes. Il doit non seulement connaître la taille exacte de la personne mais également posséder un algorithme qui divise inmanquablement une population en deux groupes bien distincts : les grands et les petits.

Supposons que la limite soit de 1m65 comme montré dans la Figure III.7. Je mesure 1m63, suis-je vraiment petit ?

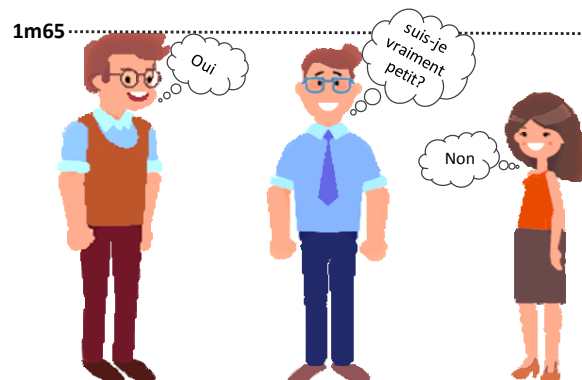


Figure III.7 – Des caractéristiques du raisonnement humain.

L'idée de la logique floue est **de transmettre cette richesse du raisonnement humain à un ordinateur.**

Bien que dans l'esprit de tout le monde le mot « flou » soit de connotation négative, il n'en est rien en réalité. Venant à l'origine du mot « duvet » (en anglais « Fuzzy » c'est-à-dire le duvet qui couvre le corps des poussins), le terme « Fuzzy » signifie indistinct, brouillé, mal

défini ou mal focalisé'. Dans le monde universitaire et technologique, le mot « flou » est un terme technique représentant l'ambiguïté ou le caractère vague des intuitions humaines plutôt que la probabilité.

### **III.5.2 Domaine d'application**

L'approche de traitement des problèmes par la logique floue est différente de celle adoptée, à priori dans une démarche scientifique. Elle est beaucoup plus pragmatique que déterministe. La décision en logique floue est basée sur la notion d'expertise qui permet de quantifier le flou à partir de connaissance à priori ou acquise antérieurement. Les domaines d'application de la logique floue dans un processus de prise de décision s'imposent dans les cas suivants :

- Pour les systèmes complexes dans lesquels la modélisation est difficile ou impossible ;
- Pour les systèmes contrôlés par des experts humains ;
- Quand l'observation humaine est à l'origine d'entrées ou des règles de contrôle;
- Pour les systèmes ayant de nombreuses entrées/sorties continues ou discontinues ;
- Pour les commande MPPT des systèmes photovoltaïques.

### **III.5.3 Base de la logique floue**

#### **III.5.3.1 Principe de base de la logique floue**

Dans la théorie des ensembles classiques, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble. La notion d'ensemble est à l'origine de nombreuses théories mathématiques. Cette notion essentielle ne permet cependant pas de rendre compte de situations pourtant simples et rencontrées fréquemment.

C'est pour prendre en compte de telles situations, qu'a été créée la notion d'ensemble flou. La théorie des ensembles flous repose sur la notion d'appartenance partielle, chaque élément appartient partiellement ou graduellement aux ensembles qui ont été définis. Les contours de chaque ensemble flou (Figure III.8) ne sont « nets », mais « flous » ou « graduels».

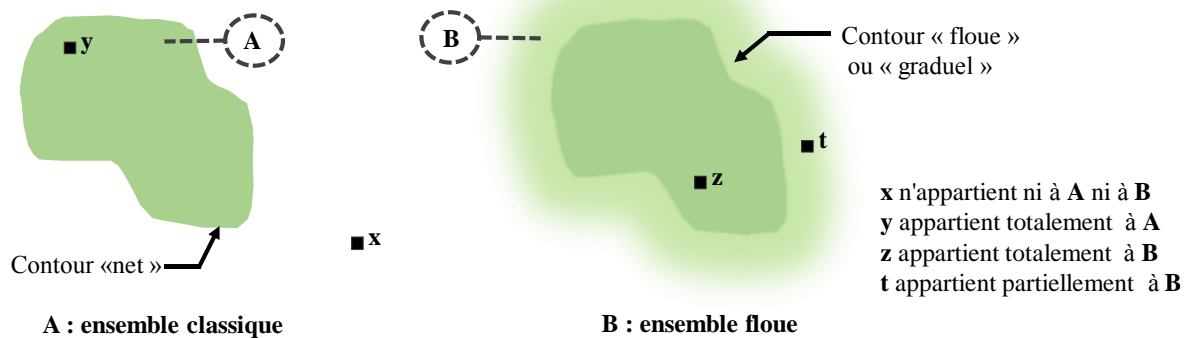


Figure III.8 – Comparaison d'un ensemble classique et un ensemble flou.

### III.5.3.2 Fonctions d'appartenance

Un ensemble flou est défini par sa « fonction d'appartenance », qui correspond à la notion de « fonction caractéristique » en logique classique [40]. Supposons que nous voulions définir l'ensemble des personnes de « taille moyenne ». En logique classique, nous conviendrons par exemple que les personnes de taille moyenne sont celles dont la taille est comprise entre 1,60m et 1,80m. La fonction caractéristique de l'ensemble (Figure III.9) donne « 0 » pour les tailles hors de l'intervalle [1,60m ; 1,80m] et « 1 » dans cet intervalle. L'ensemble flou des personnes de « taille moyenne » sera défini par une « fonction d'appartenance » qui diffère d'une fonction caractéristique par le fait qu'elle peut prendre n'importe quelle valeur dans l'intervalle [0, 1].

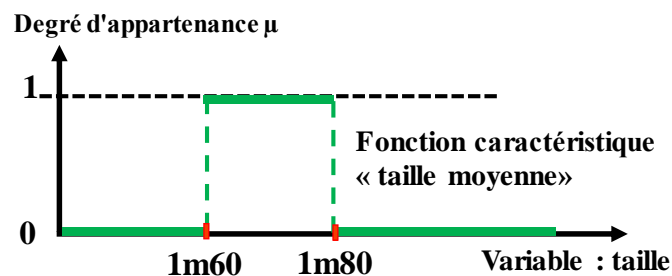


Figure III.9 – Fonction caractéristique.

A chaque taille possible correspondra un « degré d'appartenance » à l'ensemble flou des « tailles moyennes » (Figure III.10), compris entre 0 et 1.

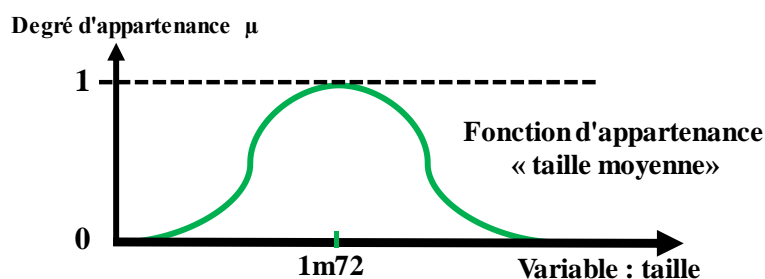


Figure III.10 – Fonction d'appartenance.

Plusieurs ensembles flous peuvent être définis sur la même variable, par exemple les ensembles « taille petite », « taille moyenne » et « taille grande », notions explicitées chacune par une fonction d'appartenance (Figure III.11).

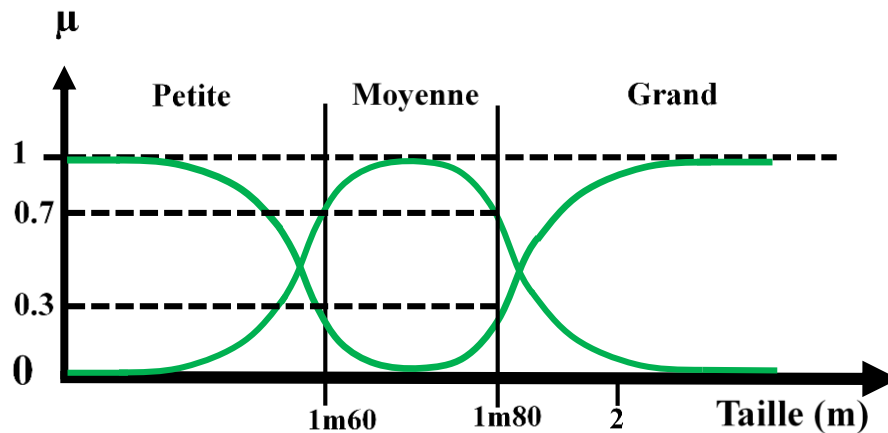


Figure III.11 – Fonction d'appartenance, variable et terme linguistique.

Cet exemple montre la gradualité que permet d'introduire la logique floue. Une personne de 1,80m appartient à l'ensemble « taille grande » avec un degré 0,3 et à l'ensemble « taille moyenne » avec un degré de 0,7. En logique classique, le passage de moyen à grand serait brusque. Une personne de 1,80m serait par exemple de taille moyenne alors qu'une personne de 1,81m serait grande, ce qui choque l'intuition.

La variable (par exemple : taille) ainsi que les termes (par exemple : moyenne, grande) définis par les fonctions d'appartenance portent respectivement les noms de variable linguistique et de termes linguistiques. Ces termes linguistiques peuvent être utilisés directement dans des règles floues.

Les fonctions d'appartenance peuvent théoriquement prendre n'importe quelle forme. Toutefois, elles sont souvent définies par des segments de droites, et dites « Linéaires par morceaux » (Figure III.12).

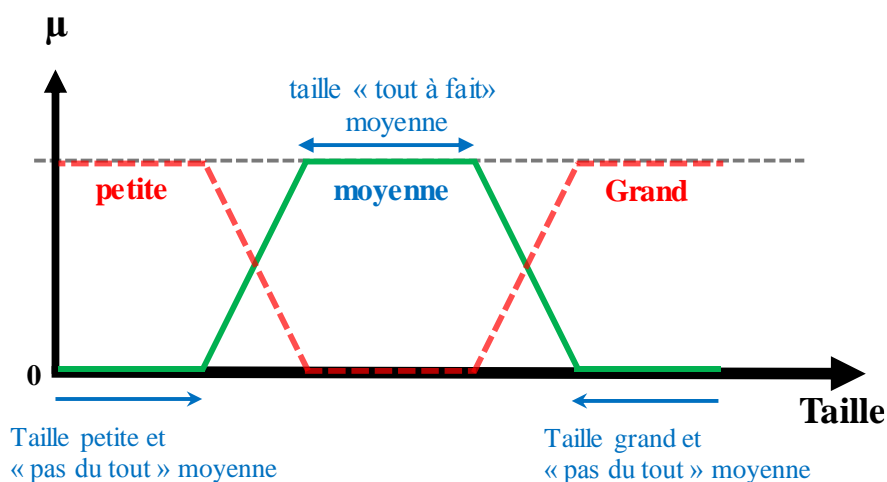


Figure III.12 – Fonctions d'appartenance linéaires par morceaux.

Les fonctions d'appartenance « linéaires par morceaux » sont très utilisées car :

- Elles sont simples,
- Elles comportent des points permettant de définir les zones où la notion est vraie, les zones où elle est fausse, ce qui simplifie le recueil d'expertise.

Dans certains cas, les fonctions d'appartenance peuvent être égales à 1 pour une seule valeur de la variable et égales à 0 ailleurs, et prennent alors le nom de « Fonctions d'appartenance singletons ». Un singleton flou (Figure III.13) défini sur une variable réelle (taille) est la traduction dans le domaine flou d'une valeur particulière (taille d'une personne  $x$ ) de cette variable.

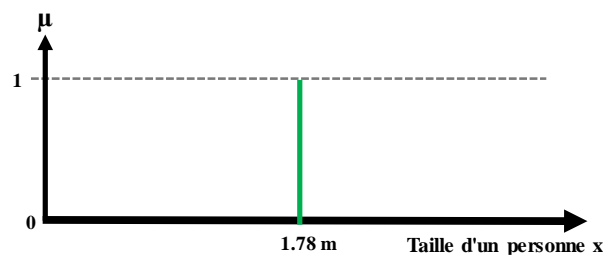


Figure III.13 – Fonction d'appartenance singleton.

Parmi les fonctions d'appartenance les plus utilisées aussi, on cite : les fonctions triangulaires, trapézoïdales, gaussiennes...etc.

La Figure III.14 montre l'allure de ces fonctions.

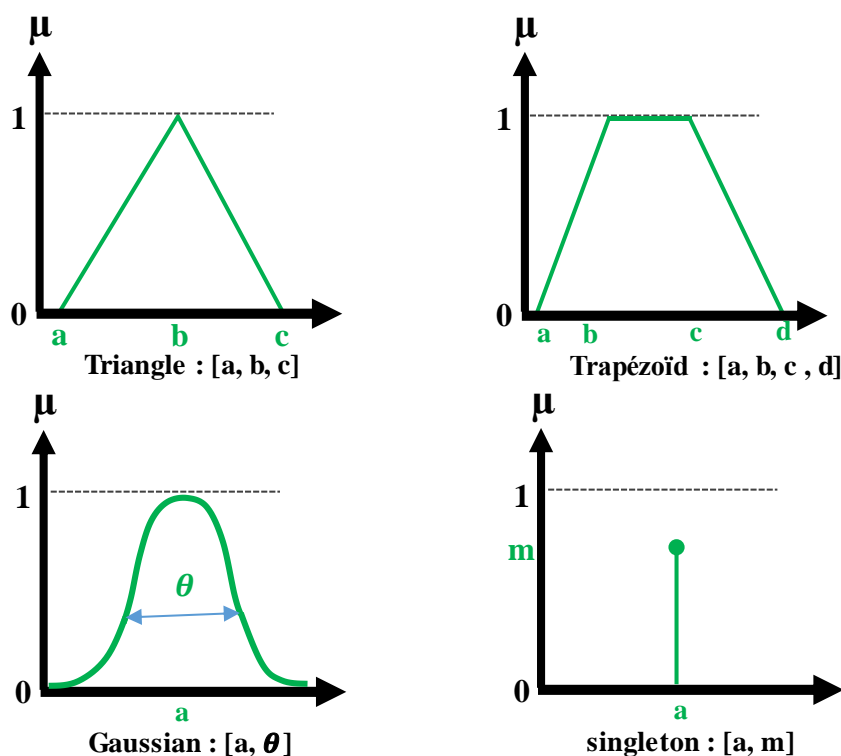


Figure III.14 – Différentes formes de fonctions d'appartenance.

Les fonctions d'appartenance présentées ci-dessus peuvent être exprimées par les expressions suivantes et :

- **Triangulaire :**

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{a-x}{a-b} & \text{si } x \in [a, b] \\ \frac{x-c}{b-c} & \text{si } x \in [b, c] \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

- **Trapèze :**

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & \text{si } x \in [a, b] \\ 1 & \text{si } x \in [b, c] \\ \frac{x-d}{c-d} & \text{si } x \in [c, d] \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

- **Gaussienne :**

$$\mu_A(x) = \exp \left( - \left( \frac{x-a}{\theta} \right)^2 \right) \quad (\text{III.3})$$

- **Singleton :**

$$\mu_A(x) = \begin{cases} m & \text{pour } x = a \\ 0 & \text{pour } x \neq a \end{cases} \quad (\text{III.4})$$

### III.5.3.3 Opérateurs en logique floue

La description d'une situation où il y a plus qu'une variable qui intervient, nécessite l'utilisation des opérateurs logique tels que : "ET", "OU", et "NON". IL s'agit de la généralisation des opérateurs de : négation, intersection et union de la théorie des ensembles classiques.

Dans la théorie de la logique floue l'opérateur "ET" correspond à l'opération "Minimum", "OU" à l'opération "Maximum", et "NON" au complément à un.

### III.5.3.3.1 L'opérateur NON (complément floue)

On peut exprimer l'opérateur NON par :

$$\text{non}(\mu_A(x)) = \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{III.5})$$

La Figure III.15 montre graphiquement l'opérateur NON (complément floue) sur une fonction d'appartenance.

