

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université A. MIRA – BEJAIA

Faculté de Technologie



Département de Génie électrique

# MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master en Electromécanique

Spécialité : *Energie Renouvelable et +Maintenance Industrielle*

## Thème

*Optimisation et gestion d'un système photovoltaïque  
par l'application d'un contrôleur flou type 1*

Présentée par :

Mlle. OUARI Nedjma

Mr. IKHLEF Abdelghani

dirigée par :

Pr. SERIR Chafia

Devant le jury :

Nom et Prénom	Grade	Qualité
BERBOUCHA Ali	MCA	Président de jury
SERIR Chafia	PROFESSEUR	Directrice de mémoire
REKIOUA Djamila	PROFESSEUR	Co-directrice de mémoire
ABDELLI Radia	MCA	Examinatrice

2023/2024

## *Remerciements*

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à **Allah**, le Tout-Puissant, pour nous avoir accordé la force et les moyens nécessaires à l'accomplissement de notre parcours académique.

Nous exprimons notre profonde gratitude à nos parents et à nos frères pour leur soutien inébranlable et leurs encouragements constants. Leur amour et leur dévouement ont été des piliers essentiels tout au long de notre parcours.

Nous tenons à remercier chaleureusement Dr.Serir Chafiaa, notre promotrice, pour ses efforts considérables, ses conseils avisés, son soutien inestimable, et sa grande disponibilité. Sa qualité humaine et son engagement ont grandement contribué à la réalisation de ce mémoire.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants qui nous ont encadrés durant ces cinq années d'études, pour leur dévouement et leur enseignement précieux.

Nous remercions tout particulièrement l'équipe du laboratoire de génie électrique de L'université de Bejaïa, pour leur assistance technique et leur soutien tout au long de nos Recherches.

Nous sommes reconnaissants envers les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer la qualité de ce mémoire et pour leurs remarques constructives.

Enfin, nous exprimons notre reconnaissance à tous nos collègues de la promotion 2024 et à nos amis, pour leur soutien moral et leur camaraderie, qui ont rendu ce parcours académique enrichissant et mémorable.

***Je dédie ce modeste travail***

*A mes très chers parents pour leur sacrifice, leur amour, leur patience, leur soutien, leur encouragement et leurs prières qui ont constitué l'essence de ma réussite, à mon frère « Massi » et ma sœur « Imene » d'avoir toujours été présents pour moi. Merci d'être si fiers de moi et de croire en moi.*

*À mon cher fiancé « Faycel » de m'avoir soutenu*

*À ma copine « Imene »*

*À tous mes amis spécifiquement « Didouche »*

*A toute ma famille et à tous ceux qui me sont chers*

***NEDJMA***

## ***Je dédie ce modeste travail***

*À mes chers parents, qui m'ont toujours soutenu avec amour et  
bienveillance.*

*À mes frères et sœurs, en témoignage de notre lien familial, avec mes  
vœux de bonheur, de santé et de réussite.*

*À tous les membres de ma famille, pour leur soutien inconditionnel.*

*À tous mes amis spécifiquement mon cher Aymen.*

**ZAMAN**





# Table des matières

## Chapitre I

<b>I.1. Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>I.2. Définition de l'énergie.....</b>	<b>1</b>
<b>I.3. L'énergie solaire : .....</b>	<b>1</b>
<b>I.3.1. L'énergie thermique solaire .....</b>	<b>2</b>
<b>I.3.2. L'énergie solaire passive.....</b>	<b>2</b>
<b>I.3.3. L'énergie photovoltaïque.....</b>	<b>2</b>
<b>I.4. Le rayonnement solaire : .....</b>	<b>2</b>
<b>I.4.1. Le rayonnement direct .....</b>	<b>2</b>
<b>I.4.2. <i>Le rayonnement solaire diffus</i> .....</b>	<b>3</b>
<b>I.4.3. Rayonnement solaire diffus .....</b>	<b>3</b>
<b>I.4.4. Le rayonnement solaire global.....</b>	<b>3</b>
<b>I.5. Définition de l'énergie photovoltaïque :.....</b>	<b>3</b>
<b>I.6. Le générateur photovoltaïque :.....</b>	<b>4</b>
<b>I.7. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque .....</b>	<b>4</b>
<b>I.8. Différents paramètres d'une cellule photovoltaïque.....</b>	<b>5</b>
<b>I.9. Les différents types de cellules photovoltaïques.....</b>	<b>6</b>
<b>I.9.1. Les cellules monocristallines .....</b>	<b>6</b>
<b>I.9.2. Les cellules poly cristallines .....</b>	<b>7</b>
<b>I.9.3. Les cellules amorphes .....</b>	<b>7</b>
<b>I.10. Regroupement des cellules.....</b>	<b>8</b>
<b>I.10.1. Le regroupement en série.....</b>	<b>8</b>
<b>I.10.2. Le regroupement en parallèle.....</b>	<b>9</b>
<b>I.11. Le stockage de l'énergie photovoltaïque .....</b>	<b>10</b>
<b>I.12. Les formes de stockage .....</b>	<b>10</b>
<b>I.12.1. Stockage sous forme mécanique .....</b>	<b>10</b>
<b>I.12.2. Stockage par air comprimé.....</b>	<b>12</b>
<b>I.12.3. Stockage sous forme chimique.....</b>	<b>12</b>
<b>I.12.4. Stockage sous forme électromagnétique .....</b>	<b>14</b>

<b>I.12.5 Stockage sous forme électrochimique.....</b>	<b>14</b>
<b>I.13. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire .....</b>	<b>17</b>
<b>I.13.1 Avantages .....</b>	<b>17</b>
<b>I.13.2 Les inconvénients.....</b>	<b>18</b>
<b>I.14 Conclusion.....</b>	<b>18</b>

## Chapitre II

II.1 Introduction :	21
II.2 Connexion directe source-charge	21
II.3 Connexion à travers un étage d'adaptation (convertisseur DC/DC)	21
II.4 Modélisation du générateur photovoltaïque :	22
II.5 Cellule photovoltaïque	22
II.5.1. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	23
II.5.2. Modèle à une diode :	25
II.5.3. Modèle à deux diodes	26
II.6 Simulation du modèle à une diode	27
II.6.1. Caractéristique (I-V) et (P-V) dans les conditions standards	29
II.7 Comparaison des résultats	30
II.8 Influence des paramètres extérieurs sur les performances d'un GPV	31
II.8.1. Effets de la variation de l'éclairement	31
II.8.2. Effets de la variation de la température	32
II.9 Influence des paramètres extérieurs sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$	33
II.10 . Les convertisseurs statique DC/DC	34
II.10.1. Modélisation d'un hacheur survolteur (Boost)	35
II.10.2. Schéma bloc d'hacheur survolteur sur MATLAB/SIMULINK	36
II.11. Modélisation de la batterie	37
II.12 Conclusion	38

## Chapitre III

<b>III.1 Introduction.....</b>	<b>37</b>
<b>III.2 Principe de recherche du point maximal .....</b>	<b>37</b>
<b>III.3 La commande MPPT .....</b>	<b>37</b>
<b>III.3.1. Les commandes MPPT basées ; Algorithmes indirect .....</b>	<b>38</b>
<b>III.3.2. Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension, <i>Voc</i>.....</b>	<b>38</b>
<b>III.3.3. Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant <i>Icc</i> :.....</b>	<b>38</b>
<b>III.4 Les commandes MPPT à algorithmes performants : Directs.....</b>	<b>39</b>
<b>III.4.1. Algorithme Perturber et observer, (P&amp;O).....</b>	<b>39</b>
<b>III.4.3. Algorithme à base de la logique floue.....</b>	<b>43</b>
<b>III.5 Application d'un contrôleur flou sur le système PV .....</b>	<b>49</b>
<b>III.6. Gestion de l'énergie.....</b>	<b>53</b>
<b>III.6.1. Organigramme de la gestion des puissances .....</b>	<b>54</b>
<b>III.7. Simulation des résultats.....</b>	<b>56</b>
<b>III.7.1. Interprétation des résultats .....</b>	<b>59</b>
<b>III.8 Conclusion.....</b>	<b>59</b>

# Liste de Figures

## Chapitre I

### Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

<b>Figure I. 1</b> : Les composantes du rayonnement solaire.....	3
<b>Figure I. 2</b> : Schéma de connexion des modules photovoltaïques.....	4
<b>Figure I. 3</b> : Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium.....	5
<b>Figure I. 4</b> : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque. ....	6
<b>Figure I. 5</b> : Cellule photovoltaïque monocristalline.....	6
<b>Figure I. 6</b> : Cellule photovoltaïque polycristalline .....	7
<b>Figure I. 7</b> : Cellule photovoltaïque amorphe.....	7
<b>Figure I. 8</b> : Branchement série des panneaux photovoltaïques.....	8
<b>Figure I. 9</b> : Caractéristiques des cellules PV connectées en série.....	8
<b>Figure I. 10</b> : Caractéristique de cellules PV connectées en parallèle. ....	9
<b>Figure I. 11</b> : Branchement en parallèle de panneaux PV .....	9
<b>Figure I. 12</b> : Fonctionnement d'une STEP.....	11
<b>Figure I. 13</b> : Fonctionnement d'un volant d'inertie.....	12
<b>Figure I. 14</b> : Principe du stockage par air comprimé.....	12
<b>Figure I. 15</b> : Principe d'une pile à combustible .....	14

## Chapitre II

### Modélisation et simulation de système photovoltaïque

<b>Figure II. 1</b> : Schéma illustratif de la connexion directe source-charge .....	18
<b>Figure II. 2</b> : Etage d'adaptation entre un GPV et une charge.....	19
<b>Figure II. 3</b> : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV idéale.....	19
<b>Figure II. 4</b> : point de puissance maximal sur la caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ .....	21
<b>Figure II. 5</b> : Circuit électrique équivalent du modèle à une diode .....	22
<b>Figure II. 6</b> : Circuit électrique équivalent du modèle à deux diodes.....	24
<b>Figure II. 7</b> : Modèle du panneau PV sous MATLAB SIMULINK .....	27
<b>Figure II. 8</b> : Caractéristique $I_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions standards (STC). ....	27
<b>Figure II. 9</b> : Caractéristique $P_{pv}=f(V_{pv})$ dans les conditions standards (STC). ....	28
<b>Figure II. 10</b> : comparaison de la caractéristique de la puissance.....	28
<b>Figure II. 11</b> : comparaison de la caractéristique du courant .....	29
<b>Figure II. 12</b> : Simulation de l'influence de l'éclairement sur le courant par rapport à la tension du GPV sur Matlab/Simulink.....	29
<b>Figure II. 13</b> : Simulation de l'influence de l'éclairement sur la puissance par rapport à la tension du	

PV sur Matlab/Simulink.....	30
<b>Figure II. 14</b> : Simulation de l'influence de la température sur le courant par rapport à la tension du GPV sur Matlab/Simulink.....	31
<b>Figure II. 15</b> : Simulation de l'influence de la température sur la puissance par rapport à la tension du GPV sur Matlab/Simulink. ....	31
<b>Figure II. 16</b> : Influence des paramètres extérieurs sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ .....	32
<b>Figure II. 17</b> : Schéma de principe d'un hacheur survolteur.....	33
<b>Figure II. 18</b> : Période du hachage de l'hacheur .....	33
<b>Figure II. 19</b> : Schéma bloc sur MATLAB/Simulink d'un hacheur survolteur .....	34
<b>Figure II. 20</b> : Modèle R-C de la batterie .....	35

# Chapitre III

## *Recherche du point maximal et gestion de l'énergie photovoltaïque*

<b>Figure III. 1 :</b> Schéma de principe d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT .....	38
<b>Figure III. 2:</b> Diagramme schématique de suivi de puissance de la méthode perturbation et d'observation P&O. ....	40
<b>Figure III. 3:</b> Organigramme de fonctionnement de la méthode P&O .....	41
<b>Figure III. 4:</b> Allure de la puissance Ppv en fonction du temps.....	42
<b>Figure III. 5:</b> Zoom sur l'allure de la puissance Ppv.....	42
<b>Figure III. 6:</b> Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique (P-V) Avec la commande P&O ..	43
<b>Figure III. 7 :</b> Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique (P-V) de l'algorithme P&O.....	44
<b>Figure III. 8:</b> Fonction d'appartenance pour la logique booléenne (a), la logique floue (b).....	44
<b>Figure III. 9:</b> formes des fonctions d'appartenance .....	46
<b>Figure III. 10:</b> Intersection des sous-ensembles flous .....	46
<b>Figure III. 11 :</b> Union des sous-ensembles flous.....	47
<b>Figure III. 12:</b> Illustration de l'opérateur NON .....	47
<b>Figure III. 13:</b> Structure de base d'un contrôleur flou .....	48
<b>Figure III. 14:</b> Bloc de simulation d'un contrôleur flou .....	49
<b>Figure III. 15:</b> Fonctions d'appartenance du contrôleur flou.....	51
<b>Figure III. 16:</b> Allure de la puissance photovoltaïque par la commande FLC.....	52
<b>Figure III. 17:</b> Zoom de L'allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent avec la .....	52
<b>Figure III. 18 :</b> Allure de la puissance photovoltaïque (commande P&O et FLC) .....	51
<b>Figure III. 19 :</b> Allure de la puissance photovoltaïque (commande P&O et FLC) .....	53
<b>Figure III. 20:</b> Chaîne de conversion de l'énergie solaire[10].....	54
<b>Figure III. 21 :</b> Organigramme de la gestion de la puissance photovoltaïque.....	55
<b>Figure III. 22:</b> Schéma global sur Matlab/Simulink .....	57
<b>Figure III. 23:</b> Profil de charge .....	57
<b>Figure III. 24:</b> Variation de l'ensoleillement .....	58
<b>Figure III. 25:</b> Allure des puissances en fonction du temps .....	58

<b>Figure III. 18 :</b> Allure de la puissance photovoltaïque (commande P&O et FLC).....	51
<b>Figure III. 19 :</b> Allure de la puissance photovoltaïque (commande P&O et FLC).....	52
Figure III. 20: Chaîne de conversion de l'énergie solaire[10].....	53
<b>Figure III. 21 :</b> Organigramme de la gestion de la puissance photovoltaïque .....	54
<b>Figure III. 22:</b> Schéma global sur Matlab/Simulink.....	55
<b>Figure III. 23:</b> Profil de charge.....	56
<b>Figure III. 24:</b> Variation de l'ensoleillement .....	56
<b>Figure III. 25:</b> Allure des puissances en fonction du temps .....	57

# Liste de tableaux

## Chapitre I

### *Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques*

**Table I. 1:** Tension de stockage en fonction de la puissance de l'installation PV ..... 15

**Table I. 2:** Les différents types de batteries ..... 17

## Chapitre II

### *Modélisation et simulation de système photovoltaïque*

**Table II. 1 :** Paramètres du panneau photovoltaïque SUNTECH 80 ..... 26

**Table II. 2 :** Paramètres obtenus du modèle à une diode du panneau PV SM110. .... 26

## Chapitre III

### *Recherche du point maximal et gestion de l'énergie photovoltaïque*

**Tableau III. 1:** Résumé de l'algorithme P&O ..... 40

**Tableau III. 2:** Table de règles de décisions à 7 classes ..... 50

## Symboles

<b>U<sub>c</sub></b>	Tension fournie par une cellule
<b>N<sub>s</sub></b>	Nombre de cellules associées en séries
<b>I<sub>c</sub></b>	Le courant traversant chaque cellule
<b>N<sub>p</sub></b>	Nombre de cellules associées en parallèles
<b>E</b>	irradiation solaire
<b>M</b>	Masse d'eau
<b>g</b>	l'accélération due à la gravité
<b>H</b>	la différence d'altitude entre les réservoirs
<b>B<sub>j</sub></b>	Le besoin journalier
<b>J<sub>aut</sub></b>	jours d'autonomie (en jours)
<b>PDP</b>	La profondeur de décharge d'une batterie
<b>K<sub>T</sub></b>	Coefficient de température de la capacité
<b>U<sub>batt</sub></b>	Tension de la batterie
<b>C<sub>bat</sub></b>	la capacité (Ah) nominale de la batterie
<b>I<sub>pv</sub></b>	Courant photovoltaïque (A)
<b>I<sub>ph</sub></b>	Courant produit par la photopile (A)
<b>I<sub>d</sub></b>	Le courant traversé par la diode
<b>I<sub>s</sub></b>	Courant de saturation de la diode (A)
<b>V</b>	Tension aux bornes de la cellule
<b>T<sub>j</sub></b>	Température de jonction
<b>A</b>	Coefficient d'idéalité de la diode
<b>K</b>	Constante de Boltzmann $1.38 \cdot 10^{-23}$ (J K).
<b>q</b>	Charge d'un électron $1.6 \cdot 10^{-19}$
<b>n</b>	Le rendement de conversion d'énergie
<b>V<sub>m</sub></b>	Tension optimale (au point de puissance maximale) (V)

<b><math>I_m</math></b>	Courant optimum (au point de puissance maximale) (A)
<b><math>P_{max}</math></b>	Puissance maximale pouvant fournir le générateur (W)
<b><math>E_g</math></b>	L'énergie de gap
<b><math>P_1, P_2, P_3, P_4</math></b>	Paramètres constants
<b><math>R_s</math></b>	Résistance série
<b><math>R_{sh}</math></b>	Résistance shunt
<b><math>T_c</math></b>	Température de la jonction de la cellule
<b><math>T_a</math></b>	La température ambiante.
<b><math>V_d</math></b>	La tension aux bornes de diode (V)
<b><math>I_d</math></b>	Courant de diode (A)
<b><math>I_{sh}</math></b>	Le courant shunt (A)
<b><math>T_{ref}</math></b>	Température de référence
<b><math>E_{ref}</math></b>	Ensoleillement de référence
<b><math>\alpha</math></b>	Le rapport cyclique du hacheur

## Abréviations

<b>PV</b>	Photovoltaïque
<b>GPV</b>	Générateur Photovoltaïque
<b>STC</b>	Conditions de fonctionnement standard
<b>PPM</b>	Point de puissance maximale
<b>MPPT</b>	Maximum Power Point Tracking DC
Courant Continu	
<b>DC/DC</b>	Convertisseur continu continu
<b>P&amp;O</b>	Perturbation et observation
<b>FLC</b>	fuzzy logic control
<b><math>\mu</math>A</b>	Fonction d'appartenance



# Introduction Générale

## Introduction générale

Aujourd'hui, une part significative de la production énergétique mondiale provient des énergies fossiles, générant des émissions de gaz à effet de serre et accentuant la pollution. Cette dépendance expose à des risques, notamment l'épuisement progressif des réserves naturelles et les implications néfastes pour les générations futures. Face à ces défis et aux récurrences des crises économiques et pétrolières, la recherche scientifique s'est orientée vers les énergies renouvelables, qui occupent désormais une position privilégiée dans les secteurs de la recherche et du développement. La nécessité actuelle réside dans la diversification des sources d'énergie pour garantir la sécurité des approvisionnements, tout en minimisant l'impact environnemental. L'adoption croissante des énergies renouvelables représente une avancée significative dans la lutte contre les changements climatiques. De manière tout aussi cruciale, elles contribuent à la diversification du mix énergétique, diminuant ainsi la dépendance mondiale aux combustibles fossiles volatils [1].

Plusieurs ressources d'énergie renouvelable ont été découvertes ces dernières années, telles que l'énergie éolienne, hydraulique et l'énergie photovoltaïque. Cette dernière se distingue comme une source très prometteuse dans les ressources énergétiques futures d'un pays, d'abord grâce à sa nature propre, mais également en raison de sa polyvalence. L'énergie photovoltaïque trouve des applications dans divers secteurs tels que le domaine résidentiel, commercial, industriel, l'électrification rurale, l'agriculture, etc. Des projets de grande envergure, comme les centrales solaires, contribuent à augmenter la part des énergies renouvelables dans les réseaux électriques nationaux. De plus, les applications mobiles, comme les chargeurs solaires, démontrent l'adaptabilité de cette énergie dans des contextes variés, soutenant ainsi la transition vers un avenir énergétique plus durable [4].

Le soleil fournit une énergie lumineuse grandiose à la Terre, mais le problème réside dans le fait que la forme sous laquelle nous recevons cette énergie n'est pas directement utilisable. C'est pourquoi nous devons utiliser des processus de conversion d'énergie. L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque [3].

Le but de ce travail est l'optimisation et la gestion d'un système photovoltaïque en appliquant le contrôle de la logique floue.

L'utilisation de la logique floue permet de maximiser l'efficacité opérationnelle des installations photovoltaïques en traitant efficacement l'incertitude liée aux conditions environnementales et aux

# Introduction Générale

Variations de performance. D'un côté elle offre des solutions variées pour améliorer la gestion des systèmes solaires. De l'autre elle optimise la production d'énergie en ajustant dynamiquement l'angle des panneaux solaires en fonction des conditions météorologiques. De plus, elle intervient dans le diagnostic des pannes en évaluant leur gravité et en proposant des actions correctives [18].

Le rendement des systèmes photovoltaïques peut être amélioré par des solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (dites techniques MPPT « Maximum Power Point Tracking »). Il existe plusieurs méthodes qui ont été largement mises en œuvre pour suivre la techniques MPPT. Les méthodes les plus courantes sont : « Perturber et observer » (P&O), « L'incrémentation de la conductance » (CI). Pour optimiser la gestion de l'énergie, nous proposons l'intégration d'un élément de stockage, offrant ainsi une marge de manœuvre au système pour réguler la production et la consommation [1].

Notre mémoire est structurée en trois chapitres en plus de l'introduction générale, la conclusion générale et perspective.

Dans le premier chapitre, une revue de l'état actuel de l'art de l'énergie photovoltaïque sera présentée, mettant en lumière les différentes technologies des cellules solaires et exposant leur principe de fonctionnement. Une analyse approfondie des avantages et des inconvénients de ce système conclura ce chapitre.

Le deuxième chapitre sera dédié à la modélisation et à la simulation du système photovoltaïque, visant à étudier théoriquement le comportement de certains paramètres. La modélisation de chaque composant du système photovoltaïque complet sera élaborée en se basant sur des modèles de la littérature, incluant le champ PV et les convertisseurs. Cette étape essentielle permettra d'introduire plusieurs modèles et d'évaluer les caractéristiques de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constitutifs.

Le dernier chapitre est consacré à l'application de la méthode Perturb& Observe et on montrera également la différence en simulation sur le logiciel MATLAB/Simulink en appliquant un contrôleur de logique floue permet d'améliorer la réactivité et la stabilité du système face aux variations rapides des conditions environnementales. Enfin, la gestion de l'énergie photovoltaïque avec un système de stockage permet de stocker l'énergie excédentaire pour une utilisation ultérieure. Et on étudiera la gestion de l'énergie photovoltaïque avec un système de stockage.

## **I.1. Introduction**

La consommation mondiale d'énergie repose principalement sur des sources non renouvelables, ce qui soulève des préoccupations quant à leur épuisement et à leur impact environnemental. Les systèmes photovoltaïques émergent comme une solution prometteuse pour exploiter l'énergie solaire à diverses fins. Ils offrent une source d'électricité fiable et non polluante, adaptée à une gamme variée d'applications. La technologie photovoltaïque repose sur la transformation directe de la lumière solaire en énergie électrique à l'aide de cellules, principalement en silicium cristallin. Le silicium, abondant et non toxique, est largement utilisé dans cette technologie. Le terme "photovoltaïque", dérivé du grec signifiant "lumière électrique", illustre la conversion directe de la lumière du soleil en électricité.

## **I.2. Définition de l'énergie**

Les changements d'état dans un système sont généralement définis par une grandeur physique appelée énergie, qui se manifeste sous diverses formes. Parmi ces formes d'énergie, on trouve l'énergie thermique, mécanique, nucléaire, électrique, chimique, et rayonnante. Ces formes d'énergie peuvent interagir entre elles et se transformer d'une forme à une autre à travers divers processus. Par exemple, l'énergie thermique peut être convertie en énergie mécanique par l'intermédiaire de moteurs thermiques, ou en énergie électrique par des générateurs thermoélectriques. Ces transformations d'énergie jouent un rôle crucial dans de nombreux processus physiques, chimiques et biologiques, contribuant ainsi au fonctionnement et à l'évolution des systèmes naturels et artificiels [2].

## **I.3. L'énergie solaire :**

L'énergie solaire fait référence à l'énergie radiative émise par le soleil, qui est captée et utilisée sur Terre pour produire de l'électricité, chauffer des fluides, ou fournir de la lumière naturelle. Cette énergie est une source renouvelable abondante et largement distribuée sur la planète, offrant un potentiel significatif pour répondre aux besoins énergétiques humains de manière durable et respectueuse de l'environnement. Elle permet de récupérer jusqu'à 1000 watts par mètre carré de rayonnement solaire incident. Cette énergie est convertie en différentes formes d'énergie utilisables grâce à des technologies telles que les panneaux solaires photovoltaïques et les systèmes solaires thermiques [1]. Parmi ces différentes formes on trouve :

### **I.3.1. L'énergie thermique solaire**

Cette forme d'énergie solaire utilise la chaleur du soleil pour chauffer des fluides, tels que l'eau ou un fluide caloporteur, dans des systèmes solaires thermiques. Cette chaleur peut être utilisée pour le chauffage domestique, le chauffage de l'eau, ou même pour la production d'électricité dans les centrales solaires thermiques [1].

### **I.3.2. L'énergie solaire passive**

Cette forme d'énergie solaire exploite les propriétés naturelles du soleil pour chauffer ou éclairer les bâtiments sans aucun équipement mécanique. Par exemple, l'architecture solaire passive utilise la conception des bâtiments pour maximiser l'utilisation de la lumière naturelle et la chaleur du soleil [1].

### **I.3.3. L'énergie photovoltaïque**

Elle repose sur l'effet photoélectrique pour convertir le rayonnement électromagnétique en courant électrique continu. Cette énergie est captée par des cellules photovoltaïques, qui produisent de l'électricité lorsqu'elles sont exposées à la lumière. Ces cellules sont regroupées pour former des modules solaires ou des panneaux photovoltaïques [1].

## **I.4. Le rayonnement solaire :**

Représente l'énergie électromagnétique émise par le Soleil et captée par les panneaux photovoltaïques pour produire de l'électricité. Ce rayonnement comprend à la fois le rayonnement direct, provenant directement du Soleil, et le rayonnement diffus, diffusé dans toutes les directions après avoir été dispersé par l'atmosphère. Comprendre et caractériser le rayonnement solaire est essentiel pour concevoir et optimiser efficacement les systèmes photovoltaïques en vue de maximiser leur production d'électricité. Cela implique notamment de mesurer et d'analyser le rayonnement direct, le rayonnement diffus, ainsi que le rayonnement réfléchi par la surface terrestre [2].