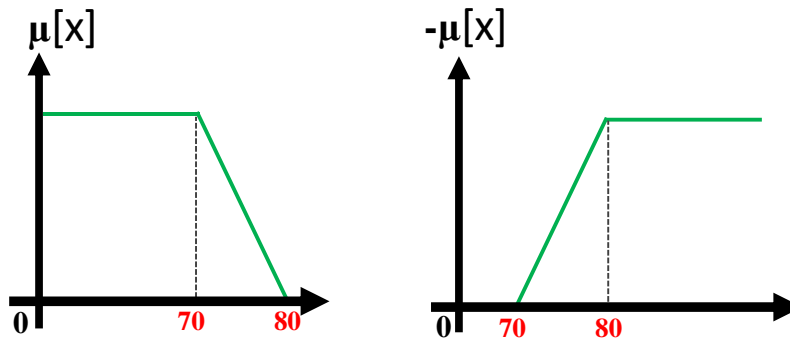


Figure III.15 – L'opérateur NON (complément).

### III.5.3.3.2 L'opérateur ET (intersection floue)

Dans la logique floue, l'opérateur ET peut être exprimé par :

$$\mu_A \cap B(x) = \mu_A(x) \cap \mu_B(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{III.6})$$

La Figure III.16 montre graphiquement l'opérateur ET sur deux fonctions d'appartenance.

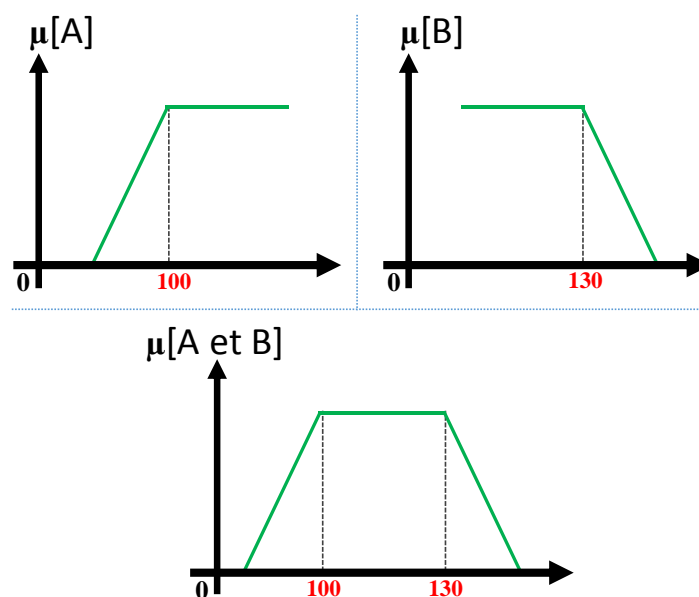


Figure III.16 – L'opérateur ET (intersection).

### III.5.3.3 L'opérateur OU (union floue) :

L'opérateur OU est généralement réalisé par la formation du maximum, que l'on exprime comme suit :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) \cup \mu_B(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{III.7})$$

La Figure III.17 montre graphiquement l'opérateur OU (union) sur deux fonctions d'appartenance.

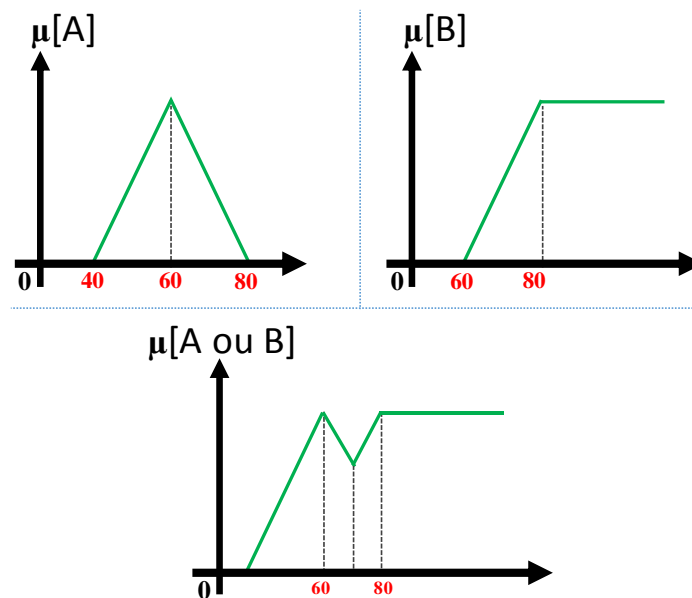


Figure III.17 – L'opérateur OU (union).

## III.5.4 Règles floues

### III.5.4.1 La logique floue et l'intelligence artificielle

La logique floue a pour objectif de formaliser et de mettre en œuvre la façon de raisonner d'un être humain. En cela, elle peut être classée dans le domaine de l'intelligence artificielle. L'outil le plus utilisé dans les applications de logique floue est la base de règles floues. Une base de règles floues est composée de règles qui sont généralement utilisées en parallèle, mais peuvent également être enchaînées dans certaines applications.

Une règle est du type :

**SI** « prédicat » **ALORS** « conclusion ».

Par exemple :

**SI** température élevée et pression forte **ALORS** ventilation forte et soupape grande ouverte.

- a. **Prédicat :** Un prédicat (encore appelé prémisses ou condition) est une combinaison de propositions par des opérateurs ET, OU, NON. Les propositions « température élevée » et « pression forte » de l'exemple précédent sont combinées par l'opérateur ET pour former le prédicat de la règle.
- b. **Conclusion :** La conclusion d'une règle floue est une combinaison de propositions liées par des opérateurs ET. Dans l'exemple précédent, « ventilation forte » et « soupape grande ouverte » sont la conclusion de la règle. Le traitement flou d'une règle comporte trois étapes fonctionnelles résumées dans Figure III.18.

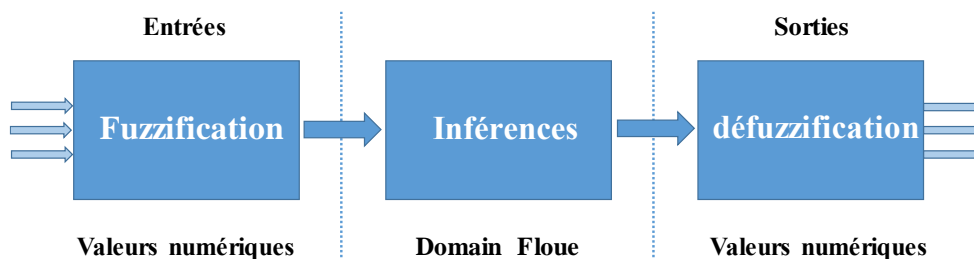


Figure III.18 – Traitement flou.

### III.5.4.2 Principe et étapes de mise en œuvre d'un mécanisme d'inférence floue

Le mécanisme d'inférence le plus couramment utilisé est celui dit de « Mamdani ». Une base de règles floues de Mamdani comprend donc des règles linguistiques faisant appel à des fonctions d'appartenance pour décrire les concepts utilisés (Figure III.19).

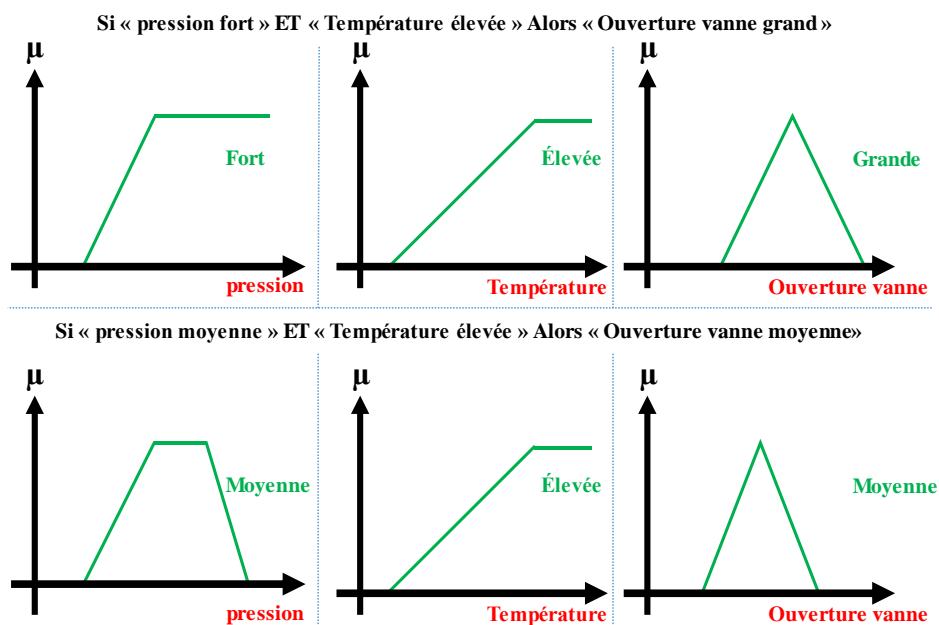


Figure III.19– Implication.

III.5.4.2.1 Fuzzification

La fuzzification consiste à évaluer les fonctions d'appartenance utilisées dans les prédicats des règles, comme illustré par la Figure III.20 :

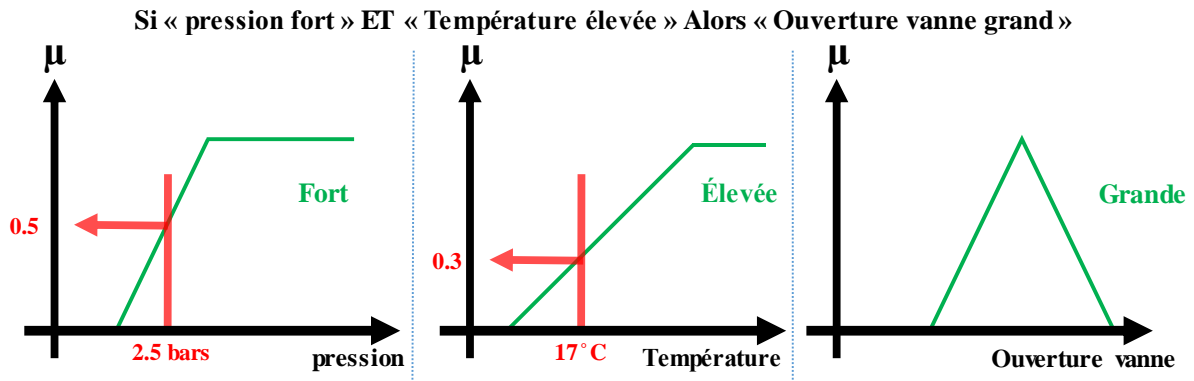


Figure III.20– Fuzzification.

III.5.4.2.2 Degré d'activation

Le degré d'activation d'une règle est l'évaluation du prédicat de chaque règle par combinaison logique des propositions du prédicat, comme illustré par la Figure III.21. Le « ET » est réalisé en effectuant le minimum entre les degrés de vérité des propositions.

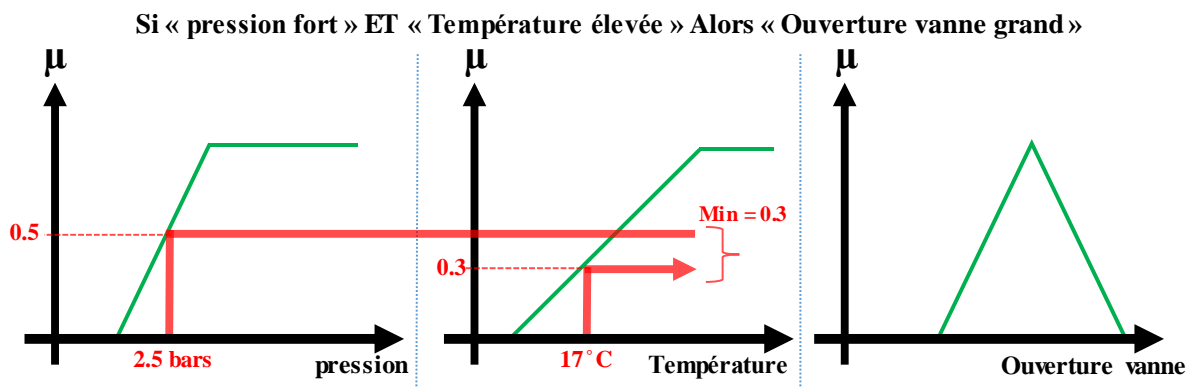


Figure III.21– Activation.

III.5.4.2.3 Implication

Le degré d'activation de la règle permet de déterminer la conclusion de la règle, c'est l'implication. Il existe plusieurs opérateurs d'implication, mais le plus utilisé est le « minimum ». L'ensemble flou de conclusion est construit en réalisant le minimum entre le degré d'activation et la fonction d'appartenance, sorte d'« écrêtage » de la fonction d'appartenance de conclusion (Figure III.22).

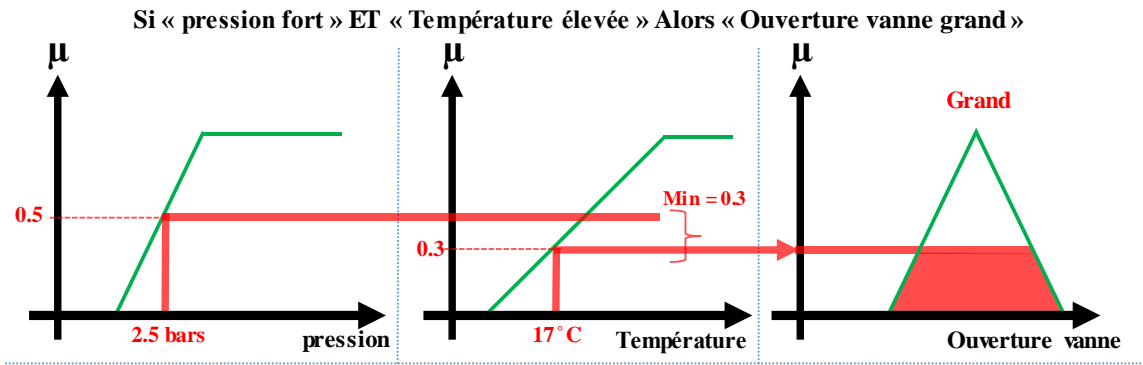


Figure III.22 – Implication.

#### III.5.4.2.4 Agrégation

L'ensemble flou global de sortie est construit par agrégation des ensembles flous obtenus par chacune des règles concernant cette sortie.

L'exemple suivant présente le cas où deux règles agissent sur une sortie. On considère que les règles sont liées par un « OU » logique, et on calcule donc le maximum entre les fonctions d'appartenance résultantes pour chaque règle (Figure III.23).