### **I.4.1. Le rayonnement direct [2]**

Provient directement du Soleil et atteint la surface terrestre sans avoir été diffusé par l'atmosphère. Il suit un chemin rectiligne depuis le Soleil jusqu'à la surface terrestre.

### **I.4.2. Le rayonnement solaire diffus [2]**

Le rayonnement diffus est celui qui est diffusé dans toutes les directions par l'atmosphère après avoir été dispersé par des particules atmosphériques telles que les molécules d'air, les nuages, ou la poussière. Il ne conserve pas de direction spécifique et contribue à l'éclairage global reçu par une surface.

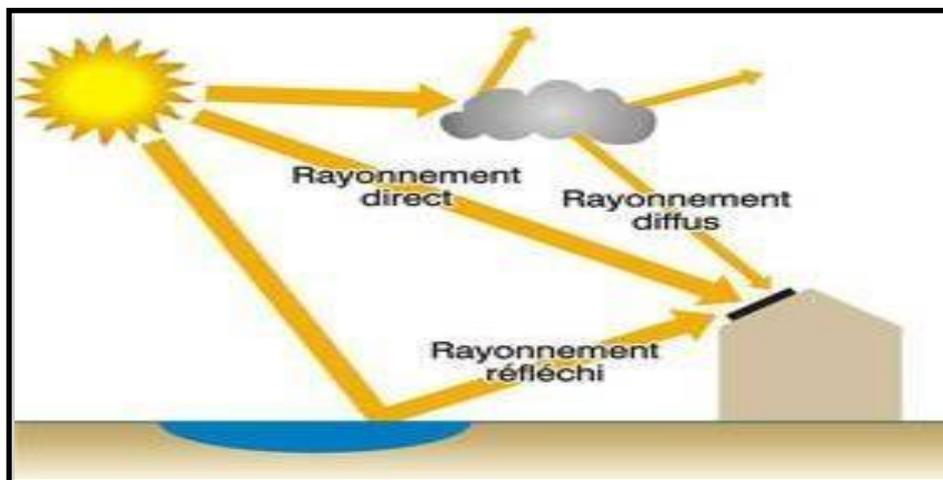
### **I.4.3. Rayonnement solaire diffus [2]**

Le rayonnement réfléchi est celui qui est renvoyé par une surface après avoir été absorbé. Il provient généralement de surfaces réfléchissantes telles que la neige, la glace, ou des surfaces artificielles comme les bâtiments ou les routes.

### **I.4.4. Le rayonnement solaire global**

Le rayonnement solaire global est la somme du rayonnement direct, du rayonnement diffus, et du rayonnement réfléchi qui atteint une surface terrestre donnée. Il représente l'ensemble de l'énergie solaire disponible pour être captée et utilisée par un système photovoltaïque ou tout autre dispositif solaire [2].

Les composantes du rayonnement solaire sont illustrées sur (*La Figure I.1*) :



**Figure I. 1 :** Les composantes du rayonnement solaire.

## **I.5. Définition de l'énergie photovoltaïque :**

Le terme « photovoltaïque » désigne le processus physique qui consiste à transformer l'énergie lumineuse en énergie électrique par le transfert de l'énergie des photons aux électrons d'un

Matériau . Le principe photovoltaïque a été découvert par le physicien français A. Becquerel en 1839 et expliqué par Albert Einstein en 1905 (c'est pour cette explication qu'il a reçu le prix Nobel de Physique en 1921).

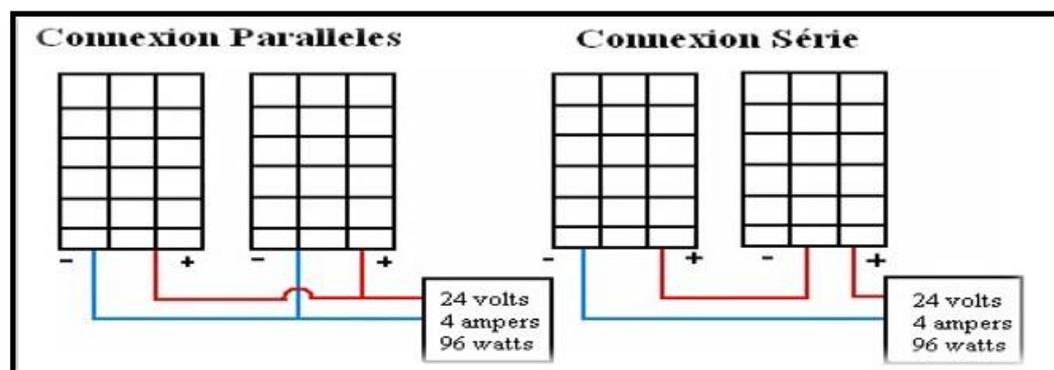
Le préfixe Photo vient du grec « phos » qui signifie lumière. « Volt » vient du patronyme d'Alessandro Volta (1745-1827), physicien qui a contribué aux recherches sur l'électricité. Photovoltaïque (PV) signifie donc littéralement électricité lumineuse [11].

## I.6. Le générateur photovoltaïque :

Un générateur photovoltaïque est l'unité de production de l'énergie électrique sous forme continue. Il est constitué d'un ensemble de panneaux, qui eux même se composent d'un ensemble de modules connectés électriquement entre eux et situés sur un même plan (structure porteuse) fixe ou mobile (système de poursuite). [17]

Afin d'atteindre les spécifications requises par là où les charges à alimenter, on peut distinguer deux types de connexion :

- La connexion **série** des modules permet d'atteindre les tensions désirées, l'ensemble constitue une branche.
- La connexion **parallèle** des branches permet d'atteindre les courants désirés.
- La combinaison des connexions séries-parallèles permet d'atteindre la puissance nécessaire



**Figure I. 2 :** Schéma de connexion des modules photovoltaïques .

## I.7. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

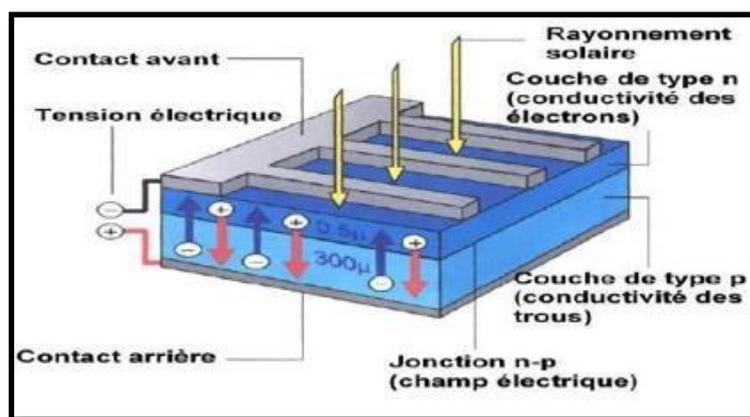
Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique (voir figure I.2). Le principe de cette conversion repose sur les trois phénomènes suivants : [3]

- Absorption de la lumière.

- Conversion de l'énergie absorbée en énergie électrique, ce qui correspond à la création de pair électron dans le semi-conducteur.
- Collecte des particules générées.

La solution la plus fréquente pour collecter ces particules est d'appliquer un champ électrique au moyen d'une jonction p-n. Il est aussi possible d'utiliser d'autres structures, comme les hétérojonctions et les diodes Schottky.

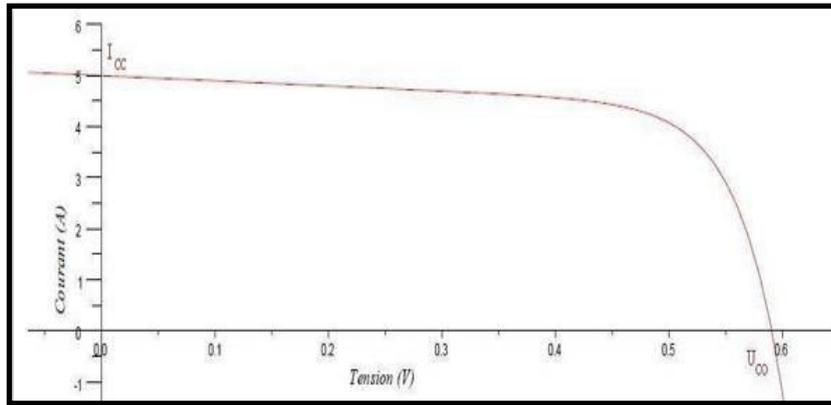
Sous éclairage, les paires électrons/trous photo-générées dans la zone de charge d'espace sont instantanément dissociées par un champ électrique. Les trous sont accélérés vers la zone p et les électrons vers la zone n. Alors, on aura un photo-courant de génération. Et dans les zone n ou p, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace, sans se recombiner, sont propulsés par le champ électrique vers la zone où ils seront majoritaires et on aura un photo-courant de diffusion. C'est deux contributions s'ajoutent pour donner un photo-courant résultant  $I_{ph}$ . C'est un courant de porteurs minoritaires proportionnel l'intensité lumineuse [3].



**Figure I. 3 :** Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium

### **I.8. Différents paramètres d'une cellule photovoltaïque**

Une cellule photovoltaïque, en tant que dipôle électrique, dispose de sa propre caractéristique courant-tension  $I(V)$ , ainsi qu'illustré sur la figure ci-dessous :



**Figure I. 4 :** Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

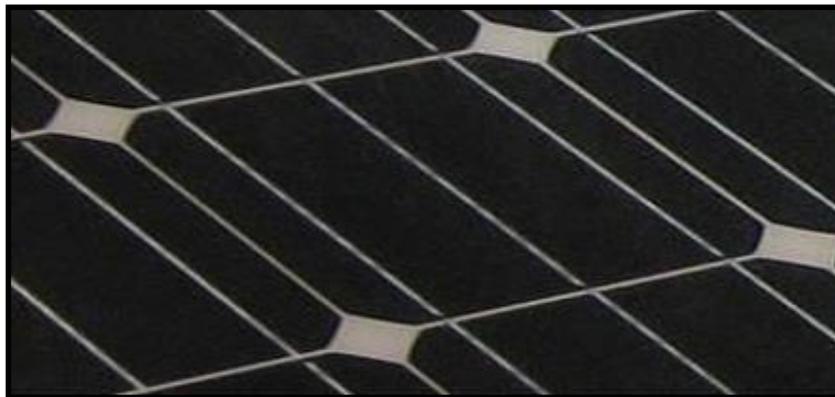
## **I.9. Les différents types de cellules photovoltaïques**

Divers types de cellules solaires ou photovoltaïques sont disponibles dans le marché, chacun ayant ses propres caractéristiques en termes de rendement et de coût. Malgré les différences, le rendement demeure généralement modeste, oscillant entre 8 et 23 % de l'énergie reçue par les cellules.

La filière silicium représente 99% du marché des modules photovoltaïques. Il est l'un des éléments les plus abondants sur Terre, parfaitement stable et non toxique. Actuellement, les trois principaux types de cellules sont [4] :

### **I.9.1. Les cellules monocristallines**

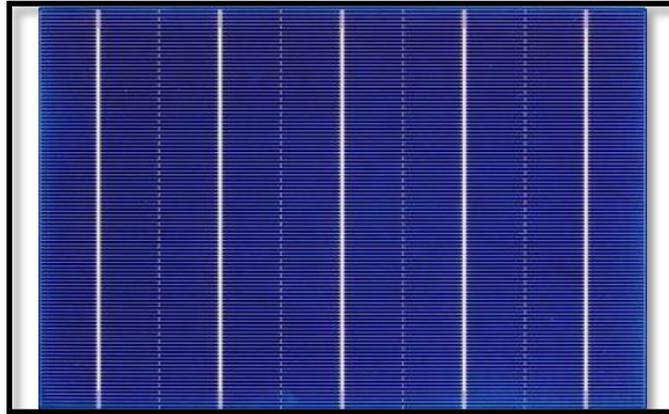
- ✓ Cellule solaire de première génération.
- ✓ Un rendement élevé allant jusqu'à 25%.
- ✓ Coût élevé en raison de leur processus de fabrication complexe.
- ✓ L'obtention de cristaux purs nécessite beaucoup d'énergie.



**Figure I. 5 :** Cellule photovoltaïque monocristalline.

### **I.9.2. Les cellules poly cristallines**

- ✓ Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important.
- ✓ Ont une grande durée de vie pouvant atteindre 30 ans.
- ✓ Le rendement est de 11-13% (18% en laboratoire).
- ✓ Les panneaux polycristallins nécessitent plus d'espace que les panneaux monocristallins pour produire la même quantité d'énergie.



**Figure I. 6 :** Cellule photovoltaïque polycristalline .

### **I.9.3. Les cellules amorphes**

- ✓ Ont la capacité de mieux capter la lumière, même sous un faible éclairement, et peuvent fonctionner sous lumière artificielle.
- ✓ Coût abordable.
- ✓ Processus de fabrication complexe.
- ✓ Faible rendement en plein soleil.

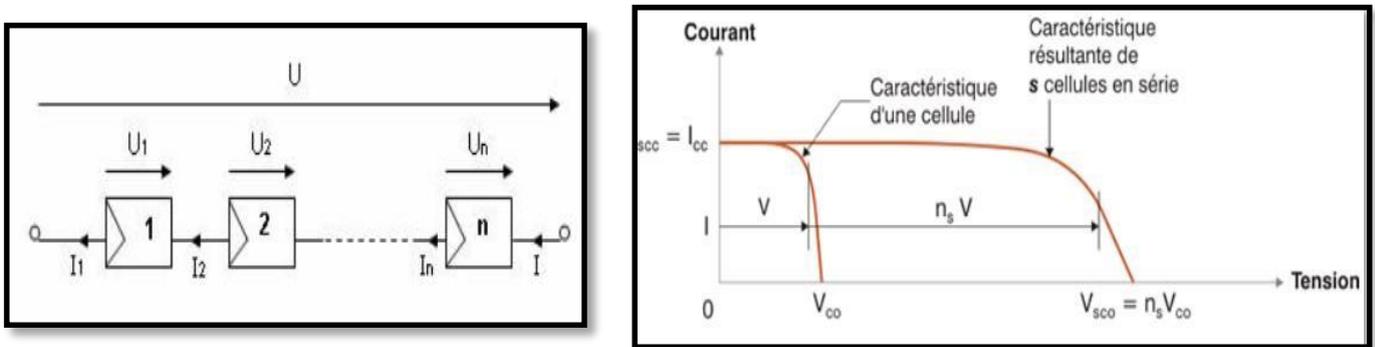


**Figure I. 7 :** Cellule photovoltaïque amorphe.

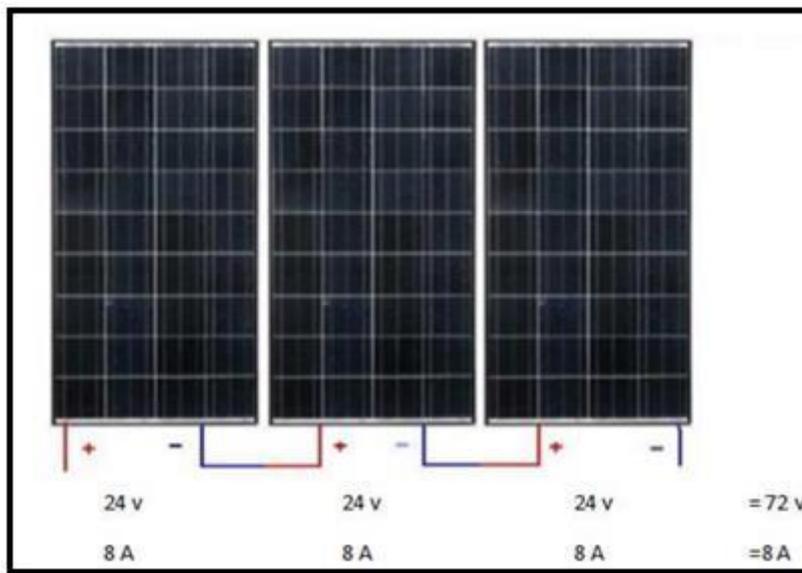
**I.10. Regroupement des cellules**

**I.10.1. Le regroupement en série**

Le regroupement en série des cellules photovoltaïques permet d'augmenter la tension de sortie. Lorsque des cellules sont connectées en série, la tension de sortie est la somme des tensions individuelles de chaque cellule, tandis que le courant est commun à toutes les cellules. [4]



**Figure I. 8:** Branchement série des panneaux photovoltaïques



**Figure I. 9:** Caractéristiques des cellules PV connectées en série.

$$U = N_s \times U_c$$

$$I = I_1 = I_2 = I_3 = I_n$$

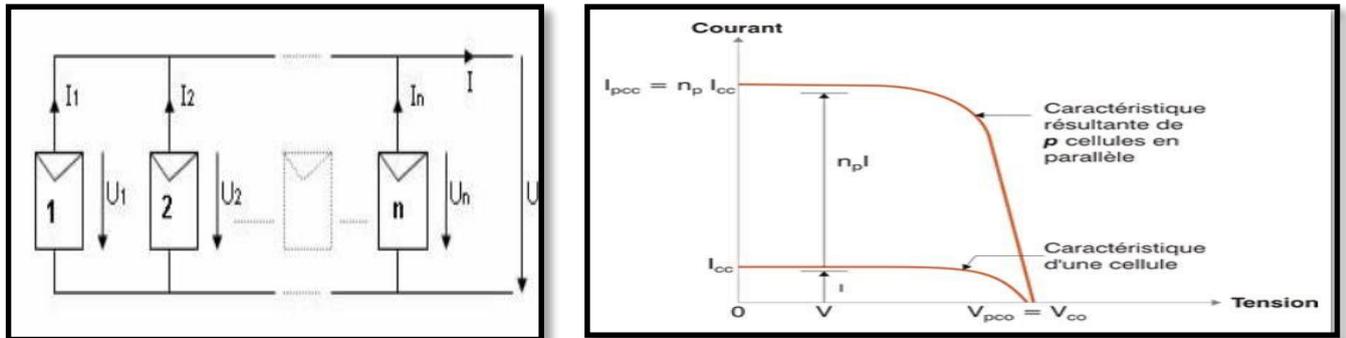
Tel que :

$U_c$ : Tension fournie par une cellule.

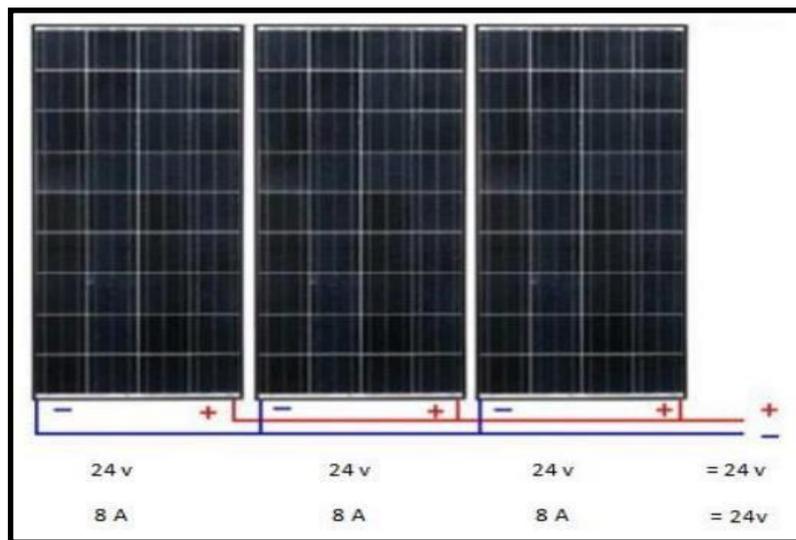
$N_s$  : Nombre de cellules associées en séries

**I.10.2. Le regroupement en parallèle**

Le regroupement en parallèle de cellules photovoltaïques permet d'augmenter le courant pour une même tension. Les cellules sont soumises à la même tension et le courant résultant correspond à la somme des courants générés par chacune. Cette association est utile pour les applications nécessitant un courant plus élevé. [4]



**Figure I. 10 :** Caractéristique de cellules PV connectées en parallèle.



**Figure I. 11 :** Branchement en parallèle de panneaux PV.

$$U = U_1 = U_2 = U_3 = U_n.$$

$$I = N_p \times I_c$$

NP : Nombre de cellules associées en parallèles

$I_c$  : Le courant traversant chaque cellule.

### I.11. Le stockage de l'énergie photovoltaïque

Le stockage de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques joue un rôle crucial dans l'optimisation de l'énergie en permettant de conserver l'électricité produite par les panneaux photovoltaïques pour une utilisation ultérieure. Cela permet d'augmenter l'autoconsommation en utilisant directement l'énergie solaire produite, de réduire la dépendance au réseau électrique, d'optimiser l'indépendance énergétique et de maximiser l'efficacité de l'installation en stockant l'énergie excédentaire pour une utilisation lors des pics de consommation ou pendant les périodes sans ensoleillement [9].

### I.12. Les formes de stockage

Le stockage direct de l'énergie électrique n'est pas possible de façon efficace et durable, car si l'on sait capturer et utiliser un courant électrique, on ne sait pas comment garder les électrons en mouvement qui le constituent. Il faut donc d'abord transformer l'énergie facilement stockable, celle-ci sera ensuite récupérée et retransformée en électricité en vue de son utilisation [5] :

#### I.12.1. Stockage sous forme mécanique

##### *Stockage hydraulique gravitaire STEP*

Les Stations de Transfert d'Énergie par Pompage (STEP) sont la principale technologie de stockage mécanique de l'énergie, représentant plus de 50 % du stockage d'électricité dans le monde.

Elles fonctionnent en pompant de l'eau entre deux réservoirs situés à des altitudes différentes. Avec des rendements pouvant atteindre 65 à 80%, les STEP offrent une capacité de stockage considérable et sont particulièrement adaptées aux projets à grande échelle. En déplaçant l'eau entre les réservoirs, les STEP exploitent l'énergie potentielle de l'eau. L'énergie stockée est donc exprimée par [6] :

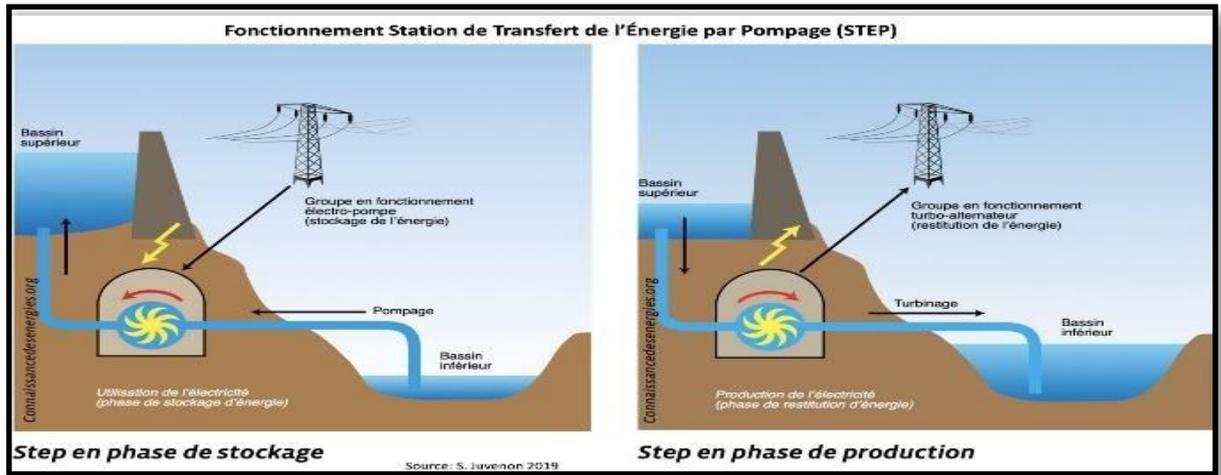
$$E = m g h \quad (\text{I.1})$$

Avec :

m : masse d'eau

g : l'accélération due à la gravité

h : la différence d'altitude entre les réservoirs.



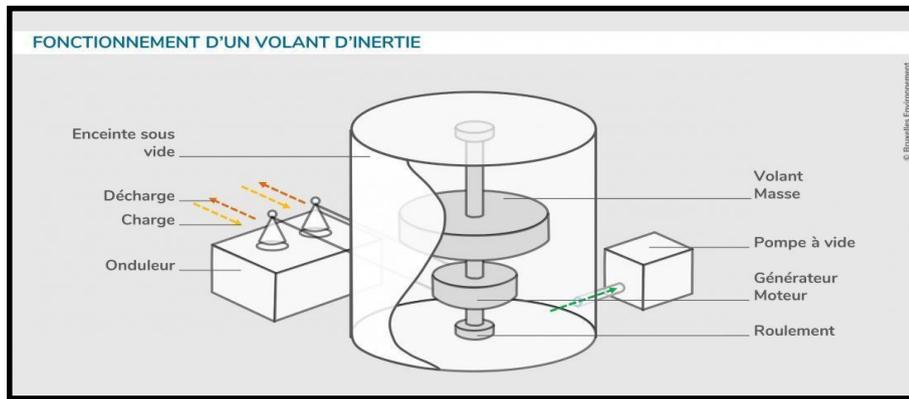
**Figure I.12.** Fonctionnement d'une STEP.

### Le volant d'inertie

Le fonctionnement d'un volant de stockage se scinde en deux phases bien distinctes, l'une pendant laquelle il emmagasine de l'énergie et l'autre pendant laquelle il la restitue. Pendant la journée, un moteur électrique alimenté par l'installation photovoltaïque à laquelle est relié le volant de stockage met en mouvement le cylindre qui accélère progressivement pour atteindre une vitesse très importante, jusqu'à plusieurs milliers de tours/minutes. Plus la masse du cylindre est élevée, plus la quantité d'énergie accumulée est importante. Lorsque les panneaux solaires ne fonctionnent plus, la nuit par exemple, le volant de stockage restitue sous forme d'électricité l'énergie cinétique qu'il a accumulée tout au long de la journée en activant par son mouvement un alternateur qui freine peu à peu le cylindre pour produire de l'électricité. La production d'électricité se poursuit jusqu'à l'arrêt total du cylindre [9].