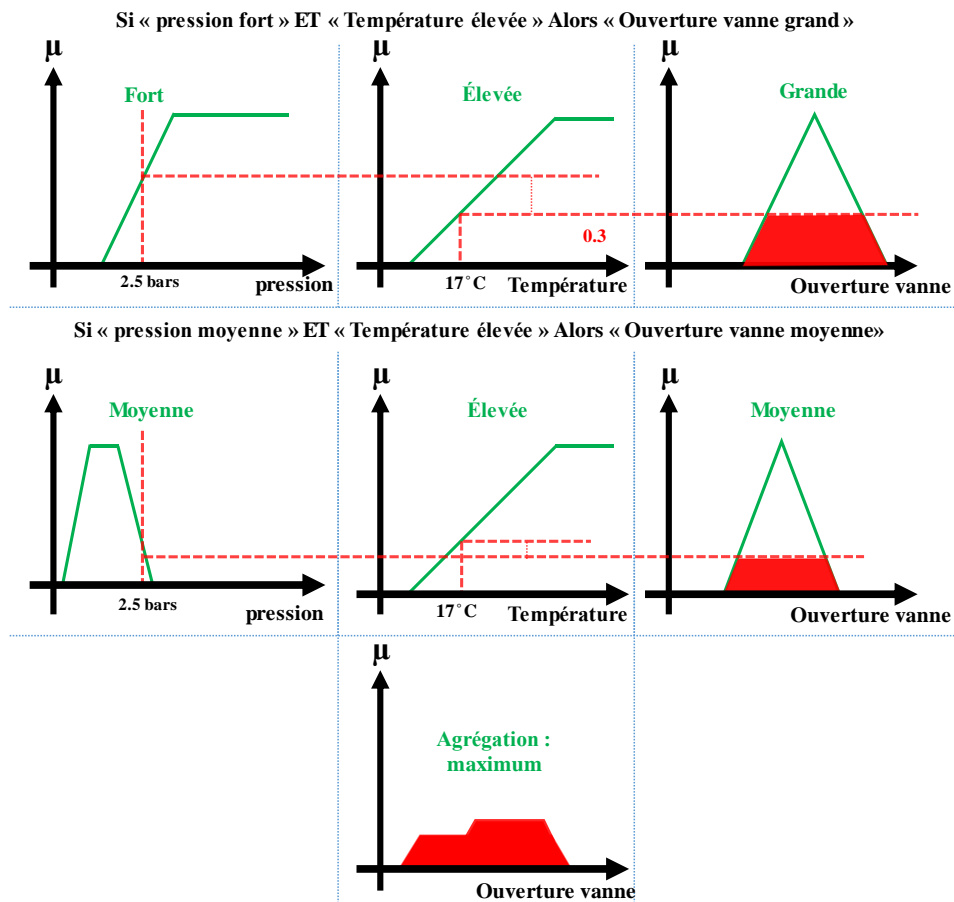


Figure III.23 – Agrégation des règles.

### III.5.4.2.5 Défuzzification

A la fin de l'inférence, l'ensemble flou de sortie est déterminé mais il n'est pas directement utilisable pour donner une information précise à l'opérateur ou commander un actionneur. Il est nécessaire de passer du « monde flou » au « monde réel », c'est la défuzzification.

Il existe plusieurs méthodes de défuzzification : centre de gravité de la surface, bissecteur de la surface, moyenne des maximas, plus petit des maximas en valeur absolue, plus grand des maximas en valeur absolue. La plus souvent rencontrée étant la méthode de calcul du « centre de gravité » de l'ensemble flou (Figure III.24).

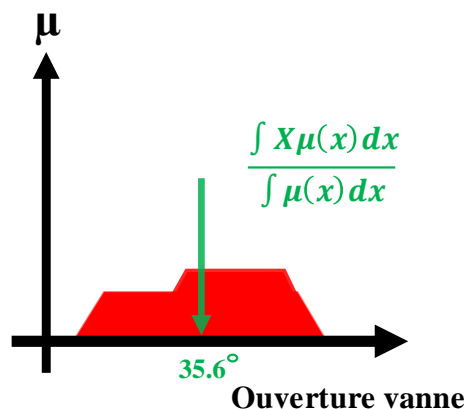


Figure III.24 – Défuzzification par centre de gravité.

## III.5.5 Avantages et inconvénients du réglage par logique floue

### III.5.5.1 Les Avantages

Le réglage par logique floue présente les avantages suivants :

- Le non nécessité de la modélisation du système.
- La possibilité d'implémenter des connaissances linguistiques de l'opérateur du processus.
- La maîtrise du système à régler avec un comportement complexe (systèmes non linéaire et difficile à modéliser).
- La disponibilité de système de développement efficace, soit par microprocesseur ou PC, soit par des circuits intégrés.

### III.5.5.2 Les inconvénients

- Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix de grandeur mesurée).
- Détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification).
- L'approche artisanale et asymptotique (implantation des connaissances de l'opérateur souvent difficile).
- L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute circonstances (en l'absence d'un modèle valable).
- La cohérence des inférences non garanties (possibilité d'apparition de règles d'inférences contradictoires).

### III.5.6 La commande MPPT flou

Dans un but de poursuivre le point maximum de puissance, comme pour toutes les méthodes de poursuite MPPT, le contrôleur MPPT à base de logique floue fonctionne aussi suivant le même principe. Un convertisseur DC/DC (continu-continu) est généralement utilisé entre le générateur photovoltaïque et la charge (Figure III.25).

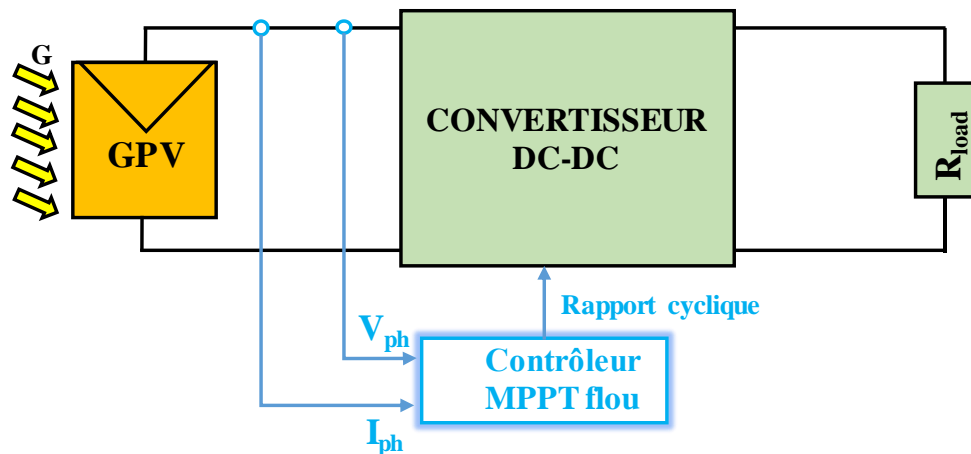


Figure III.25 – Schéma synoptique d'un système PV avec une commande MPPT flou.

Comme tous contrôleurs flous, le contrôleur MPPT flou comporte les trois blocs suivants :

**Fuzzification** des variables d'entrées par l'utilisation des fonctions triangulaire, ensuite **l'inférence** ou ces variables fuzzifiées sont comparées avec des ensembles prédéfinis pour déterminer la réponse appropriée. Et enfin **la défuzzification** pour convertir les sous-ensembles fuzzifiés en valeurs en utilisant la défuzzification par le centre de gravité. La structure de base de notre contrôleur flou est donnée par la Figure III.26.

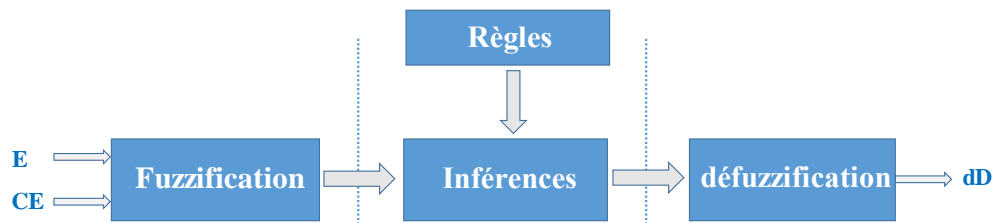


Figure III.26 – Structure de base du contrôleur flou.

Avec :

- $dD$  : La variation du rapport cyclique D,
- $E$  : L'erreur,
- $CE$  : La variation de l'erreur.

Pour l'implémentation de notre contrôleur flou, nous allons nous baser sur l'algorithme MPPT P&O, pour modéliser les différentes parties de ce contrôleur.

### III.5.6.1 Fuzzification

La tension et le courant actuels du générateur photovoltaïque sont mesurés instantanément, et la puissance peut être ainsi calculée :

$$P(k) = i(k) \cdot v(k) \quad (\text{III.8})$$

La commande est déterminée sur la base de la satisfaction de deux critères concernant deux variables d'entrées de contrôleur proposé, à savoir l'erreur  $E$  et le changement d'erreur  $CE$ , à un instant d'échantillonnage  $k$ . Les variables  $E$  et  $CE$  sont exprimées comme suit :

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (\text{III.9})$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (\text{III.10})$$

Où  $P(k)$  et  $V(k)$  sont la puissance et la tension de module PV, respectivement.

Dans le cas de notre travail on va choisir l'univers de discours des variables d'entrée (erreur ( $E$ ) et le changement d'erreur ( $CE$ )) et de sortie ( $dD$ ) d'après la méthode P&O qui a été étudiée précédemment.

D'après la Figure III.27 on peut déduire l'univers du discours de chaque variable d'entrée/sortie comme suit :

$$\begin{cases} E = \frac{\Delta P}{\Delta V} \in [-50 \quad 6.6] \\ CE = E(k) - E(k-1) \in [-50 \quad 6.6] \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

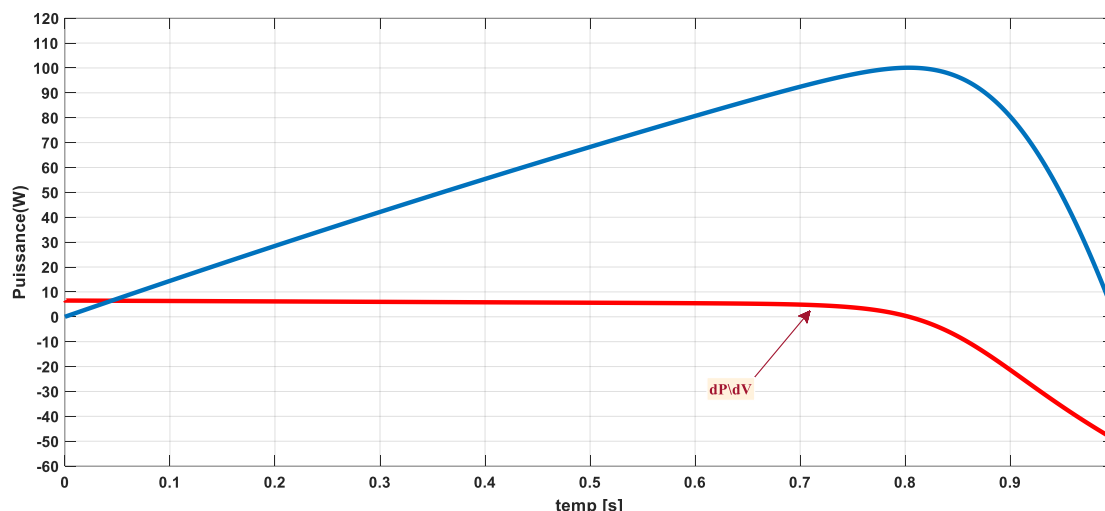


Figure III.27 – variation de la puissance par rapport à la variation de la tension.

De la même manière, nous pouvons définir l'intervalle de variation du rapport cycle  $D$  comme suit :

$$dD \in [-0.1 \ 0.1] \quad (III.12)$$

La valeur de l'entrée  $E(k)$  nous indique de quel côté est situé le point de fonctionnement par rapport au point de puissance maximale MPP. Si cette valeur est positive, cela veut dire que le point de fonctionnement se trouve à gauche du point MPP, si par contre elle est négative alors le point de fonctionnement est à droite du point MPP.

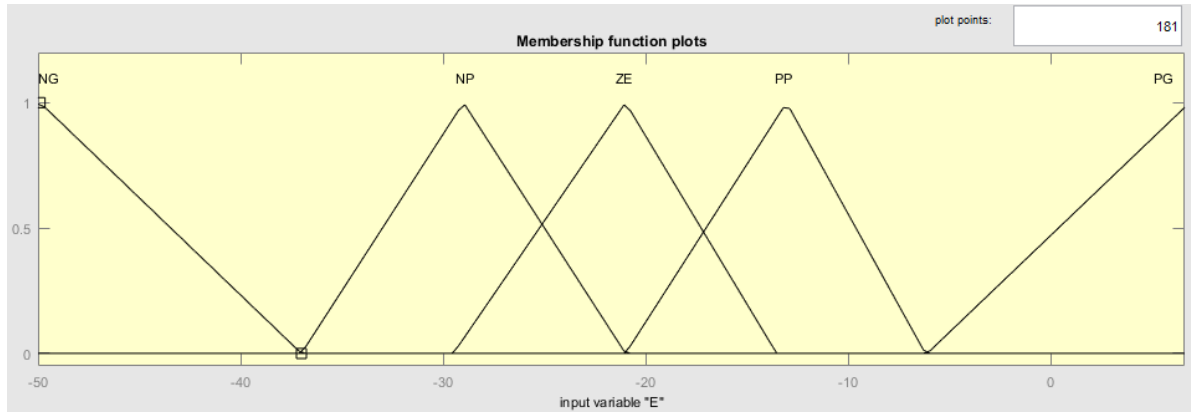
L'entrée  $CE(k)$  nous permet d'estimer le degré d'éloignement entre le point de fonctionnement et le point MPP. Si sa valeur est petite, cela veut dire que le point de fonctionnement est encore loin du point MPP, si par contre cette valeur est élevée cela indique que le point de fonctionnement est très proche du point MPP.

Ces deux entrées nous permettent de prendre la décision appropriée sur la valeur de la sortie  $dD$  du pas du rapport cyclique. Augmenter le rapport cyclique du convertisseur DC-DC permet d'augmenter la tension du point de fonctionnement et inversement.

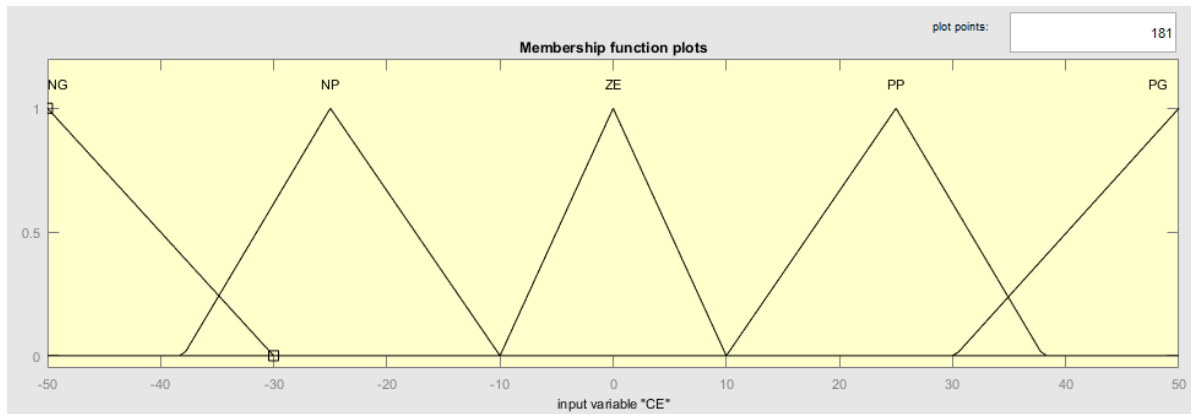
### III.5.6.2 Les variables linguistiques

En utilisant les bases des sous-ensembles flous, on peut exprimer les variables d'entrées et de sorties en terme des variables linguistiques suivantes : PG : (positif grand), PP : (positif petit), ZE : (environ Zéro), NP : (négatif petit) et NG : (négatif grand).

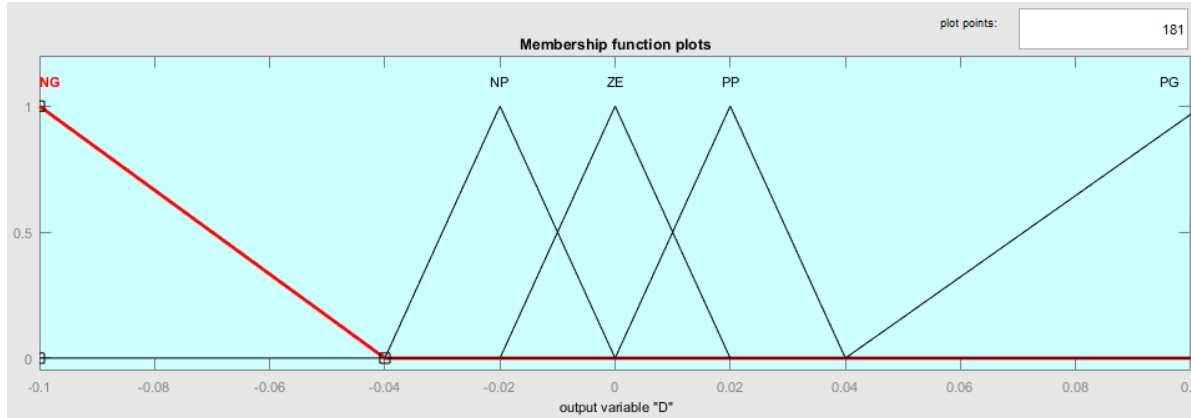
La Figure III.28 – Fonctions d'appartenances de : (a) L'entrée erreur  $E$ , (b) L'entrée changement d'erreur  $CE$  et (c) La sortie  $dD$ . montre les fonctions d'appartenance du cinq sous-ensemble flou de base pour les variables d'entrée et de sortie.



( a )



( b )



( c )

Figure III.28 – Fonctions d'appartenances de : (a) L'entrée erreur E, (b) L'entrée changement d'erreur CE et (c) La sortie dD.

### III.5.6.3 Méthodes d'inférence (les règles floues)

La Figure III.29 montre l'évolution de la variation de la puissance par rapport à la variation de la tension  $dp/dv$  les points de 1 à 10 montre le sens de variation et l'éloignement de la valeur courant par rapport au point maximum de puissance.

Le Tableau III.3 représentent la méthode que nous avons suivie pour extraire les règles floues à partir de la compréhension du système en fonctionnement avec la méthode P&O.

Ceci implique que : "si le point de fonctionnement est éloigné du point de puissance maximale MPP au côté gauche et le changement de la pente dans la courbe P-I est environ zéro, alors lever le rapport cyclique.

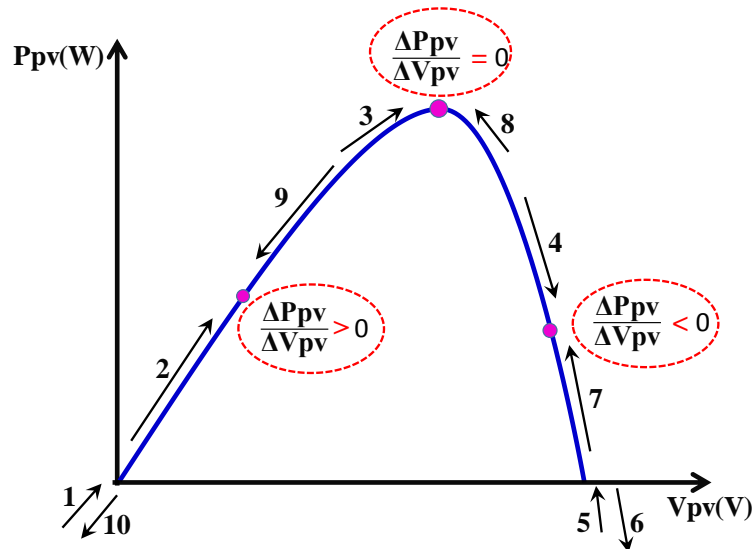


Figure III.29 – La variation du point de puissance maximal.

Tableau III.3 – Les règles du contrôleur flou.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta P$	+	+	0	-	-	+	+	0	-	-
$\Delta V$	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-
$E = \Delta P / \Delta V$	+	+	0	-	-	-	-	0	+	+
$\Delta E$	+	+	0	-	-	-	-	0	+	+
D	PG	PP	ZE	NP	NG	PG	PP	ZE	NP	NG

Le Tableau III.4 montre les règles du contrôleur flou, où toutes les entrées de la matrice sont les fonctions d'appartenance floues de l'erreur E et celle du changement de l'erreur CE et la variation du rapport cyclique dD. Dans le cas de la commande floue, la règle de commande doit être conçue pour que la variable d'entrée E doive toujours être zéro.

Tableau III.4 – Tableau des règles d'inférence.

	CE	NG	NP	ZE	PP	PG
E						
NG		NG	NG	NP	NP	ZE
NP		NP	NG	NP	NP	NG
ZE		NP	NP	ZE	PP	PP
PP		PP	PP	ZE	ZE	PG
PG		PG	PP	PP	PG	PG

Le Tableau III.4 inclut 25 règles floues de commande. Ces règles sont employées pour la commande de convertisseur SEPIC tels que la puissance maximum du panneau solaire est vérifiée. Par exemple la case (5, 3) du Tableau 4.1 représente la règle de commande :

**SI** E est PG et CE est ZE alors dD est PP.

Pour la commande par logique floue. On utilise en générale une des méthodes suivantes.

- Méthode d'inférence MAX-MIN.
- Méthode d'inférence MAX-PROD.
- Méthode d'inférence SOMME-PROD.

Comme la méthode d'inférence flou de Mamdani est employée avec la loi de combinaison d'opération flou MAX –MIN. Dans notre cas, les opérateurs logiques (voir Tableau III.5) sont interprétés comme suit :

**Tableau III.5 – Interprétation des opérations logiques.**

Opération	Interprétation
<b>ET</b>	Minimum
<b>OU</b>	Maximum

### III.5.6.4 Défuzzification

Les sorties floues des règles floues précédentes sont combinées en utilisant la fonction MAX pour former un seul ensemble flou, cet ensemble est défuzzifié pour générer une seule valeur de commande, il existe plusieurs méthodes de défuzzification, nous avons choisi celle du centre de gravité qui donne de meilleure performance.

$$dD = \frac{\sum_{j=1}^n \mu(D_j) \cdot D_j}{\sum_{j=1}^n \mu(D_j)} \quad (\text{III.13})$$

Le logigramme suivant (Figure III.30) donne un aperçu sur le fonctionnement la technique MPPT basée sur le contrôleur flou.

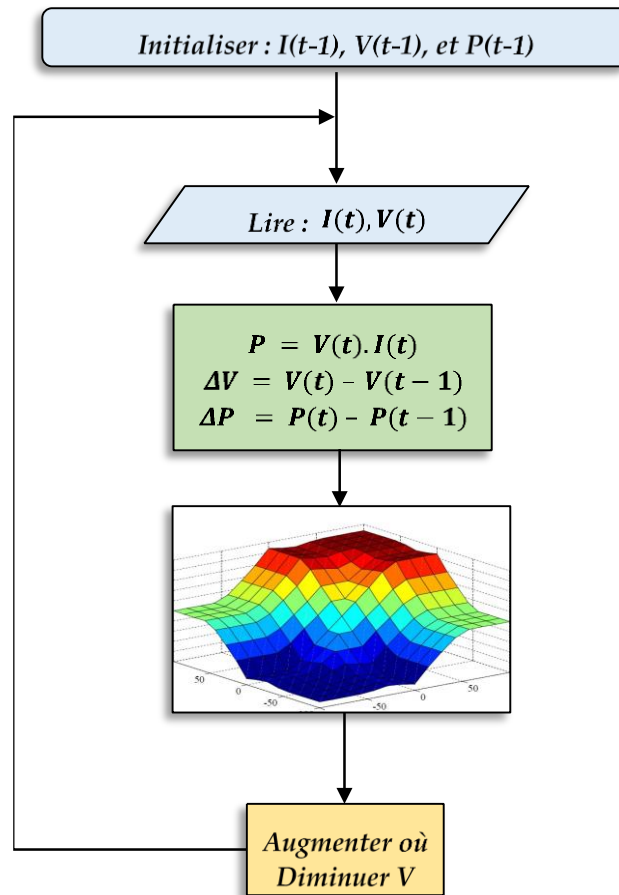


Figure III.30 – Organigramme de la technique MPPT basée sur le contrôleur flou.

## III.6 Conclusion

Ce chapitre a pour objectif de présenter les techniques de poursuite du point de puissance maximale MPPT. Dans cette présentation, nous nous sommes présentées deux techniques. La première est la technique MPPT P&O et la deuxième est la technique MPPT floue.

Nous avons ainsi montré les principes de base de la logique floue, les différentes définitions de fonctions d'appartenances, règles d'inférences, méthodes d'inférences et la défuzzification. Ces spécifications nous permettront de bien comprendre la nature du contrôle flou et nous aiderons à faire le choix entre les différentes configurations possibles.

En fin, nous avons présenté l'essentiel de l'implantation de l'algorithme de recherche du point de puissance maximal en utilisant les techniques de logique floue, nous nous sommes basés sur la méthode MPPT P&O classique pour définir les éléments essentiels du contrôleur flou.

## **Chapitre IV. Simulations et évaluation des résultats**

*« La connaissance s'acquiert par l'expérience, tout le reste n'est que de l'information. »*

*Albert Einstein.*

# Chapitre IV. Simulations et évaluation des résultats

## IV.1 Introduction

Un contrôleur flou peut être vu comme un système expert basé sur la connaissance de l'opérateur. Des expériences ont montré que, dans de nombreux cas, les résultats obtenus avec un contrôleur flou (technique non conventionnelle) sont meilleurs que ceux obtenus avec des algorithmes de contrôle conventionnels. Ainsi le contrôle par logique floue peut être vu comme un pas vers un rapprochement entre le contrôle mathématique précis et la prise de décision humaine.

Dans ce chapitre nous allons évaluer les deux méthodes de poursuite MPPT que nous avons introduit, notre propre méthode de poursuite utilisant le contrôleur flou et la méthode P&O. Les deux systèmes sont simulés en les combinant avec le convertisseur DC/DC (SEPIC), sous les conditions environnementales stables et de nombreux changements des conditions atmosphériques : (changement de l'ensoleillement et de température).

## IV.2 Description du système photovoltaïque global

La Figure IV.1 montre le schéma bloc sous Simulink du système photovoltaïque général, ce dernier se compose des éléments suivants déjà décrit dans les chapitre précédent, c.-à-d. le générateur PV VICTRON de 100W, le Convertisseur SEPIC qu'on a dimensionné et le bloc qui contient le contrôleur MPPT et qui permet de maximiser la puissance générée par le GPV.

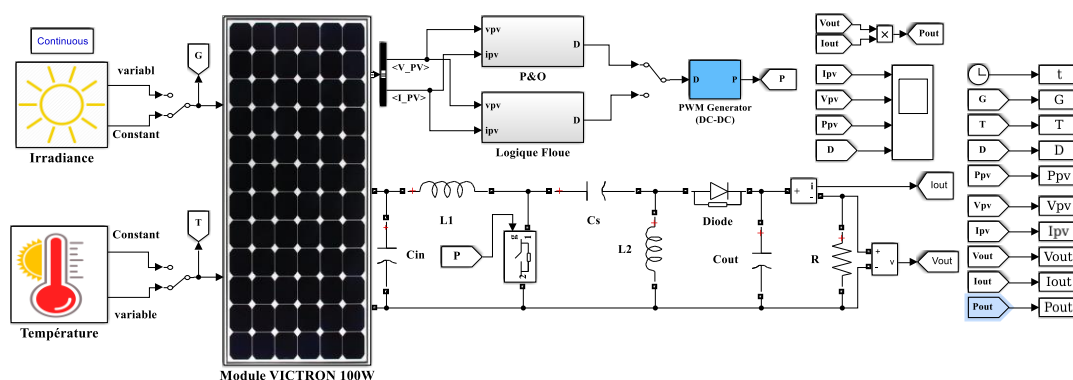


Figure IV.1–Schéma bloc du système PV avec MPPT Floue et P&O .

Les éléments de puissance utilisent le toolbox “SimPowerSystems”, qui est intégré à Simulink, il permet de simuler ces éléments avec les détails nécessaires pour avoir les résultats les plus réalistes possible. Dans toutes les simulations qu'on va voir dans ce chapitre on a fait une comparaison des résultats obtenus avec le MPPT floue avec ceux obtenus avec un MPPT P&O.

Dans les conditions nominales ( $1000 \text{ W/m}^2$ ,  $25^\circ$ ), le panneau photovoltaïque de marque VICTRON 100W, génère une puissance de 100 W correspondant à un tension optimale  $V_{mpp}$  de 18 V et un courant optimal  $I_{mpp}$  de 5.56 A, comme illustré sur la Figure IV.2.

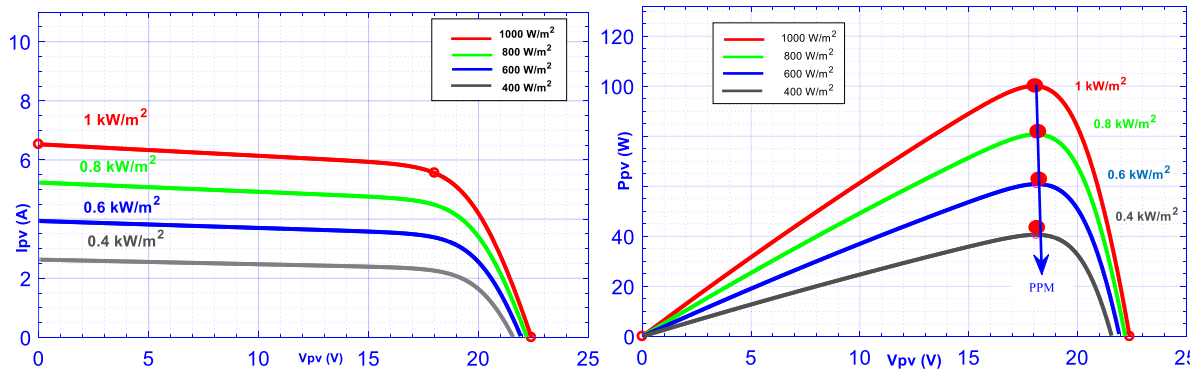


Figure IV.2 – Caractéristiques I–V et P–V de panneau photovoltaïque.

Les paramètres des différents composants du système étudié sont consignés dans le Tableau IV.1.

Tableau IV.1 – Paramètres électriques du système étudié.

Paramètres	Valeur
<i>Puissance max de module</i>	100 W
<i>Courant max de module</i>	6.53 A
<i>Tension max de module</i>	22.4 V
<i>Ondulation de la tension</i>	2 %
<i>Charge</i>	4 $\Omega$
<i>fréquence</i>	20 kHz
<i>Convertisseur associé à la GPV</i>	$L1=L2=2.8395*10^{-4} \text{ H}$ $C1=2.4388*10^{-5} \text{ F}$ $C2=1.3169*10^{-4} \text{ F}$

### IV.3 Résultats de simulation de la méthode P&O

La méthode MPPT P&O, est généralement une technique très utilisée pour contrôler le point de puissance maximale d'un système PV. Cette méthode de contrôle est déjà étudiée dans le chapitre II.

La Figure IV.3 illustre le schéma bloc de la commande P&O sous Simulink. Ce schéma a été modélisée à l'aide de l'organigramme Figure III.5.

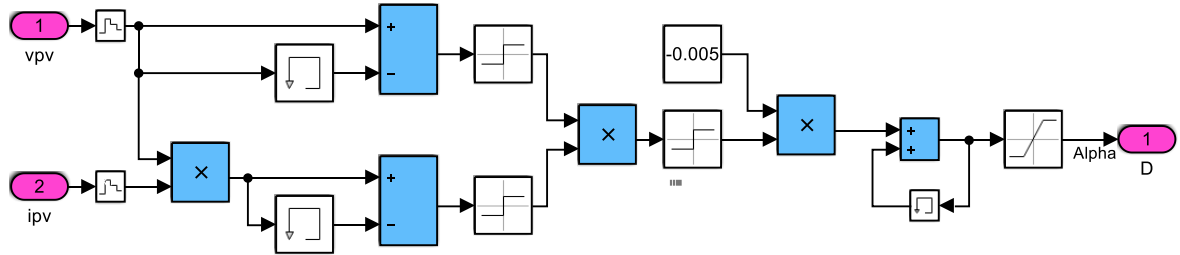


Figure IV.3 – Modèle ‘SIMULINK’ du contrôleur MPPT P&O.

Pour faire une étude de la robustesse de contrôleur MPPT P&O des différentes conditions environnementales on effectue les tests suivants :

- Ensoleillement variable et maintenir la température à une valeur constante ;
- Température variable et maintenir l'ensoleillement à une valeur constante.