Le volant massique tournant à très grande vitesse emmagasine de l'énergie cinétique qui est proportionnelle au moment d'inertie du volant  $J$ , et au carré de la vitesse angulaire  $\Omega$  :

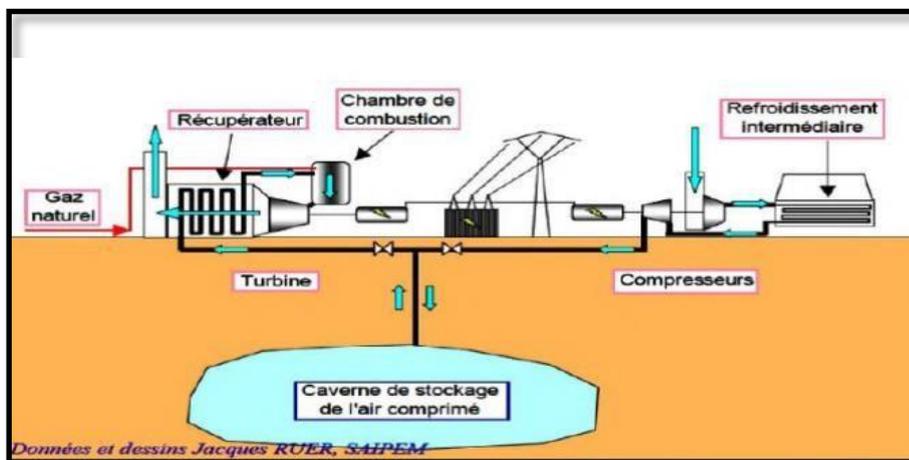
$$E = \frac{1}{2} j \Omega^2 \tag{I.2}$$



**Figure I. 13 :** Fonctionnement d'un volant d'inertie

### I.12.2. Stockage par air comprimé

Compressed Air Energy Storage ; (stockage par air comprimé en français), est un type de stockage d'énergie les plus matures. Le système implique l'utilisation d'un compresseur alimenté par le courant excédentaire du réseau ou celui d'une centrale. L'appareil comprime de l'air, puis le stocke à très haute pression (jusqu'à 100 bars) dans des cavités souterraines. Lors des pics de demande, l'air est libéré, chauffé dans une chambre de combustion à gaz et entraîne une turbine couplée à un alternateur, afin de créer de l'électricité [7].



**Figure I. 12 :** Principe du stockage par air comprimé.

### I.12.3. Stockage sous forme chimique

#### Hydrocarbure

Les hydrocarbures liquides sont la principale forme de stockage d'énergie, surtout dans les transports, venant principalement des énergies fossiles avec un rendement d'environ 75% de

L'extraction à la pompe. Les biocarburants, issus de la biomasse, offrent un rendement d'environ 70% de la biomasse à la pompe.

### Biomasse

La biomasse englobe toutes les matières organiques pouvant servir de source d'énergie, issues notamment des végétaux qui stockent l'énergie solaire via la photosynthèse. Ce processus de stockage est lent, prenant plusieurs mois, et avec un rendement relativement faible, seulement environ 1% de l'énergie solaire captée est convertie en biomasse.

### Pile à combustible à hydrogène

La pile à combustible à hydrogène fonctionne sur le principe de l'oxydoréduction, où une anode oxydante et une cathode réductrice sont séparées par un électrolyte central. L'anode reçoit de l'hydrogène et la cathode de l'oxygène, autrement dit de l'air. L'anode provoque l'oxydation du combustible et la libération d'électrons, contraints par l'électrolyte chargé en ions de passer par un circuit externe. Ce circuit externe offre donc un courant électrique en continu. Les ions et les électrons se réunissent dans la cathode, où ils se recombinent avec le second combustible, générant de l'eau et de la chaleur en plus du courant électrique. Tant qu'elle est approvisionnée, la pile fonctionne en continu [8] :

Voici les principales réactions chimiques qui se produisent dans une pile à combustible à hydrogène :

À l'anode :

L'hydrogène (H<sub>2</sub>) est oxydé, libérant des électrons :



À la cathode :

L'oxygène (O<sub>2</sub>) de l'air est réduit, captant les électrons libérés à l'anode :



Réaction globale :



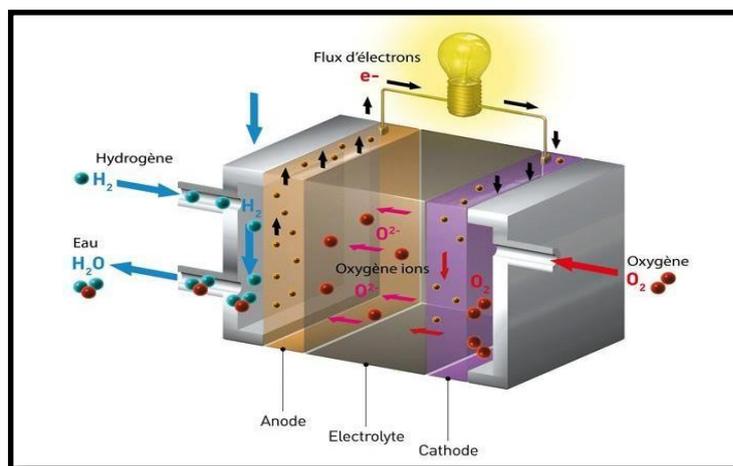


Figure I. 15 : Principe du stockage par air comprimé .

### I.12.4. Stockage sous forme électromagnétique

#### Super condensateurs

Le stockage d'énergie pour les super condensateurs n'est pas réalisé grâce à un transfert de charges mais grâce aux interactions électrostatiques entre les ions de l'électrolyte liquide et les charges électroniques à la surface des électrodes. Lorsqu'une tension est appliquée entre les deux électrodes, les ions de l'électrolyte, sous l'influence du champ électrique, se dirigent vers l'électrode comportant des charges de signe opposé. L'intension, la tension varie donc avec l'état énergétique, ce qui implique l'utilisation d'un convertisseur électronique de puissance d'adaptation [9].

$$E = \frac{1}{2}CU_c^2 \quad (I.6)$$

### I.12.5 Stockage sous forme électrochimique

#### Les batteries

Une batterie assure le stockage de l'électricité en vue de son utilisation ultérieure. Elle contient toujours une électrode positive et une électrode négative toutes deux immergées dans un bain d'électrolyte. Contrairement aux piles, les batteries sont basées sur un système réversible, c'est-à-dire qu'elles sont capables de se recharger après une décharge.

Lorsqu'une charge est connectée à une batterie, un circuit se forme, déclenchant des réactions chimiques aux électrodes. La plaque négative subit une oxydation, perdant des électrons, tandis que la plaque positive subit une réduction, gagnant des électrons. Les ions se déplacent à travers l'électrolyte, maintenant un flux d'électrons constant pour alimenter les appareils. Lors de la

Recharge , ce processus est inversé : les ions se déplacent de la plaque positive vers la plaque négative, et cette dernière récupère des électrons [10].

**Les caractéristiques importantes d'une batterie**

- **La tension et la capacité**

La quantité d'énergie stockable dans une batterie est appelée "capacité", mesurée en Ampère-heure (Ah). En multipliant cette capacité par la tension de la batterie, on obtient l'énergie totale en Watt-heure (Wh). Par exemple, pour une batterie de 12V / 100Ah, sa capacité équivaut à 100Ah x 12V = 1200 Wh, soit 1.2 kWh [10].

Pour déterminer la tension de stockage il faut tenir compte de la puissance photovoltaïque installée. La règle pour cela est assez simple : plus la consommation d'énergie est élevée, plus la tension est élevée, afin de diminuer les déperditions d'énergie, qui surviennent quand l'énergie est transportée ou stockée

Le tableau (I.1) représentera les tensions recommandées pour chaque niveau de puissance de l'installation [10] :

**Table I. 1** : Tension de stockage en fonction de la puissance de l'installation PV

Puissance de l'installation PV	Tension recommandée
De 0 à 800 Wc	12 V
De 800 à 1600 Wc	24 V
Au-dessus de 1600 Wc	48 V

- **Etat de charge et profondeur de décharge**

L'état de charge (SOC) indique l'énergie restante dans la batterie en pourcentage de sa capacité nominale, tandis que la profondeur de décharge (DOD) ou (PDP) représente l'énergie déjà consommée de la batterie en pourcentage de sa capacité nominale. La somme de ces deux valeurs est toujours égale à 100%.

- *Le cyclage et la durée de vie*

La batterie subit une légère diminution de sa capacité à chaque cycle de charge/décharge, qui d'autant plus significative en cas de décharge profonde. La durée de vie d'une batterie est donc directement liée au nombre de cycles de charges/décharges et à leur profondeur.

- *Influence de la température*

La capacité d'une batterie est souvent spécifiée pour une température ambiante de 20 à 25°C. Cette capacité varie en fonction de la température : elle augmente avec l'augmentation de la température et diminue avec sa diminution.

La durée de vie de la batterie est également liée à la température de fonctionnement. Une augmentation de 10°C au-dessus de 20°C peut réduire sa durée de vie de moitié.

- *Calcul de la capacité de la batterie en fonction du besoin journalier*

$$C_{batt} = \frac{J_{aut} \times B_j}{U_{batt} \times PDP \times K_T} \quad (I.7)$$

Avec :

$B_j$  : Le besoin journalier ;

$J_{aut}$  : jours d'autonomie (en jours) ;

PDP : La profondeur de décharge d'une batterie ;

$K_T$  : Coefficient de température de la capacité ;

$U_{batt}$  : Tension de la batterie.

### *Différents types de batteries solaires*

On trouve dans le marché un large choix de batteries de stockage solaires qui se différencient les unes des autres par rapport au coût ; Etat de charge, durée de vie, nombre de cycles...etc. On représentera sur le **Tableau I.2** les 4 types de batteries les plus utilisées actuellement.

**Table I. 2 : Les différents types de batteries**

<p>Plomb -acide ouvertes</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Coût initial abordable</li> <li>➤ Durée de vie allant jusqu'à 8-10 ans</li> <li>➤ Elles supportent un nombre élevé de cycles de charge/décharge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Entretien requis</li> <li>➤ Elles doivent être installées dans un local ventilé et éloigné des équipements électroniques sensibles en raison des émissions de gaz corrosifs</li> <li>➤ Elles sont lourdes et encombrantes, ce qui peut rendre leur transport et leur installation difficiles</li> </ul>
<p>Lithium</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Elles peuvent stocker 3 à 4 fois plus d'énergie par unité de masse que d'autres technologies de batteries.</li> <li>➤ Elles se rechargent très rapidement</li> <li>➤ Elles supportent un grand nombre de cycles de charge/décharge</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Coût plus élevé</li> <li>➤ Risque d'emballement thermique</li> <li>➤ Besoin de systèmes de gestion électroniques sophistiqués</li> </ul>
<p>AGM (Absorbed Glass Mat)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Ne nécessitent pas d'entretien régulier</li> <li>➤ Résistance aux fuites (étanches)</li> <li>➤ Résistent à des températures extrêmes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Sensibilité à la surcharge</li> <li>➤ Faible durée de vie</li> </ul>
<p>Gel</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Durée de vie moyenne</li> <li>➤ Résistance à la décharge profonde</li> <li>➤ Ecologiques</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Prix un peu plus élevé</li> <li>➤ Lourdes et difficiles à transporter</li> </ul>

### **I.13. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire**

#### **I.13.1 Avantages**

- D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Consommation gratuite dès l'installation du système.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du Milliwatt au Mégawatt.

- Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.
- 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.

### **I.13.2 Les inconvénients**

- 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, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km<sup>2</sup> par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%.
- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Tributaire des conditions météorologiques.

### **I.14 conclusion**

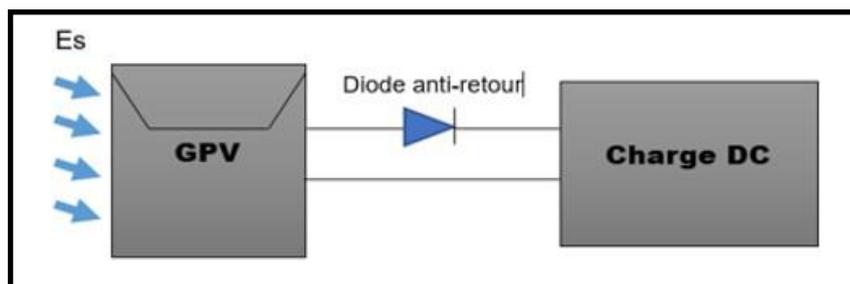
Ce chapitre a présenté une recherche sur système photovoltaïque, depuis leurs principes de base jusqu'aux défis actuels. Nous avons exploré les différentes technologies de cellules solaires, leurs caractéristiques et leurs applications. Une attention particulière a été portée aux méthodes de stockage de l'énergie, élément crucial pour l'efficacité des systèmes photovoltaïques. Malgré des avantages significatifs en termes d'écologie et de fiabilité, des défis persistent, notamment concernant les rendements et les coûts initiaux. Cette vue d'ensemble constitue une base solide pour aborder la modélisation et l'optimisation des systèmes photovoltaïques dans les chapitres suivants.

## **II.1 Introduction :**

Les modules photovoltaïques sont présentés avec des paramètres électriques spécifiques pour chaque modèle, fournis par le fabricant dans les conditions standards STC (Ensoleillement = 1000 W/m<sup>2</sup>, température = 25°C). Cependant, ces conditions ne sont pas toujours évidentes à l'extérieur, les changements atmosphériques influencent sur le comportement et les performances du module PV.

Dans ce chapitre on s'intéressera à la caractérisation électrique du module PV modèle Suntech 80 Nous commencerons par rappeler les équations et les modèles mathématiques, du plus simple au plus élaboré, du panneau photovoltaïque. Ensuite, nous procéderons à la caractérisation du module via des simulations sous Matlab/Simulink, nous allons également présenter l'influence des changements climatique sur les caractéristiques puissance tension et courant tension. Nous allons clôturer ce chapitre avec la modélisation du convertisseur statique DC/DC qui est un élément essentiel dans notre système PV.