#### IV.3.1 Fonctionnement sous un ensoleillement variable

Pour présenter l'effet de l'ensoleillement  $G$  sur la puissance, on fait maintenir la température à une valeur constante  $T=25^{\circ}\text{C}$  et on fait varier rapidement l'ensoleillement plusieurs fois de sens croissant de 800, 1000  $\text{W}/\text{m}^2$  puis avec une diminution rapide de 1000, 800, 600  $\text{W}/\text{m}^2$  pour créer plusieurs points de puissance maximale que le contrôleur doit les suivre come montré sur la Figure IV.4.

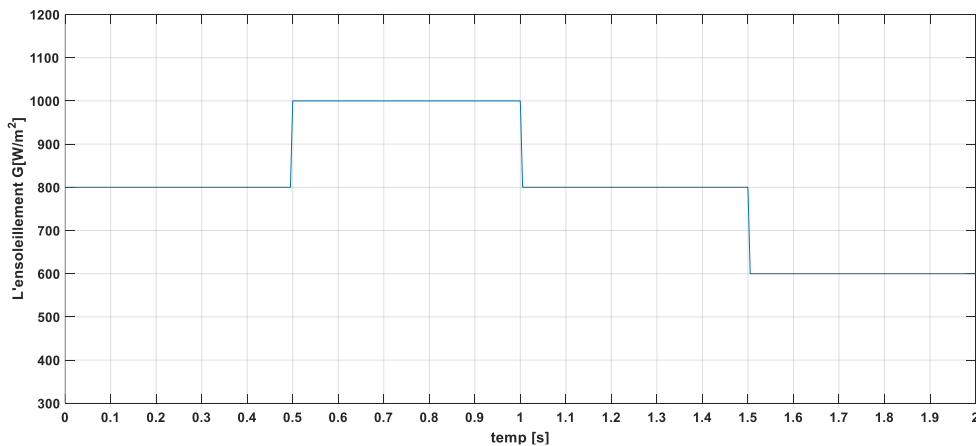


Figure IV.4 – Profil de l'ensoleillement considéré.

Le Figure IV.5, et IV.6 représenté les résultats de simulation obtenus lors d'un changement brusque et variations rapides du niveau de l'ensoleillement, afin de tester l'algorithme MPPT de type P&O, Le temps de simulation choisi est de 2s, ce qui n'est pas très réaliste, mais permet néanmoins une meilleure visibilité du résultat.

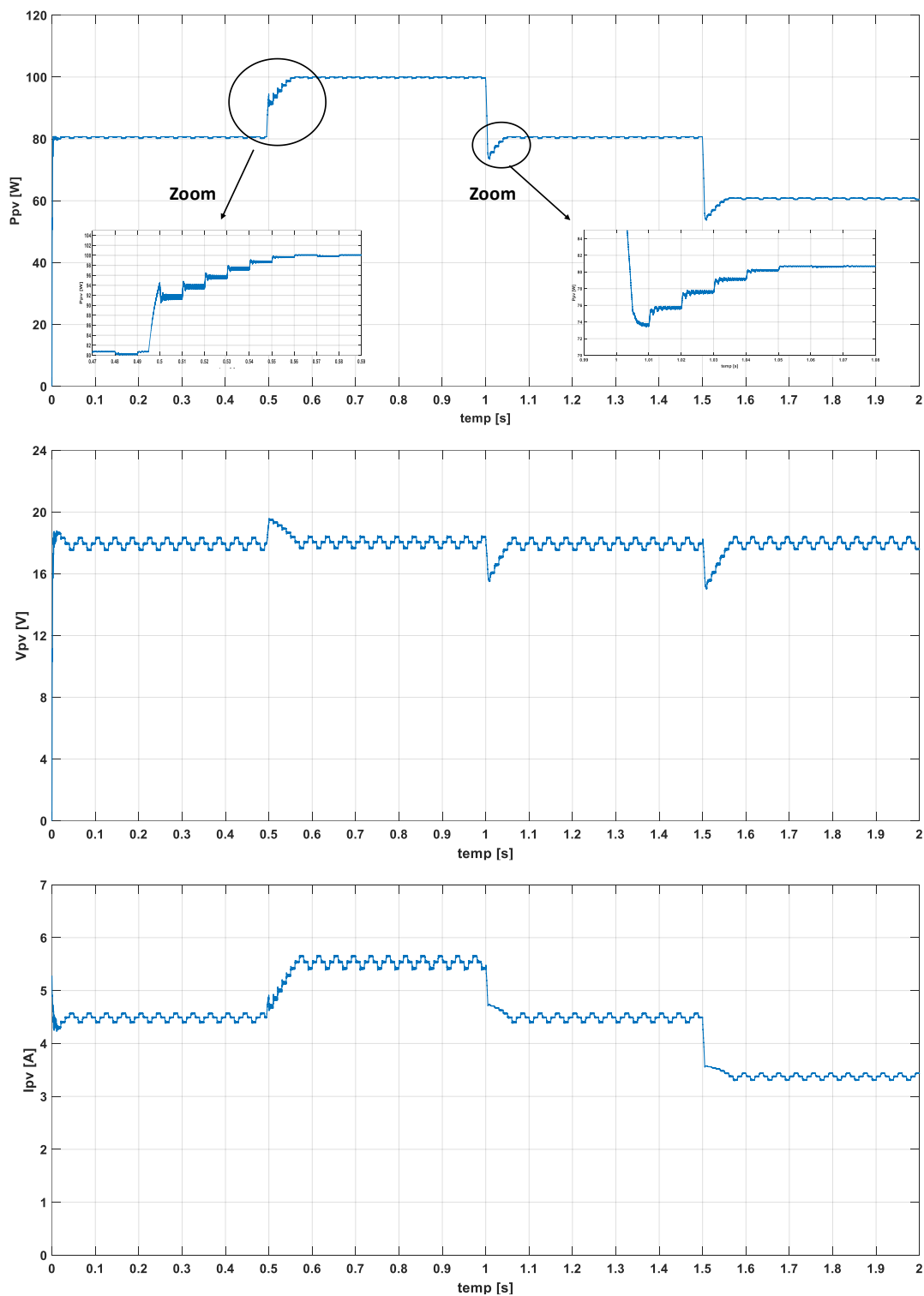
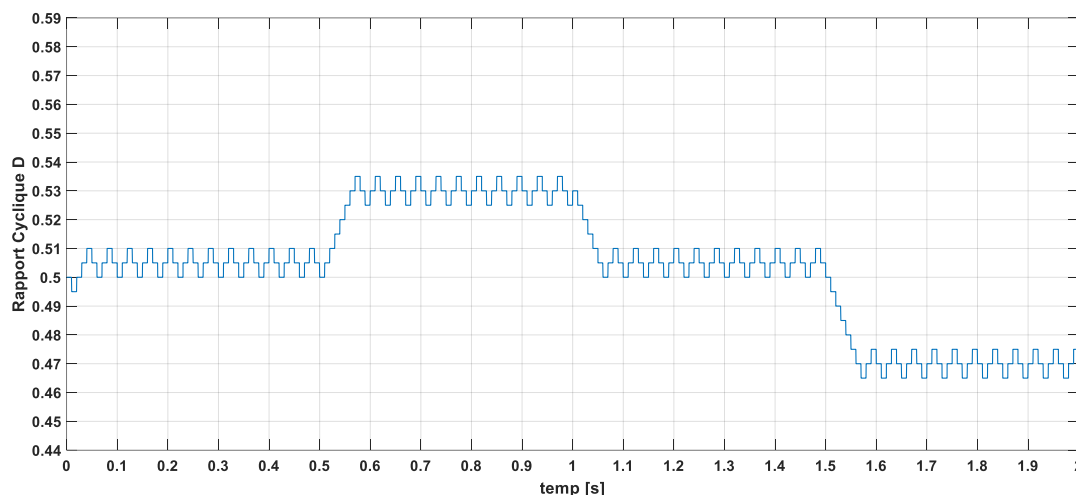


Figure IV.5 – Evolution de puissance, tension et courant du GPV (P&O).



**Figure IV.6 – Courbe de rapport cyclique D du GPV (P&O).**

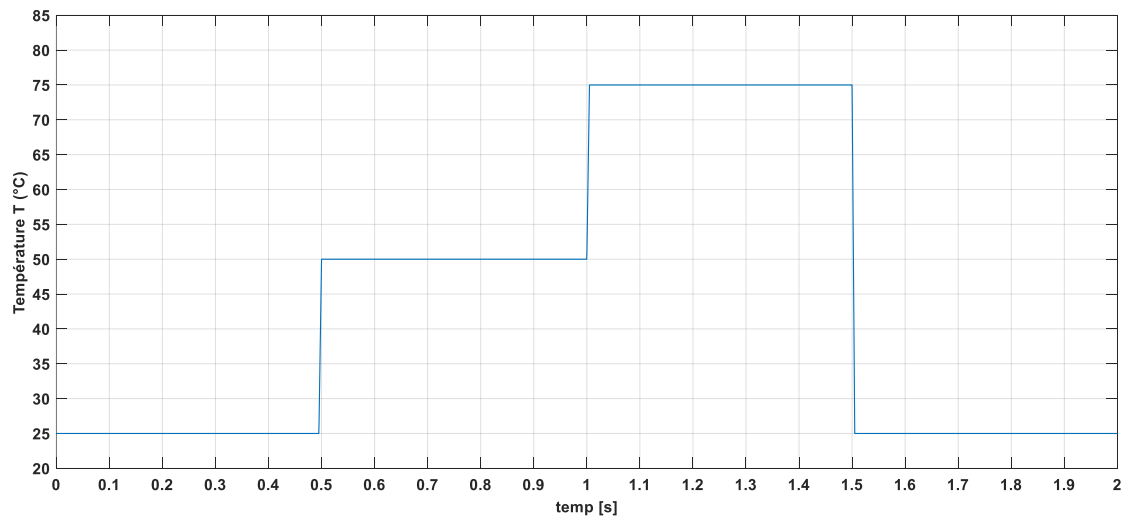
On remarque qu'il existe une relation de proportionnalité entre la puissance et l'ensoleillement.

Pour un ensoleillement de  $1000 \text{ W/m}^2$  durant l'intervalle de temps entre  $t = [0.5\text{s} ; 1\text{s}]$ , le point de fonctionnement optimale du panneau photovoltaïque correspond à la puissance de 100 W, à la tension varie autour de sa valeur optimale de 18 V et au courant varie autour de sa valeur optimale de 5.56 A, ce qui est compatible avec les caractéristiques du panneau présentées sur la Figure IV.2. Cela démontre que la commande MPPT fonctionne efficacement.

La figure 'zoom' représente la puissance du GPV qui va augmenter rapidement jusqu'au niveau de 100W où elle se stabilise, ainsi elle présente une oscillation importante autour du point de la puissance maximale.

### IV.3.2 Fonctionnement sous une température variable

Pour présenter l'effet de la température  $T$  sur la puissance, on fait maintenir la l'ensoleillement à une valeur  $G = 1000 \text{ W/m}^2$  et on fait varier rapidement la température plusieurs fois de sens croissant de 25, 50 et 75 °C puis avec une diminution rapide de 75 à 25°C pour créer plusieurs points de puissance maximale que le contrôleur doit les suivre comme montré sur Figure IV.7.



**Figure IV.7 – Profil de la température considéré.**

Figure IV.8, et IV.09 représenté les résultats de simulation obtenus lors d'un changement brusque et variations rapides du niveau de la température, afin de tester l'algorithme MPPT de type P&O, Le temps de simulation choisi est de 2s. On remarque qu'il existe une relation de disproportionné entre la puissance et la température.

Pour une température de 25°C durant l'intervalle de temps entre  $t = [0s ; 0.5s]$ , le point de fonctionnement optimale du panneau photovoltaïque correspond à la puissance de 100 W, à la tension varie autour de sa valeur optimale de 18 V et au courant varie autour de sa valeur optimale de 5.56 A, ce qui est compatible avec les caractéristiques du panneau présentées sur la Figure IV.2. Cela démontre que la commande MPPT fonctionnement efficacement.

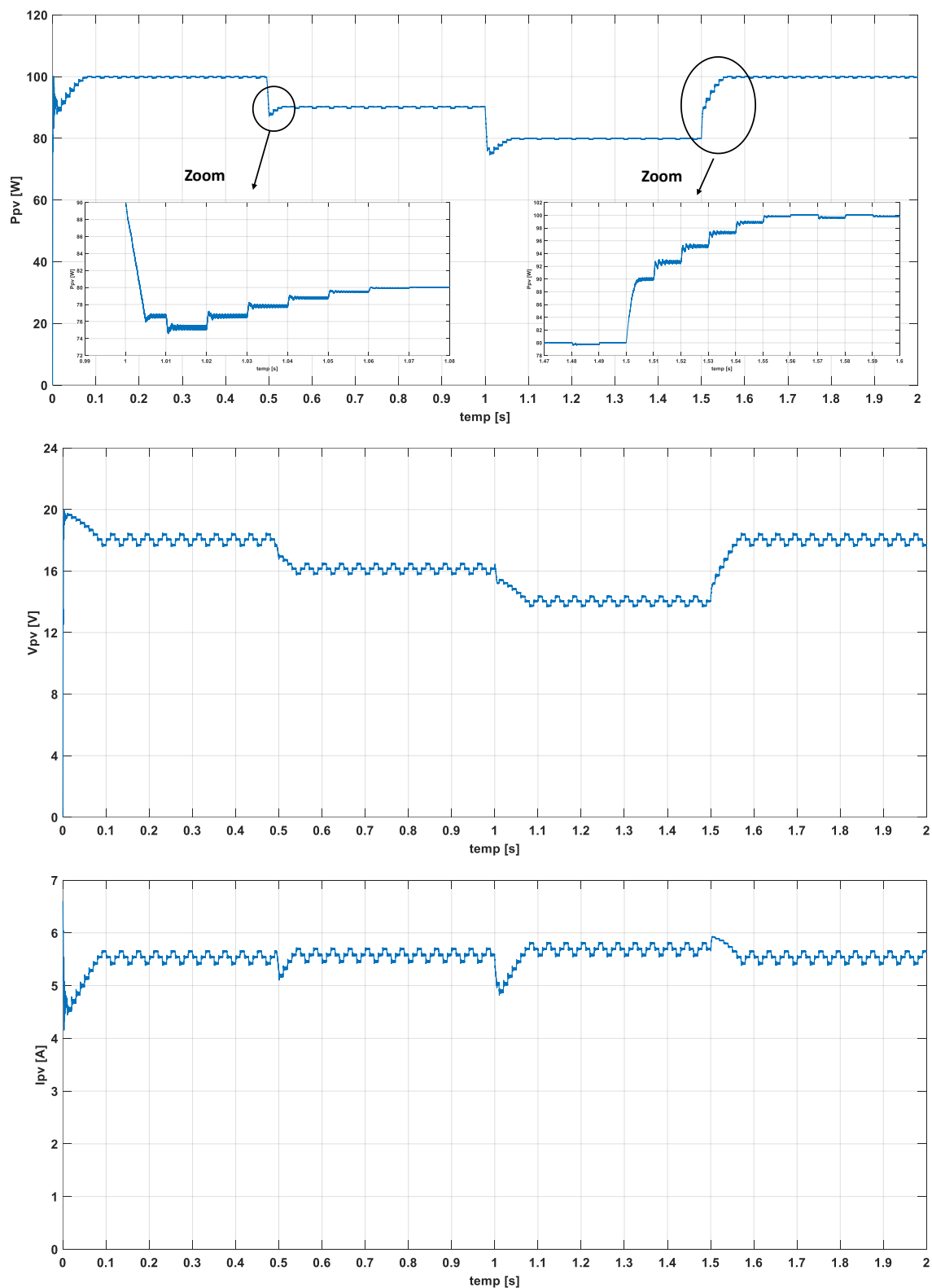


Figure IV.8 – Evolution de puissance, tension et courant du GPV (P&O).