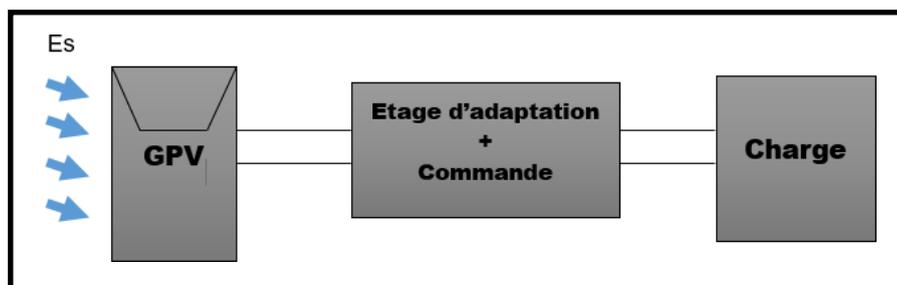
## **II.2 Connexion directe source-charge**



**Figure II. 1 :** Schéma illustratif de la connexion directe source-charge

## **II.3 Connexion à travers un étage d'adaptation (convertisseur DC/DC)**

L'introduction d'un étage d'adaptation entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge, comme indiqué sur la Figure II-2, permet d'assurer un transfert optimal d'énergie. Cet étage d'adaptation, généralement un convertisseur statique DC/DC (comme un convertisseur boost), ajuste les tensions et courants pour respecter les contraintes du GPV et de la charge, garantissant ainsi des conditions de fonctionnement optimales. En contrôlant cet étage, on peut extraire et transférer en continu la puissance maximale disponible du GPV à la charge, indépendamment des variations d'ensoleillement et de la demande de la charge. [11]



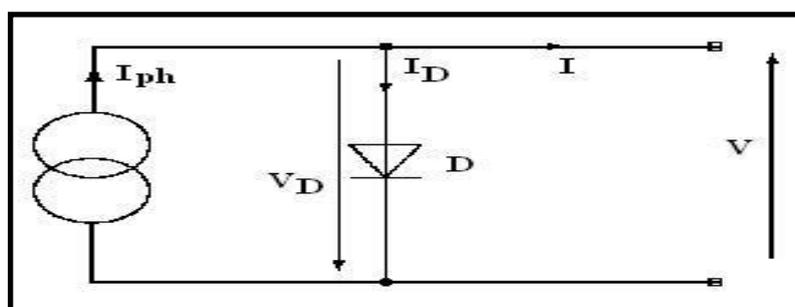
**Figure II. 2 :** Etage d'adaptation entre un GPV et une charge.

### **II.4 Modélisation du générateur photovoltaïque :**

La modélisation du générateur photovoltaïque implique la représentation de sa caractéristique courant-tension (I-V), qui est non linéaire. Pour optimiser son fonctionnement et atteindre le point de puissance maximale (MPP), il faut ajuster la charge électrique connectée au générateur. Les modèles mathématiques, comme ceux à une ou deux diodes, sont utilisés pour prédire son comportement en fonction des paramètres du panneau solaire et des conditions environnementales. Une fois le modèle établi, des techniques d'optimisation sont employées pour trouver le point de fonctionnement optimal de la charge, maximisant ainsi la puissance extraite du générateur dans des conditions variables.

### **II.5 Cellule photovoltaïque**

Une cellule photovoltaïque idéale est un composant semi-conducteur qui délivre un courant en excitant ce dernier par des photons. Dans le modèle idéal, la cellule photovoltaïque est représentée comme une source de courant court-circuitée par une diode, car la photopile est une jonction P-N.



**Figure II. 3 :** Schéma électrique équivalent d'une cellule PV idéale.

Le courant délivrée par la cellule PV éclairée d'après la loi des nœuds est donné par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d \quad (\text{II.1})$$

$I_{pv}$  : Courant fourni par la cellule

$I_{ph}$  : photo –courant

$I_d$  : Le courant traversé par la diode

$$I_d = I_s \left( \exp \frac{V}{V_T} - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

En remplaçant l'équation de ( $I_d$ ) dans l'équation de ( $I_{pv}$ ) on obtient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left( \exp \frac{V}{V_T} - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

Avec :

$I_s$  : Courant de saturation de la diode

$V$  : Tension aux bornes de la cellule

$V_T = AKT_j/q = 26\text{Mv}$  à  $T=300\text{ K}$  pour le silicium

$T_j$  : Température de jonction

$A$  : Facteur d'idéalité de la diode

$K=1.38.10^{-23}\text{ J/K}$  : Constante de Boltzmann

$q$  : Charge de l'électron

### **II.5.1. Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque**

- **Courant de court-circuit  $I_{cc}$  :**

C'est le courant maximal que peut délivrer la cellule PV, Lorsque la tension à ses bornes est égale à 0 ( $V_{pv}=0$ ).

- **Tension en circuit ouvert  $V_{co}$  :**

C'est la tension aux bornes de la cellule lorsque le courant traversé par celle-ci est nul. Elle représente un point clé sur la courbe Courant-tension (I-V), c'est une caractéristique indispensable pour l'évaluation du comportement électrique de la cellule photovoltaïque.

• **La puissance maximale Pmax :**

La puissance maximale utile, notée Pmax, est obtenue en optimisant le produit du courant et de la tension fournis par la cellule solaire. Ce pic de puissance se situe généralement au point où la courbe caractéristique Ipv-Vpv présente un coude. À ce point précis, appelé point de puissance maximale (Pmax), la cellule solaire fournit sa puissance maximale pour un niveau d'éclairement donné. Ce Pmax correspond à une tension maximale, Vmax, et à un courant maximal, Imax.

• **Facteur de forme**

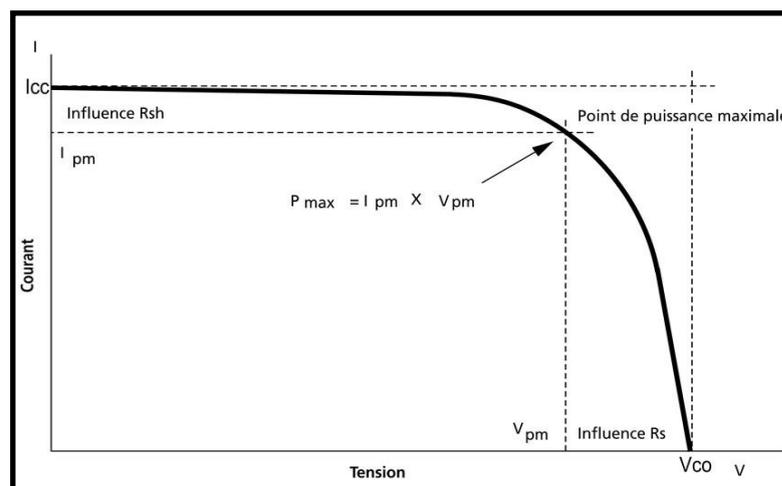
Il caractérise la qualité de la cellule solaire. C'est le rapport entre la puissance maximale (Pmax) délivrée par la cellule et le produit du courant de court-circuit par la tension de circuit ouvert (Icc×Vco).

$$f = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{co}} \tag{II.4}$$

• **Rendement**

C'est le rapport entre la puissance maximale produite et le produit du rayonnement solaire par la surface du module qui est défini comme la puissance incidente.

$$\eta = \frac{P_{max}}{E_s \times S} \tag{II.5}$$



**Figure II. 4 :** point de puissance maximal sur la caractéristique Ipv=f(Vpv)

II.5.2. Modèle à une diode :

C'est le modèle le plus classique dans la littérature. Il inclut un générateur de courant pour représenter le flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes de polarisation, et deux résistances (série et shunt). Le modèle à une diode, en raison de sa simplicité, est actuellement le plus utilisé. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes ainsi que des conditions climatiques. [14]. La figure ( II.5) représente le circuit électrique équivalent de modèle à une diode :

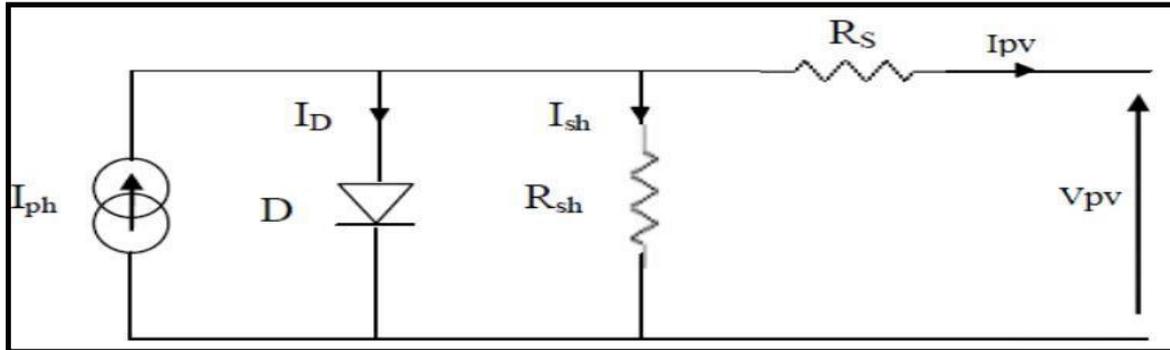


Figure II. 5 : Circuit électrique équivalent du modèle à une diode [26].

Le courant généré par le module est déduit à partir de la figure (II.3) par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \tag{II.6}$$

$$I_{ph} = P_1 \cdot E (1 + P_2(E - E_{sref}) + P_3(T_j - T_{jref})) \tag{II.7}$$

$E_{ref}, T_{jref}$  : L'éclairement et la température sous les conditions standards STC.

$T_j$  : Température de jonction de la cellule et elle est déterminée par la relation suivante :

$$T_j = T_a + E_s \cdot \left( \frac{N_{oct} - 20}{800} \right) \tag{II.8}$$

Avec :

$N_{oct}$  : La température nominale de fonctionnement de la cellule solaire (Nominal operating cell température) et  $T_a$  est la température ambiante [12].

$$I_d = I_s \cdot \left[ \exp \left( \frac{q(V + R_s \cdot I)}{K \cdot A \cdot n_s \cdot T_j} \right) - 1 \right] \tag{II.9}$$

Où  $I_s$  est le courant de saturation de la diode qui est égale à :

$$I_s = P_4 \cdot T_j^3 \exp\left(\frac{E_g}{K \cdot T_j}\right)$$

$E_g$  : Energie de gap.

$P_1, P_2, P_3, P_4$  : Paramètres constants

L'expression du courant traversant la résistance en parallèle est obtenue par :

$$I_{sh} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.9})$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_s \left( \exp\left(\frac{q \cdot (V + R_s I)}{AK n_s T}\right) - 1 \right) - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{II.10})$$

$R_s$  : Résistance série qui est due aux différentes résistances électriques que le courant rencontre sur son parcours (résistance de contacte).

$R_{sh}$  : Résistance shunt qui prend en compte les fuites inévitables de courant qui intervient entre les bornes opposées positive et négative d'une cellule.

D'où l'équation modélisant le générateur PV est donnée par :

$$I_{pv} = P_1 \cdot E \cdot [1 + P_2 \cdot (E - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref})] - P_4 \cdot T_j^3 \quad (\text{II.11})$$

### II.5.3. Modèle à deux diodes

Une cellule solaire sous éclaircissement est modélisée comme une source de photo-courant connectée à deux diodes idéales et deux résistances (série  $R_s$  et shunt  $R_{sh}$ ). La diode  $D_1$  représente le courant de diffusion, tandis que  $D_2$  modélise le courant de recombinaison des porteurs dans la région de charge d'espace. Le modèle à deux diodes, en intégrant ces deux mécanismes, offre une représentation plus précise du comportement réel d'un panneau photovoltaïque par rapport au modèle à une seule diode. Le circuit électrique de ce modèle qui contient double diode  $D_1$  et  $D_2$  est représenté dans le schéma de la figure (II.6) ci-dessous :

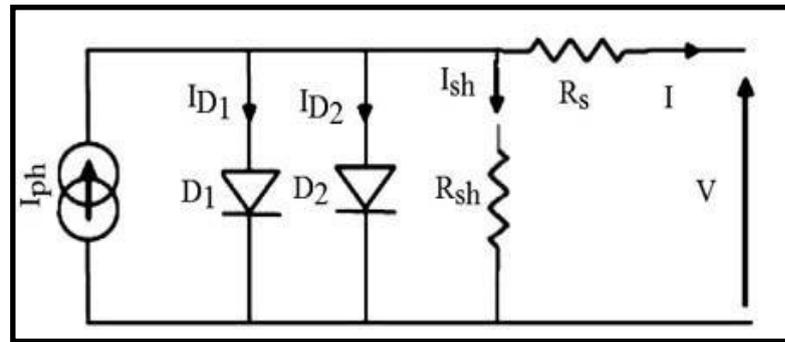


Figure II. 6 : Circuit électrique équivalent du modèle à deux diodes.

L'équation du courant de sortie de la cellule PV est obtenue d'après la loi des nœuds :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (\text{II.12})$$

Où  $I_{d1}$  et  $I_{d2}$  sont les courants de saturation de la première et de la deuxième diode respectivement.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \cdot \left( \exp\left(\frac{V+R_s \cdot I}{A_1 \cdot V_{t1}}\right) - 1 \right) - I_{s2} \cdot \left( \exp\left(\frac{V+R_s \cdot I}{A_2 \cdot V_{t2}}\right) - 1 \right) - \frac{V+R_s \cdot I}{R_{sh}} \quad (\text{II.13})$$

$I_{s1}$  : Courant de saturation de la diode D1 ;

$I_{s2}$  : Courant de saturation de la diode D2 ;

$A_1$  et  $A_2$  représentent respectivement, les facteurs d'idéalité de deux diodes  $D_1$  et  $D_2$  ;

L'équation globale modélisant la caractéristique courant tension de la cellule à deux diodes s'écrit :

$$I_{pv} = P_1 E \left[ 1 + P_2 (E - E_{ref}) + P_3 (T_j - T_{jref}) \right] - P_4 T_j - P_5 T_j^3 \cdot e^{\frac{E_g}{2 \cdot k T_j}} \cdot e^{\frac{a(v+R \cdot c \cdot i)}{2 \cdot A \cdot K \cdot n_s \cdot T_j}} - \frac{V+R_s}{R_{sh}}$$

**II.6 Simulation du modèle à une diode**

Toutes les constantes dans les équations ci-dessus peuvent être déterminées en utilisant les données de fabricants de panneaux photovoltaïques et à partir des courbes I(V). Les modèles vu précédemment se distinguent par la méthode de calcul, la précision et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de cette caractéristique. Nous concernons, nous avons utilisé le modèle à une diode en raison de sa bonne précision ainsi que sa simplicité.

Il existe plusieurs méthodes de résolution numérique pour déterminer les sept paramètres constants P1, P2, P3, P4, Le facteur d'idéalité A ainsi que les résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$  du modèle du générateur PV à une diode, la plus utilisée est la méthode (Newton Raphson). [15] Le tableau donne les paramètres électriques du panneau utilisé dans les conditions standards ( $E=1000W/m^2$  ;  $T_j=25^\circ C$ ) :

**Table II. 1 :** Paramètres du panneau photovoltaïque SUNTECH 80

Puissance max du panneau $P_m$	80W
Courant au point de puissance max $I_{mp}$	4.65A
Tension au point de puissance max $V_m$	17.2V
Courant de court-circuit $I_{cc}$	5A
Tension en circuit ouvert $V_{oc}$	21.6V
Température nominale de fonctionnement de la cellule	50°C

Les valeurs des paramètres du modèle à une diode sont données dans le tableau (II.2) ci-dessous

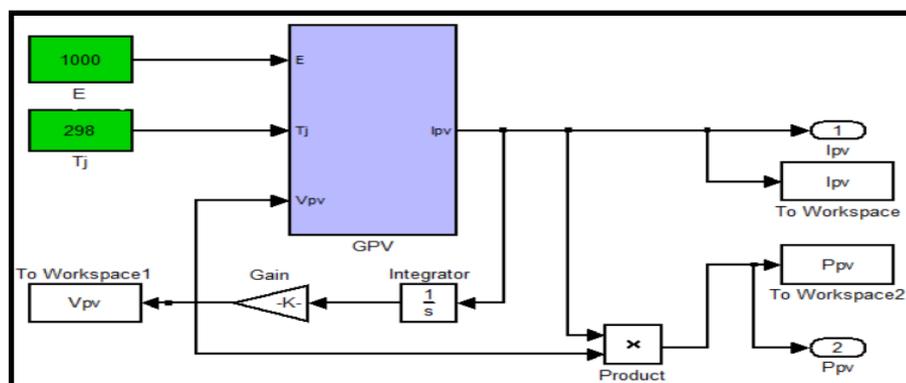
**Table II. 2 :** Paramètres obtenus du modèle à une diode du panneau PV SM110.

$P1$	$P2$	$P3$	$P4$	$A$	$R_{sh}$	$R_s$
0.00500	$7.27 \cdot 10^{-5}$	$-1.369 \cdot 10^{-5}$	38.8	1	601	0.46

Pour confirmer la validité de ce modèle, nous l'avons testé en utilisant les paramètres décrits dans le tableau (II.1) ainsi que le modèle mathématique établi précédemment. Nous avons ensuite étudié

les caractéristiques courant-tension et puissance-tension pour divers niveaux d'irradiation ( $G=400, 600, 800, 1000\text{W/m}^2$ ) à une température constante, et pour différentes températures ( $T_c=0, 25, 50, 75^\circ\text{C}$ ) à irradiation constante.

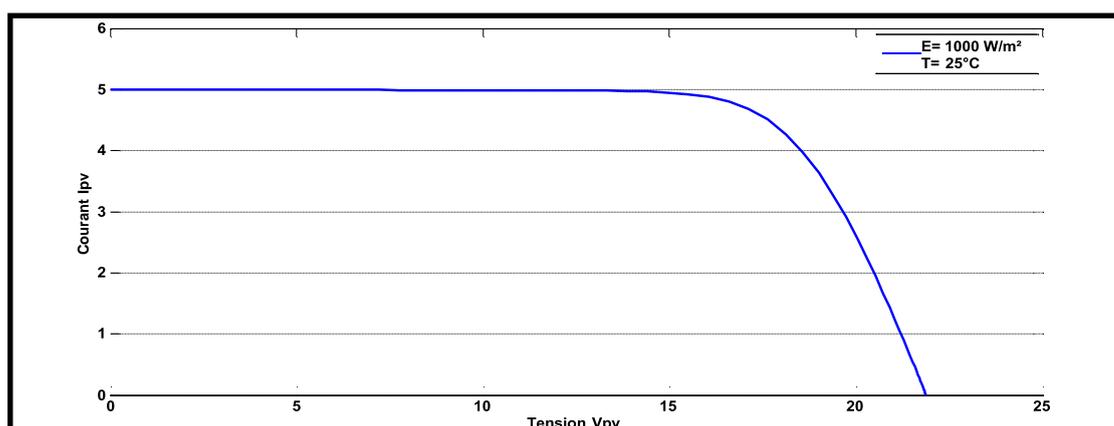
Dans l'environnement MATLAB/SIMULINK nous avons réalisé le schéma bloc d'un générateur photovoltaïque de type SUNTECH 80, illustré sur la figure (II.7) qui suit :



**Figure II. 7 :** Modèle du panneau PV sous MATLAB SIMULINK

### II.6.1. Caractéristique (I-V) et (P-V) dans les conditions standards

Les caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$  et  $P_{pv}(V_{pv})$  varient en fonction des conditions météorologiques : L'ensoleillement et la température. Les figures ( I I.8), ( I I.9) représentent les caractéristiques du courant et de la puissance d'un panneau photovoltaïque type SUNTECH 80 dans les conditions standards de l'ensoleillement et de la température ( $E = 1000\text{ W/m}^2 ; T=25^\circ\text{C}$ ).



**Figure II. 8 :** Caractéristique  $I_{pv}=f(V_{pv})$  dans les conditions standards (STC).

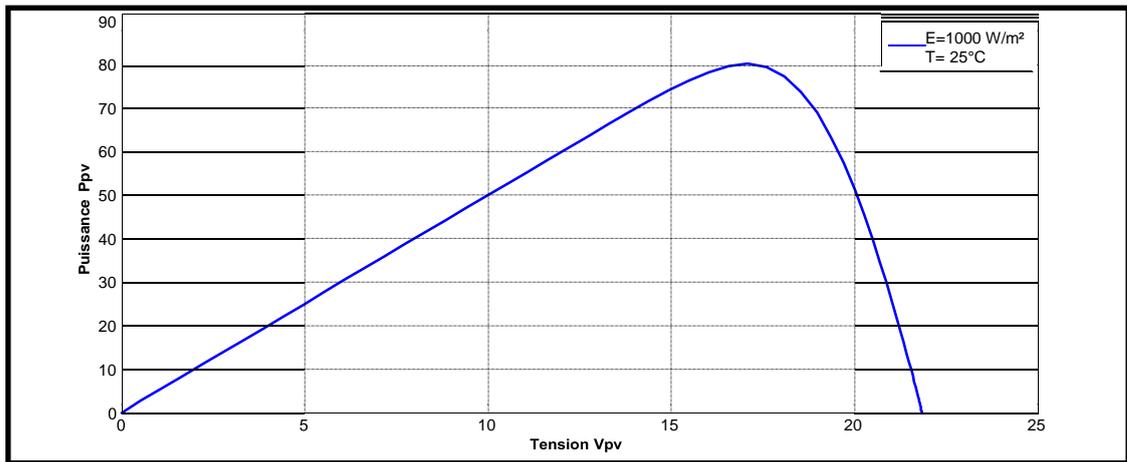


Figure II. 9 : Caractéristique  $P_{pv}=f(V_{pv})$  dans les conditions standards (STC).

La caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$  contient trois zones principales de fonctionnement de la cellule photovoltaïque [2].

- **La zone 1** : le courant reste constant quel que soit la variation de la tension de fonctionnement, on dit que la cellule est considérée comme un générateur de courant.
- **La zone 2** : Elle se trouve au coude de la courbe, c'est ici que se trouve le point de puissance maximal PPM qui est associé à un courant maximal  $I_{ppm}$  ainsi qu'à une tension maximal  $V_{ppm}$ . C'est-à-dire que la cellule délivre le maximum de puissance à ce point.
- **La zone 3** : La tension est quasiment constante tandis que le courant varie : la cellule se comporte comme un générateur de tension.

## II.7 Comparaison des résultats

On a effectué des mesures de la tension et du courant le 26 Mai 2024 à 11h15 utilisant un panneau type Suntech 80 dont les caractéristiques sont sur le tableau (II.1). Les résultats comparés avec ceux déjà obtenus en simulation sont illustrés sur les figures (II.10) (II.11) qui suit :

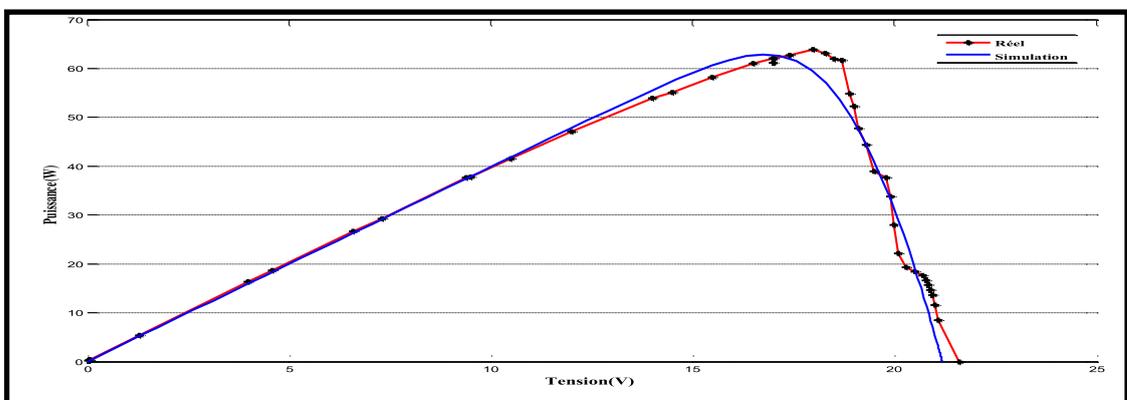
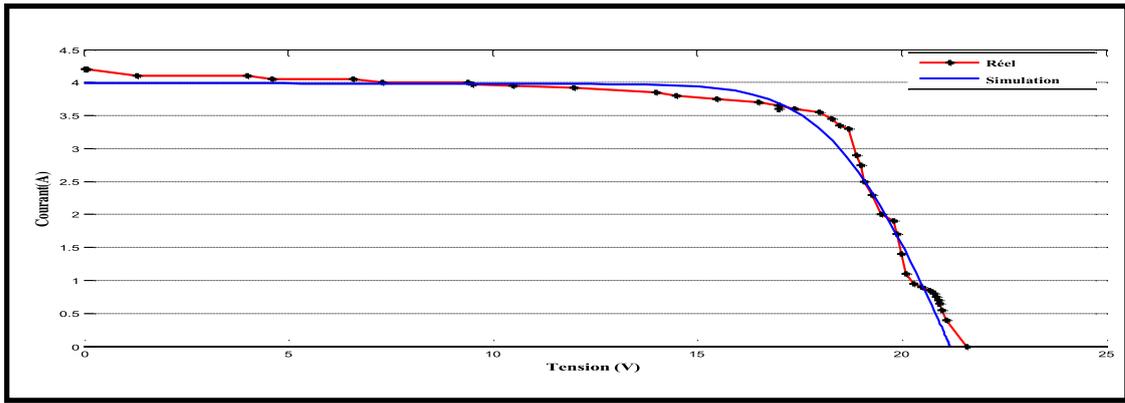


Figure II. 10: comparaison de la caractéristique de la puissance



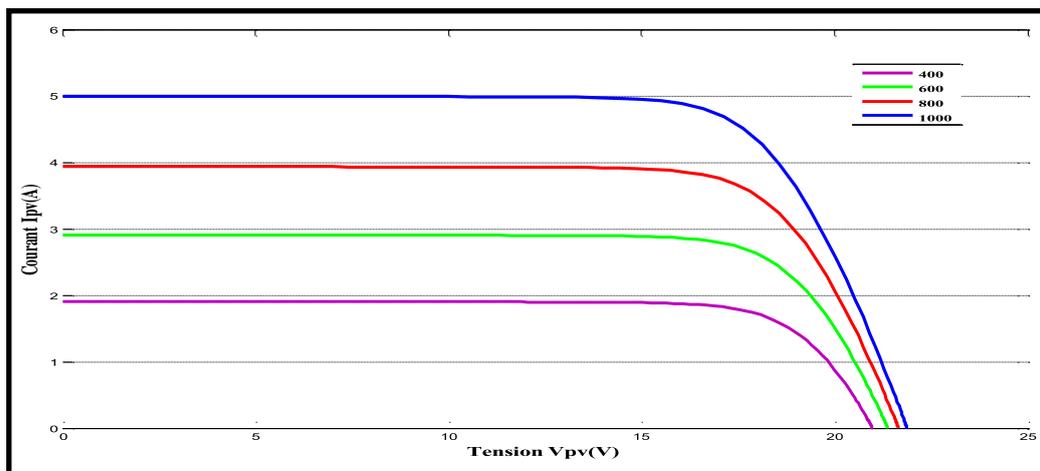
**Figure II. 11** : comparaison de la caractéristique du courant

## **II.8 Influence des paramètres extérieurs sur les performances d'un GPV**

### **II.8.1.Effets de la variation de l'éclairement**

Les figures (II.12) (II.13) montrent les résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension du module photovoltaïque Suntech 80W pour plusieurs intensités de rayonnement solaire à une température constante de 25°C, montrent des tendances importantes. L'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire se traduit généralement par une augmentation du courant de sortie du module tels qu'ils sont directement proportionnels entre eux par contre la tension varie peu, ce qui entraîne une augmentation de la puissance de sortie maximale. Le point de puissance maximale (MPP) du module se déplace le long de la courbe P-V en fonction de l'intensité du rayonnement solaire.