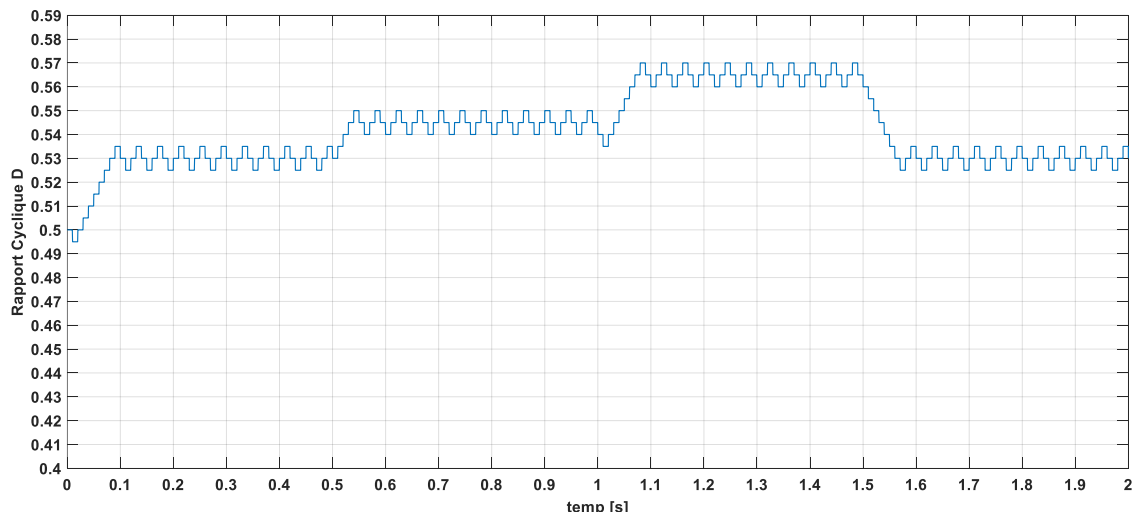


Figure IV.9 – Courbe de rapport cyclique D du GPV (P&O).

D’après les résultats de simulation obtenus, on remarque qu’une variation rapide de la température (augmentation ou diminution) provoque une variation considérable de la tension ( $V_{pv}$ ), par contre le courant  $I_{pv}$  dans ce cas se varie légèrement. Ainsi on constate que les courbes de puissance, de tension et du courant présentent des oscillations dans le régime permanent.

## IV.4 Résultats de simulation de la méthode MPPT flou

La méthode MPPT flou, est une technique intelligente utilisée pour contrôler le point de puissance maximale d’un système PV.

Nous allons utiliser le même modèle Simulink que celui utilisé avec la MPPT P&O, nous avons réalisé quelque modification pour le calcul de E et CE, ainsi que l’adaptation de la sortie du contrôleur qui est la variation du rapport cyclique.

La Figure IV.10 illustre le schéma bloc de la commande MPPT flou sous Simulink.

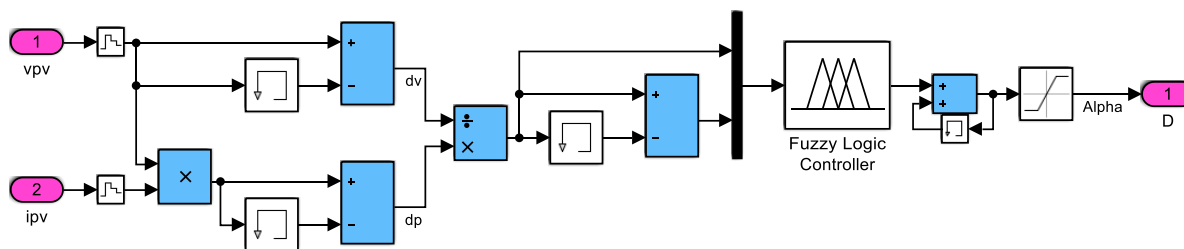


Figure IV.10 – Modèle ‘SIMULINK’ du contrôleur MPPT flou.

Après avoir dimensionné tous les éléments du contrôleur flou nous allons l'intégrer dans notre système grâce à la toolbox Fuzzy de Simulink (Figure IV.11).

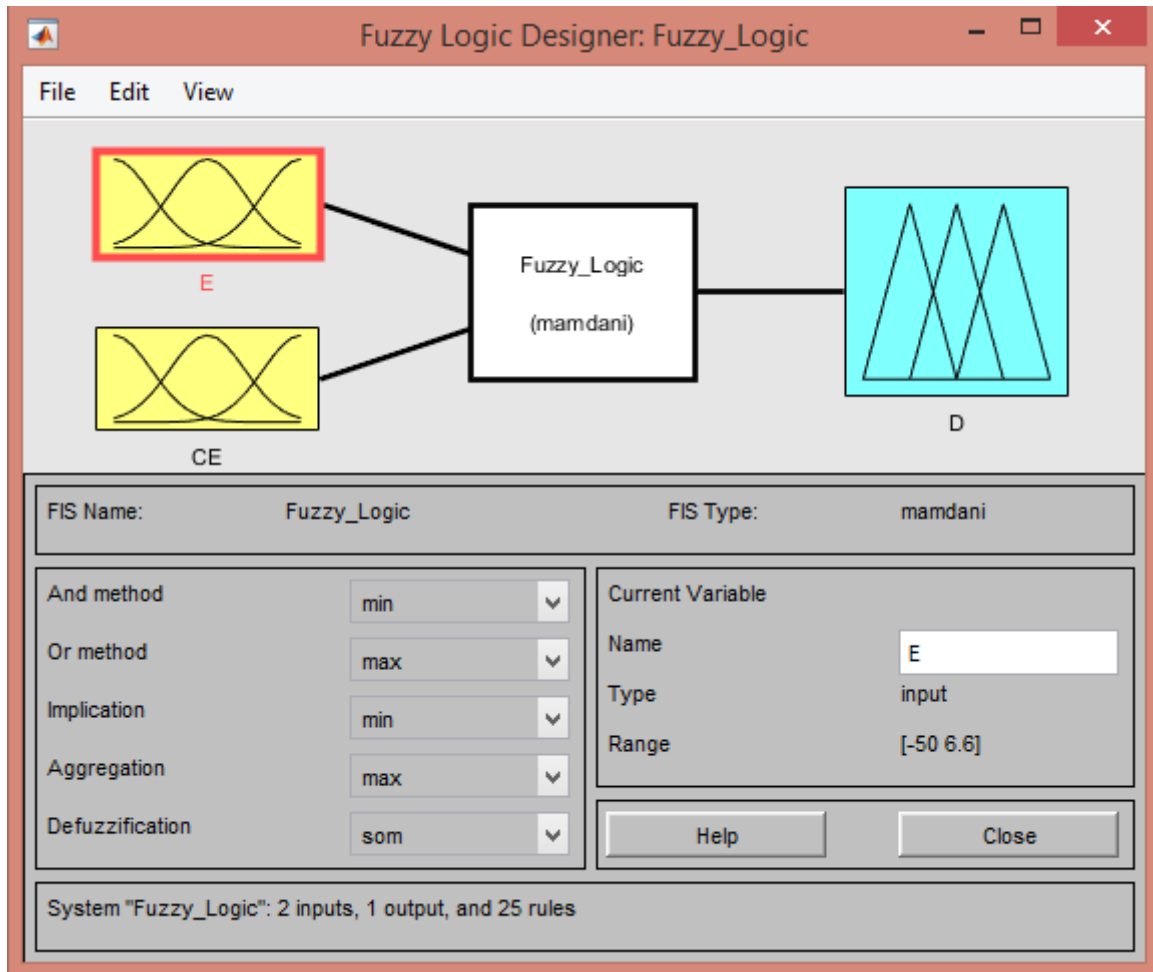


Figure IV.11 – Schéma générale du contrôleur MPPT flou.

Pour faire une étude de la robustesse de contrôleur MPPT Flou des différentes conditions environnementales on effectue les mêmes tests utilisés dans la méthode P&O

- Ensoleillement variable et maintenir la température à une valeur constante ;
- Température variable et maintenir l'ensoleillement à une valeur constante.

#### IV.4.1 Fonctionnement sous un ensoleillement variable

Nous avons utilisé Le même profil de l'ensoleillement utilisé précédemment dans Figure IV.4, Pour tester la technique proposée on fait maintenir la température à une valeur constante  $T=25^{\circ}\text{C}$ .

L'évolution de la puissance du GPV commandé par la méthode proposée est présentée par la Figure IV.12, On peut voir le changement rapide de la puissance suivant le changement de l'ensoleillement.

Le temps de simulation choisi est toujours 2s, Le Figure IV.12 et IV.13 représenté les résultats de simulation obtenus lors d'un changement brusque et variations rapides du niveau de l'ensoleillement.

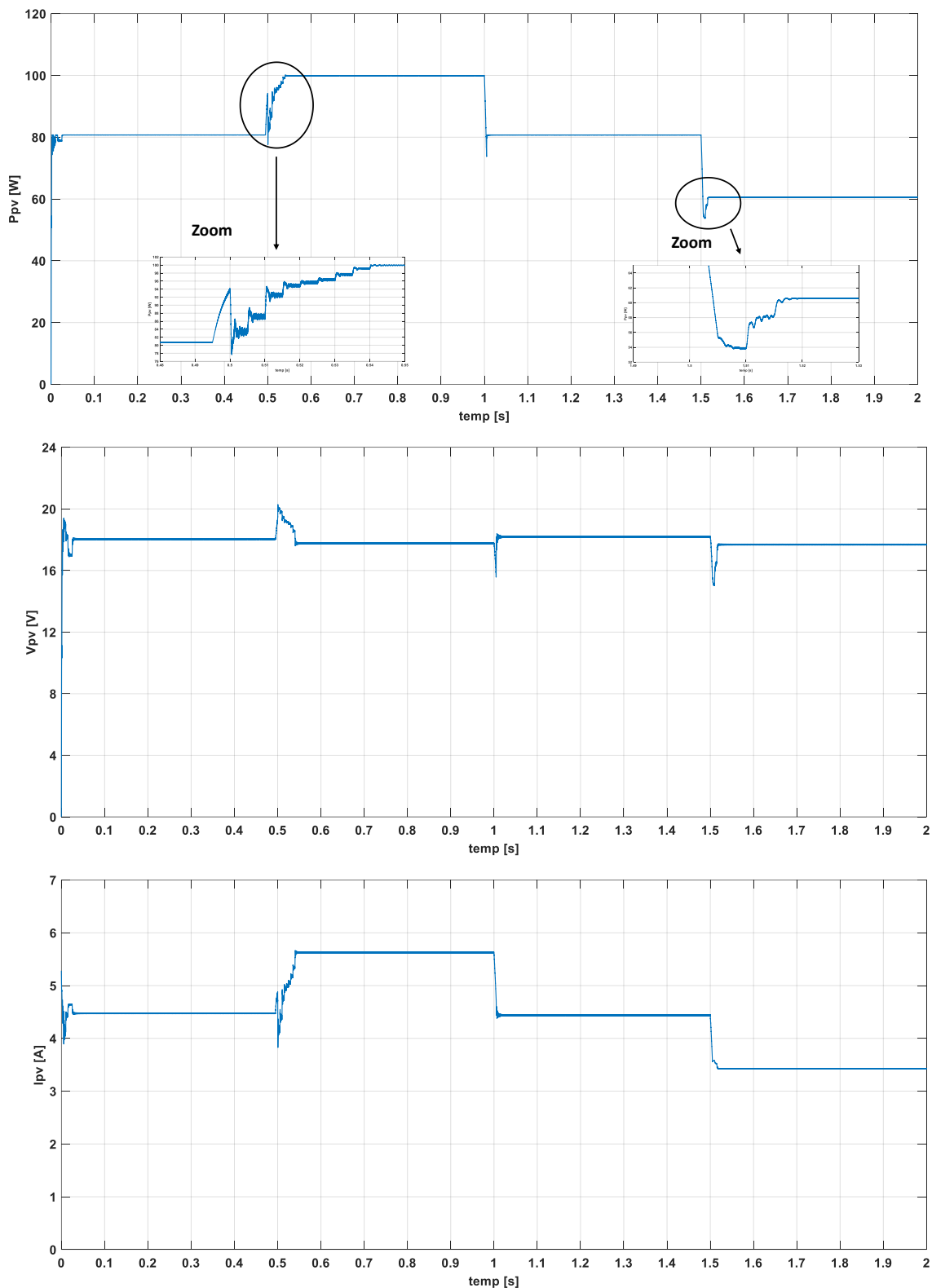


Figure IV.12 – Evolution de puissance, tension et courant du GPV (flou).

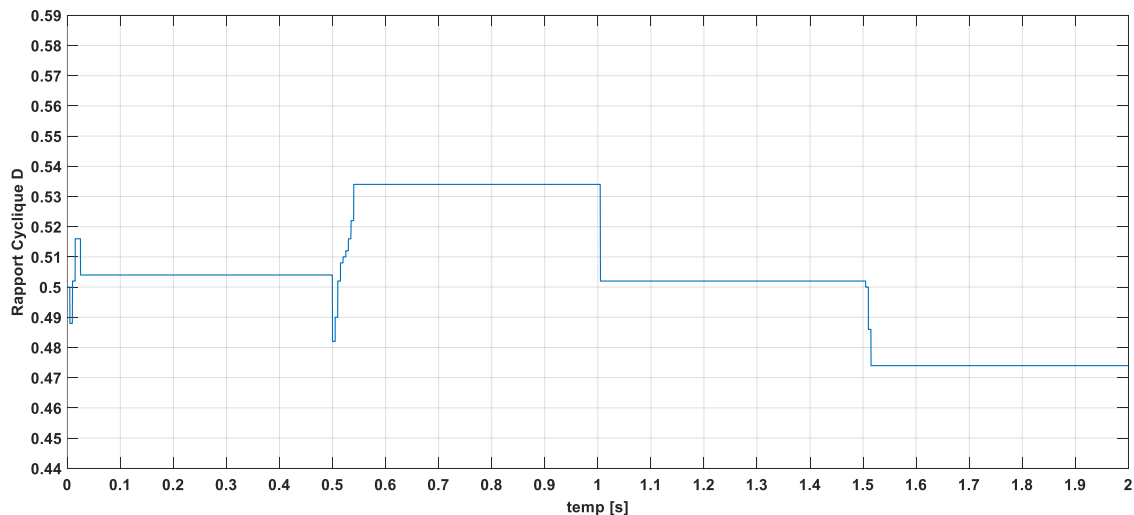


Figure IV.13 – Courbe de rapport cyclique D du GPV (flou).

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque que le contrôleur flou conduit à des meilleures performances, avec l'absence des oscillations dans le régime permanent, et un temps de réponse plus rapide.

## IV.4.2 Fonctionnement sous une température variable

Nous avons utilisé Le même Profil de la température utilisé précédemment dans Figure IV.7, Pour tester la technique proposée on fait maintenir l'ensoleillement à une valeur  $G= 1000$   $W/m^2$ .

Figure IV.14, IV.21, IV.22 et IV.23 représenté les résultats de simulation obtenus lors d'un changement brusque et variations rapides du niveau de la température, afin de tester l'algorithme MPPT de type P&O, Le temps de simulation choisi est de 2s. On remarque qu'il existe une relation de disproportionné entre la puissance et la température.

Pour une température de  $25^{\circ}C$  durant l'intervalle de temps entre  $t = [0s ; 0.5s]$ , le point de fonctionnement optimale du panneau photovoltaïque correspond à la puissance de 100 W, à la tension varie autour de sa valeur optimale de 18 V et au courant varie autour de sa valeur optimale de 5.56 A, ce qui est compatible avec les caractéristiques du panneau présentées sur la Figure IV.2. Cela démontre que la commande MPPT fonctionnement efficacement.

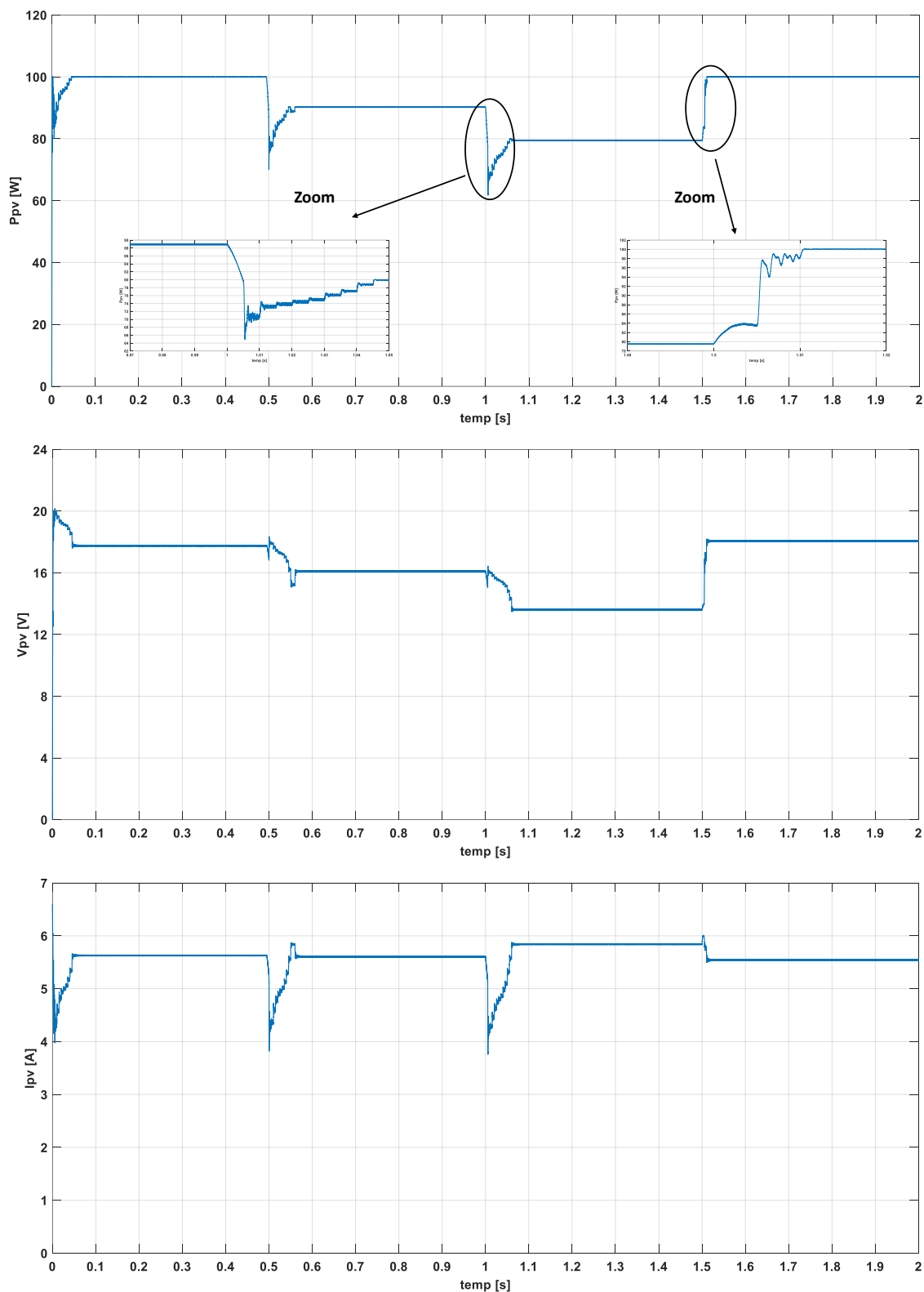


Figure IV.14 – Evolution de puissance, tension et courant du GPV (flou).

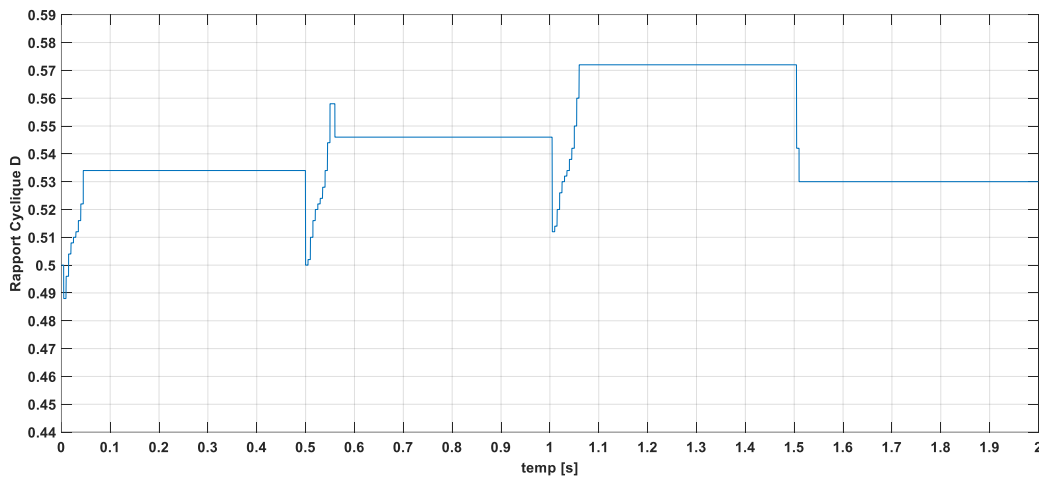


Figure IV.15 – Courbe de rapport cyclique D du GPV (flou).

D'après les résultats de simulation obtenus, on remarque qu'une variation rapide de la température (augmentation ou diminution) provoque une variation considérable de la tension ( $V_{pv}$ ), par contre le courant  $I_{pv}$  dans ce cas se varie légèrement. Ainsi on constate que les courbes de puissance, de tension et du courant présentent des oscillations dans le régime permanent.

## IV.5 Etude comparative entre MPPT P&O et MPPT flou

Pour faire une étude de robustesse des deux contrôleurs vis-à-vis des différentes conditions environnementales, nous avons effectué les tests suivants :

- D'abord on maintient une température constante et on varie l'ensoleillement solaire suivant une variation rapide, et dans les deux sens de variation : soit une augmentation ou bien une diminution.
- Ensuite on maintient l'ensoleillement solaire à une valeur fixe et on varie la valeur de la température suivant une variation rapide, et dans les deux sens de variation : soit une augmentation ou une diminution.

### IV.5.1 Fonctionnement sous un ensoleillement variable

Ce cas nous montre le comportement du contrôleur MPPT FLOU et le du MPPT P&O. Pour tester la technique proposée, nous avons utilisé le même profil de l'ensoleillement utilisé précédemment dans Figure IV.4 et on fait maintenir la température à une valeur constante  $T=25^{\circ}\text{C}$ .

La Figure IV.16, le comportement de MPPT P&O et commande logique flou sous un changement de l'ensoleillement sont comparées avec la puissance idéale du PPM. Un zoom est illustré dans un endroit de régime établi montre que le PPM obtenu par la commande floue

est constant et proche de la valeur théorique, par contre le PPM trouvé par P&O oscille entre 99,42W et 100,1W. De plus, on remarque que le contrôleur proposé suit le PPM en plusieurs fois plus rapide que P&O.

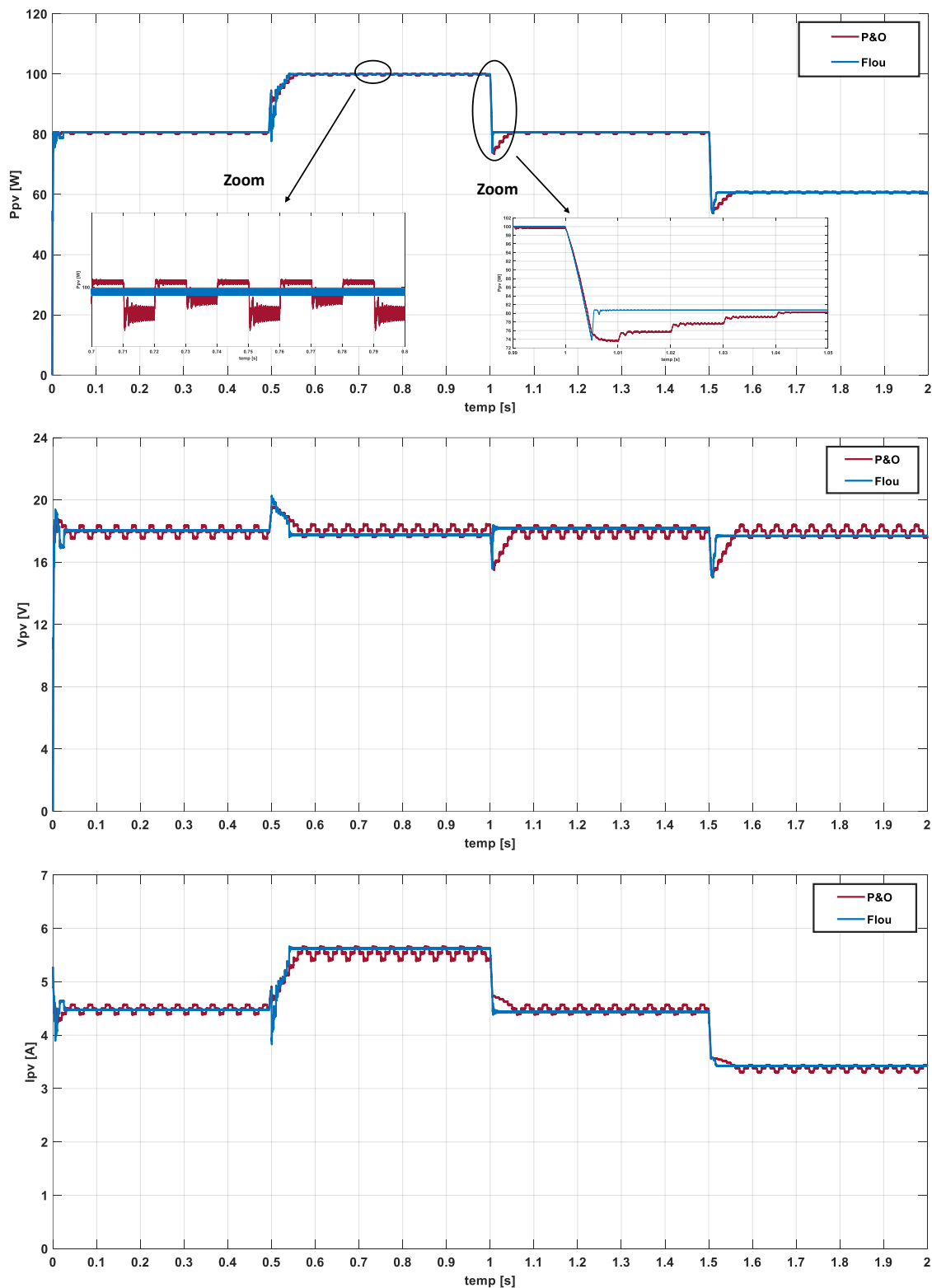


Figure IV.16 – Evolution de puissance, tension et courant du GPV (flou et P&O).

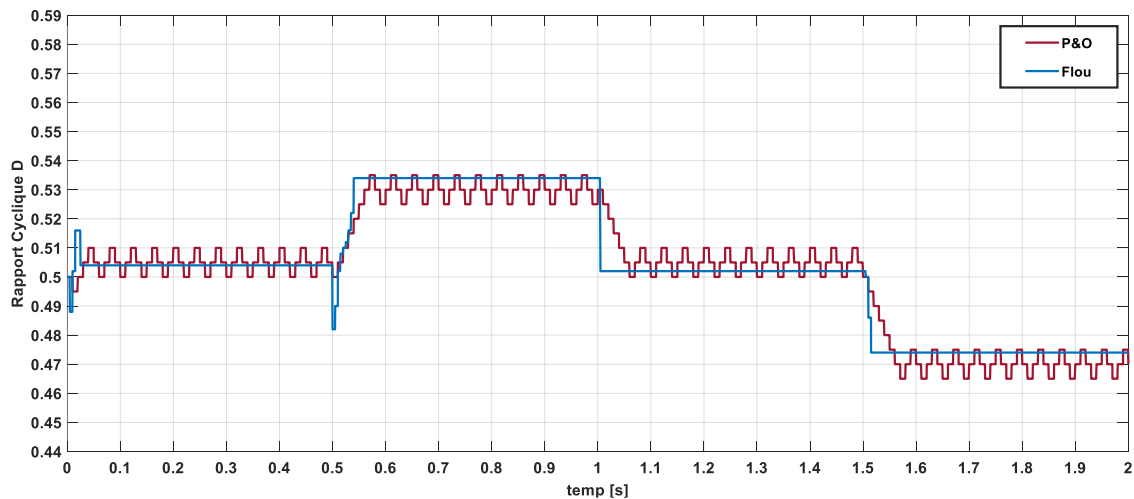


Figure IV.17 – Courbe de rapport cyclique D du GPV (P&O).

Comme le montre les résultats de simulation (figures IV-29 à IV-32), les deux contrôleurs MPPT donnent des résultats presque identiques. Les deux contrôleurs présentent une bonne poursuite sauf que le P&O présente quelques fluctuations qui sont due au manque de précision par rapport au FLC.

Le contrôleur flou suit la consigne (variation de l'ensoleillement) avec de très faibles fluctuations tandis que le contrôleur P&O perd un peu de temps avant d'atteindre le MPP et la diminution de l'ensoleillement implique diminution de la puissance. Le contrôleur MPPT flou suit la consigne de manière satisfaisante tandis que le contrôleur MPPT P&O présente de faibles fluctuations.

## IV.5.2 Fonctionnement sous une température variable

Nous avons utilisé le même profil de la température utilisé précédemment dans Figure IV.9, pour faire une comparaison entre les deux techniques proposés on fait maintenir l'ensoleillement à une valeur  $G= 1000 \text{ W/m}^2$ .

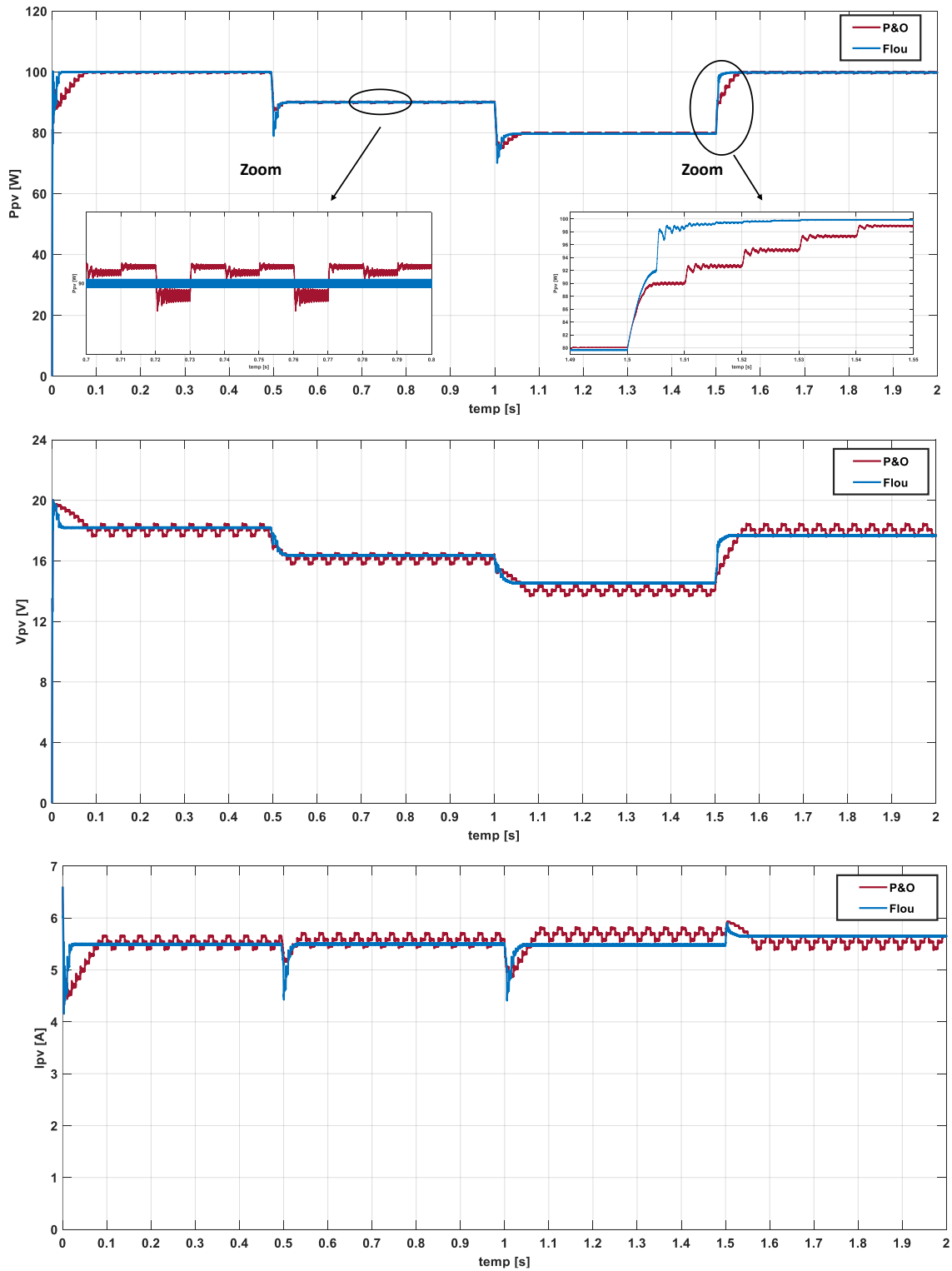


Figure IV.18 – Evolution de puissance, tension et courant du GPV (flou et P&O).

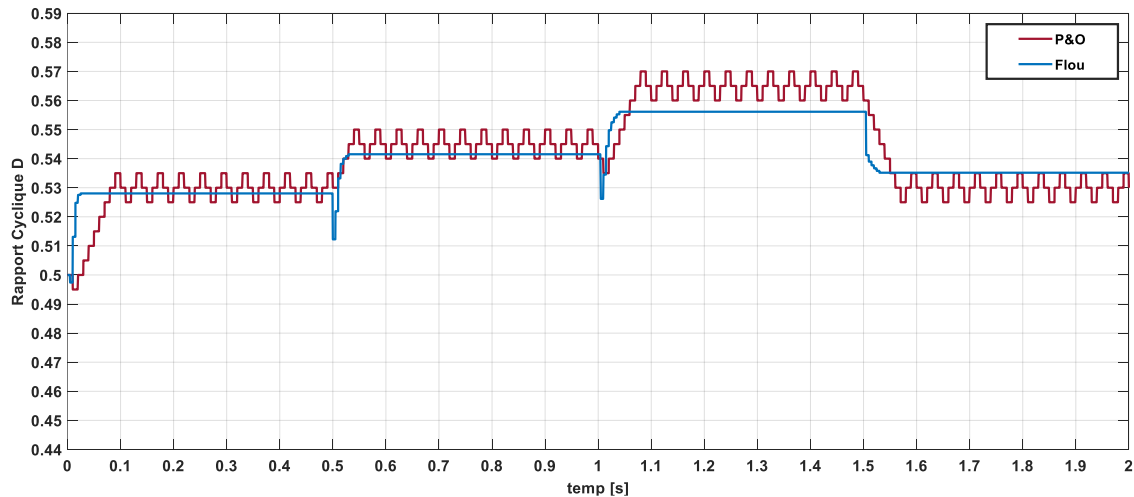


Figure IV.19 – Courbe de rapport cyclique D du GPV (flou).

Les résultats obtenus avec le technique de commande flou proposée sont meilleurs que ceux obtenus avec des algorithmes de contrôle conventionnels P&O classique. Ainsi, le commande par logique floue peut être vu comme un pas vers un rapprochement entre le contrôle mathématique précis et la prise de décision humaine. Aussi, ces résultats confirment le bon fonctionnement du contrôleur (P&O) mais montrent un meilleur fonctionnement de la commande flou. Ce que démontrent les résultats obtenus après combiner ces deux méthodes. Ce dernier a prouvé qu'il a de meilleures performances, temps de réponse rapide, erreur à l'état permanent très faible et presque zéro dépassement.

Une étude comparative des deux commandes proposées (classiques et modernes) a montré que le contrôleur basé sur la commande par logique floue optimise mieux la puissance de fonctionnement du système.

## IV.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous présentons les deux commandes pour le suivi du point de puissance maximal, nous avons ainsi présenté la méthode classique P&O et la méthode intelligente de commande MPPT floue. Nous avons implémenté les différents blocs de simulation nécessaire en utilisant le logiciel Simulink. Différents résultats sont obtenus pour différentes valeurs d'ensoleillement et de température, ceci pour les commandes MPPT flou et avec l'algorithme MPPT P&O. Ces résultats confirment le bon fonctionnement du MPPT P&O mais montrent un meilleur fonctionnement de la commande flou.

La simulation de la commande MPPT floue a montré de meilleures performances avec un temps de réponse rapide et une erreur en état permanent très faible, et qu'il est robuste aux différentes variations des conditions atmosphériques.

## **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a été consacré à présenter notre contribution dans l'optimisation de la puissance d'un générateur photovoltaïque. Plusieurs méthodes MPPT existantes dans la littérature sont utilisées pour optimiser l'énergie d'un panneau solaire sous l'effet de la variation paramètres météorologique, l'avantage de notre méthode par rapport aux autres, réside dans sa capacité de suivre le MPP sous les changements rapides de l'ensoleillement et de la température.

Notre travail a été basé sur l'utilisation de commande MPPT floue pour faire le suivi du MPP. Pour ce faire, nous avons commencé par introduire le lecteur pas à pas au domaine des systèmes photovoltaïque en rappelant quelques notions sur le rayonnement solaire, l'énergie solaire et l'énergie photovoltaïque. Nous avons ensuite expliqué le fonctionnement des cellules photovoltaïques et leurs caractéristiques principales ainsi que leurs types avec à la fin un aperçu de l'exploitation de cette énergie en Algérie.

Par la suite, dans le deuxième chapitre nous avons présenté la modélisation et le dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome constitué d'un générateur PV, convertisseur de type SEPIC et une charge résistive, Les techniques de poursuite du point maximum de la puissance des générateur PV sont exposées dans le troisième chapitre.

Quant à la partie de commande MPPT floue, faisant objet de cette étude, elle a été bien détaillée dans le troisième chapitre en présentant le principe de la recherche du point de puissance maximale tout en donnant les différentes classifications des commandes MPPT.

La mise en place des simulations, la présentation des résultats obtenus, les discussions et les comparaisons ont fait l'objet du dernier chapitre. Ce dernier englobe l'ensemble des simulations effectuées sous l'environnement Matlab/Simulink, dans un premier temps pour la mise en place du système photovoltaïque et ensuite pour tester, valider et comparer les commandes MPPT développé. Nous avons employé les algorithmes les plus utilisés à savoir la méthode P&O, et la commande MPPT Flou qui ont été soumises à différents tests avec variation. A la fin de ce chapitre et pour une étude plus profonde nous avons fait une étude comparative entre les deux méthodes utilisées.

La commande MPPT soit classique (P&O) ou basée sur le floue logique permettent une meilleure adaptation entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge. Cependant, l'étude comparative des résultats de simulation a permis de constater que la commande MPPT basée sur le floue logique conduit à de meilleurs performances (réduction du temps de réponse et de l'erreur en régime permanent).

Par ce travail, nous souhaitons avoir apporté une contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques autonomes et leurs commandes notamment MPPT classiques et floue. Comme perspective à ce travail, il serait intéressant de procéder à l'implémentation matérielle des techniques MPPT simulées, sur des systèmes à base de microcontrôleur ou DSP, afin de valider les résultats de simulation et confirmer les performances obtenues.

## **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1] CYRIL Lahore, “ Optimisation de commandes MPPT ”, Mémoire de master, conservatoire national des arts et métiers centre régional de midi-pyrénées, Département électronique – automatique, 2012.
- [2] BENADEL Faiza, “ Etude Et Simulation D’une Commande MPPT Pour Système PV ”, Mémoire de master, Département de Génie électrique, université mohamed boudiaf - m’sila,2016.
- [3] AMAMRA mohammed salah, DJEDIDI yahia, “ Optimisation de la production d’un générateur photovoltaïque ”, Mémoire de master, Département Génie Électrique, université kasdi merbah ouargla, 2015.
- [4] SLAMA Fateh, “ Modélisation d’un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique”, Mémoire de magister, Département d’Electrotechnique, universite ferhat abbas - setif- ufas (algerie),2011.
- [5] LASMI Yassine, “ Optimisation de la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) d’un système photovoltaïque par les techniques intelligentes”, Mémoire de magister, Département d’Electrotechnique, universite setif 1,2013.
- [6] HANANOU Fatiha, ROUABAH Aicha, “ Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque”, Mémoire de master, Département Génie Electrique, Université kasdi merbah ouargla,2014.
- [7] DJELLAL leila imemne, DIB yasmına, “ Etude comparative de deux commandes MPPT appliquées à un système photovoltaïque ”, Mémoire de master Département de Génie Electrique et Electronique, Université Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen, 2017.
- [8] M. Boukli-Hacene omar, “ Conception et réalisation d’un générateur photovoltaïque muni d’un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique”, mémoire de master, departement de genie electrique, Université Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen ,2011.
- [9] Ministère de l’énergie et des Mines, " Programme des énergies renouvelables et de l’efficacité énergétique", 2007.
- [10] Ministère de l’énergie et des Mines, " Programme des énergies renouvelables et de l’efficacité énergétique", 2011.
- [11] Amarouayache Mohamed, “ Contribution à l’optimisation d’une chaîne de conversion d’énergie photovoltaïque ”, Thèse de doctorat, Département d’electrotechnique, universite constantine 1,2014.
- [12] HADJI Slimane, “ Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie Photovoltaïque ”, Thèse de doctorat, Département d’électronique, universite ferhat abbas - setif 1, 2018.
- [13] M. PETIBON Stéphane, “ Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l’énergie pour les applications photovoltaïques”, Thèse de doctorat, Département Génie Electrique, Université de toulouse,2009.

- [14] Yahiaoui Yasmina, “ Commande MPPT à base la logique floue et les algorithmes génétiques ”, Mémoire de master, Département de Génie Electrique, Université Abderrahmane MIRA de Bejaia,2013.
- [15] SAAD SAOUD Merwan, “ Optimisation de la gestion de l'énergie photovoltaïque utilisée dans une zone agricole ”, Thèse de doctorat, Département d'Electronique, universite badji mokhtar - annaba,2017.
- [16] HAMIDOUCHE Macylia, MOKHTARI boubkeur, “ Etude d'un système photovoltaïque”, Mémoire de master, Département de Génie Electrique, Université Abderrahmane MIRA de Bejaia,2016.
- [17] BELKAID ABDELHAKIM, “ Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome ”, Thèse de doctorat, Département d'Electrotechnique, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF 1,2015.
- [18] AMAOUI Abdenour, “ Optimisation d'une commande MPPT floue par essais particulaire”, mémoire de Master, Département d'Automatique, Université Abderrahmane MIRA de Bejaia,2015.
- [19] BENSMAIL Samia, “ Contribution à La Modélisation Et à l'Optimisation Des Systèmes Photovoltaïques”, Mémoire de magister, Département de Génie Electrique, Université A. MIRA-BEJAIA,2012.
- [20] BOUDJELLAL Bilal, “ Caractérisation des défauts des convertisseurs statiques intégrés dans un système électrique à énergie renouvelable”, Thèse de doctorat, département de génies électrique, UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA,2017.
- [21] MOUASSANE Souhila, S. BELAID, “ Gestion d'énergie d'un système photovoltaïque avec batteries”, Mémoire de master, Département Génie Electrique, Université Abderrahmane MIRA de Bejaia,2014.
- [22] Cédric CABAL, “ Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque ”, Thèse de doctorat, Département Génie Electrique, Université Toulouse III – Paul Sabatier,2008.
- [23] El Himer Sarah, “ Etude comparative des techniques de commande MPPT d'un générateur photovoltaïque ”, Mémoire de master, Département Génie Electrique, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah,2013.
- [24] BENSALAH Belqassim, FILALI Mohammed, “ Etude et réalisation d'un circuit de commande avec MPPT d'un hacheur pour système photovoltaïque”, mémoire de master, Département Génie Electrique, U.A.B Tlemcen,2015.
- [25] MISSOUM MOHAMMED, “ Contribution de l'énergie photovoltaïque dans la performance énergétique de l'habitat à haute qualité énergétique en Algérie ”. Mémoire de magistère, Département génie mécanique, universite hassiba benbouali de chlef,2011.
- [26] MAYOUF Somia, “ Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle. ”, Mémoire de master, Département Electronique, Université mohamed boudiaf - m'sila,2016.
- [27] Joris Pallier, “ convertisseur de tension SEPIC à commande aléatoire ”, mémoire de Master, Projet Polytech'clermont-Ferrand, 2013.
- [28] AOUI Saliha, “ Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque”, mémoire de Magister, Département d'Electrotechnique, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF 1,2014.

- [29] SINGO Akassewa Tchapo, “ Système d’alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l’habitat énergétiquement autonome ”, Thèse de Doctorat, Département Génie Électrique, université kasdi merbah ouargla, 2015.
- [30] ZORIG Abdelmalik, “ Modélisation et commande d’un système de production d’énergie photovoltaïque couplé au réseau triphasé ”, mémoire de master, DEPARTEMENT d’ELECTRONIQUE, UNIVERSITE DE M’SILA, 2011.
- [31] Ayyoub ABID, Yassine BECHLAGHEM, “ Etude et dimensionnement d'un convertisseur SEPIC pour une application photovoltaïque”, mémoire de Master, Département Génie Electrique, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen, 2017.
- [32] B. Boudjellal, T. Benslimane, “Artificial Neural Network-based Control of Wind Energy Conversion System based on a Doubly Fed Induction Generator”, The Mediterranean Journal of Measurement and Control, Vol. 12, No. 2, pp. 553-560, 2016.
- [33] [www.solaris-store.com](http://www.solaris-store.com), Accessible 2019 .
- [34] S. NIMIMOL, DR. V. GOPALAKRISHNAN, IMMANUEL JOHN SAMUEL, “comparative analysis of sepic and luo converter with mppt algorithms.”, Journal of information, knowledge and research in electrical engineering, ISSN: 0975 – 6736, 2015.
- [35] Angel Cid Pastor, “ Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques”, Thèse de doctorat, Microélectronique, INSA de Toulouse, 2006.
- [36] LITIM Ahlam, ABID Zouleykha, “ Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque”, Mémoire de master, Département d’Electrotechnique, Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, 2017.
- [37] Touil Nacer Eddine, Ghenbazi Slimane, “ Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque ”, Mémoire de master, Département Génie Électrique, Université Echahid Hama Lakhder d’El-Oued, 2015.
- [38] Issam HOUSSAMO, “ Contribution à l’étude théorique, à la modélisation et à la mise en œuvre d'un système multi source appartenant à un micro-réseau électrique considérations sur la qualité de l'énergie”, Thèse de doctorat, universite de technologie de compiegne, 2012.
- [39] BENAYAD Abdelmoumene, “ modélisation des panneaux photovoltaïques par les méthodes de soft computing ”, Mémoire de magister, Département d’Electronique, Université a. mira-bejaia, 2011.
- [40] HARROUCHE fateh, “ Application de la logique floue aux machines tournantes”, Mémoire de magister, Département mécanique appliquée, universite ferhat abbas - setif 1, 2013.
- [41] BOUZID Houssam Eddine, BENMERIEM Soufiane, “ Application de la technique de la logique floue pour la prédiction de l’amorçage des intervalles d’air pointes-plans”, Mémoire master, Département Génie Électrique, Université kasdi merbah – ouargla, 2013.