Ces résultats soulignent l'importance de comprendre comment la luminosité affecte les performances des panneaux solaires pour optimiser leur utilisation dans diverses conditions d'éclairement.



**Figure II. 12** : Simulation de l'influence de l'éclairement sur le courant par rapport à la tension du GPV sur Matlab/Simulink.

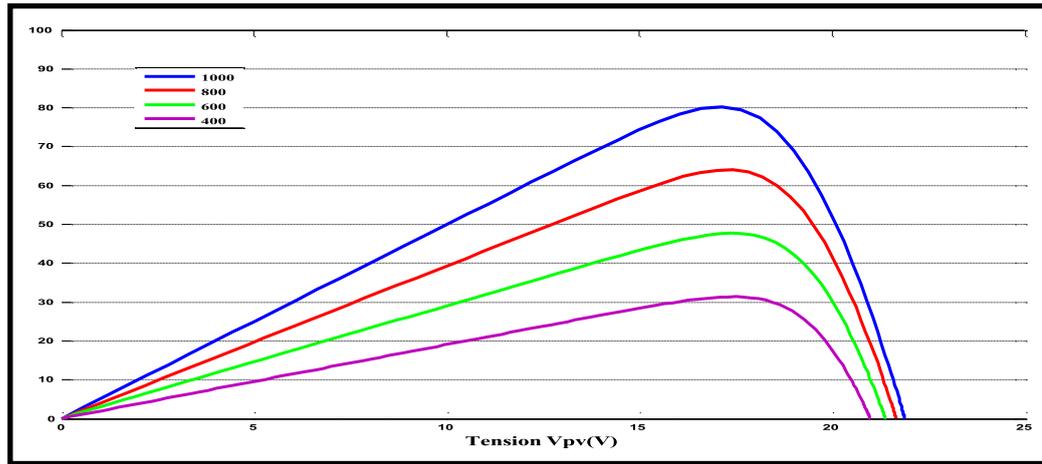


Figure II. 13 : Simulation de l'influence de l'éclairement sur la puissance par rapport à la tension du PV sur Matlab/Simulink.

### II.8.2. Effets de la variation de la température

Les figures (II.14) (II.15) montrent les résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension et Puissance-Tension du module photovoltaïque Suntech 80W pour plusieurs variations de température à une intensité de rayonnement solaire constante de  $1000 \text{ W/m}^2$ , démontrent des tendances importantes. La diminution de la tension de sortie du module avec l'augmentation de la température est observée, conformément aux standards des panneaux solaires, tandis que le courant de sortie augmente légèrement.

Cela se traduit par une diminution de la puissance de sortie maximale du module, principalement due à la réduction de la tension de sortie. Le déplacement du point de puissance maximale (MPP) vers des tensions plus basses à mesure que la température augmente est également noté. Ces résultats sont cruciaux pour les concepteurs de systèmes solaires, car ils fournissent des données essentielles pour optimiser les performances des installations photovoltaïques et prendre en compte les variations de température dans leur conception et leur fonctionnement.

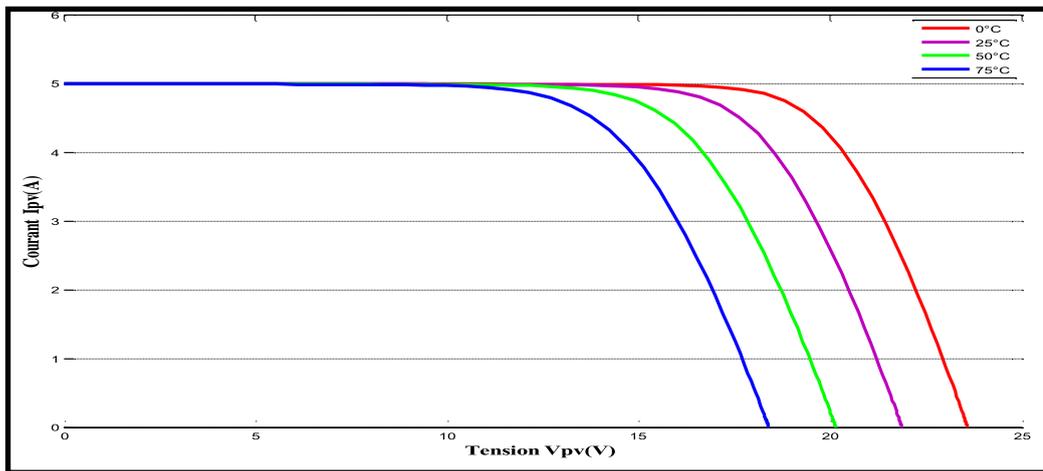


Figure II. 14: Simulation de l'influence de la température sur le courant par rapport à la tension du GPV sur Matlab/Simulink.

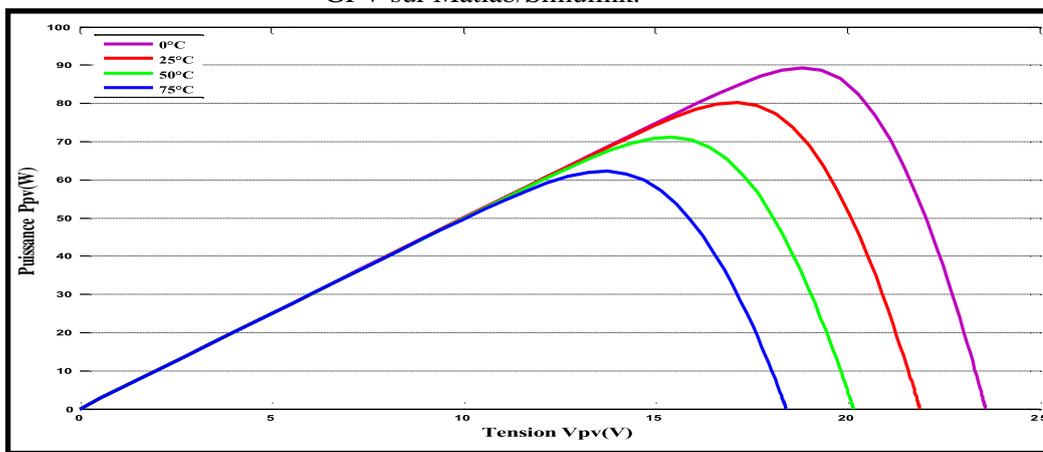


Figure II. 15 : Simulation de l'influence de la température sur la puissance par rapport à la tension Du GPV sur Matlab/Simulink.

## II.9 Influence des paramètres extérieurs sur la caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$

On a réalisé plusieurs essais où on a pris les mesures de la tension aux bornes  $V_{pv}$  du panneau et du courant de sortie  $I_{pv}$ , sur un panneau type Suntech 80 le 26 Mai 2024 à l'université A. MIRA Bejaia.

D'abord on a commencé avec un panneau propre qui est représenté sur la figure ( II.16). Ensuite on a réalisé un ombrage de (50,25,68) du panneau et on a fini avec de la salissure en mettant du sable représentant ainsi les différents phénomènes naturels (Ombrage, tempête de sable) qui peuvent influencer sur la production du panneau photovoltaïque.

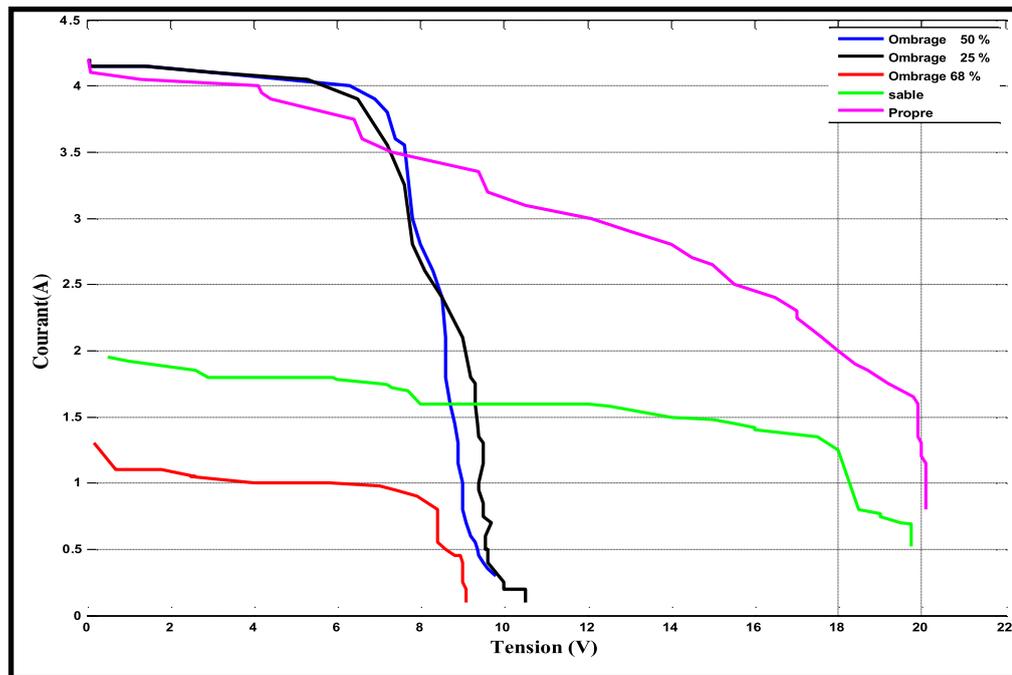


Figure II. 16 : Influence des paramètres extérieurs sur la caractéristique  $I_{pv}(V_{pv})$ .

➤ **Interprétation des résultats :**

D'après les courbes illustrées sur la figure (II.16) ,On déduit que les paramètres extérieurs impactent la production de l'énergie du panneau PV, plus le pourcentage de l'ombrage est grand plus le courant de court-circuit  $I_{cc}$  diminue. Ce phénomène s'explique par le faite que lorsque certaines cellules du panneau sont ombragées, le courant généré par celles-ci diminue entrainant une réduction du courant maximal du panneau.

On conclut donc que l'impact de l'ombrage sur un générateur photovoltaïque peut avoir des conséquences significatives sur sa performance globale. Même une ombre partielle sur un seul panneau peut influencer l'ensemble du système, entrainant une diminution notable de la production de l'énergie. Les cellules solaires affectées par l'ombre génèrent un courant réduit, ce qui se traduit par une baisse de la puissance produite par le générateur photovoltaïque dans son ensemble.

**II.10. Les convertisseurs statique DC/DC**

L'utilisation des convertisseurs DC-DC offre un contrôle flexible et efficace de la puissance électrique dans les circuits en courant continu. Dans les systèmes photovoltaïques, ces convertisseurs permettent d'atteindre et de maintenir le point de fonctionnement optimal. [16]

### II.10.1. Modélisation d'un hacheur survolteur (Boost)

Le hacheur survolteur (Boost) est un convertisseur statique du type DC/DC, situé entre le GPV et le reste du système photovoltaïque. Son rôle principal est de convertir la tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.

Il est constitué essentiellement dans le cas idéal de condensateurs, inductances, de commutateurs et d'une diode : des dispositifs qui ne consomment pas de puissance active ce qui nous permet d'avoir un bon rendement. [16] Son schéma de principe est représenté sur la figure (II.17) qui suit :

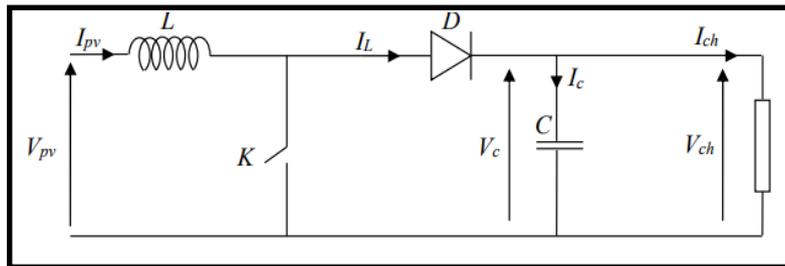


Figure II. 17 : Schéma de principe d'un hacheur survolteur.

Les figure (II.17) (II.18) illustrent le cycle de fonctionnement de période de hachage T d'un hacheur survolteur divisée en deux phases [16] :

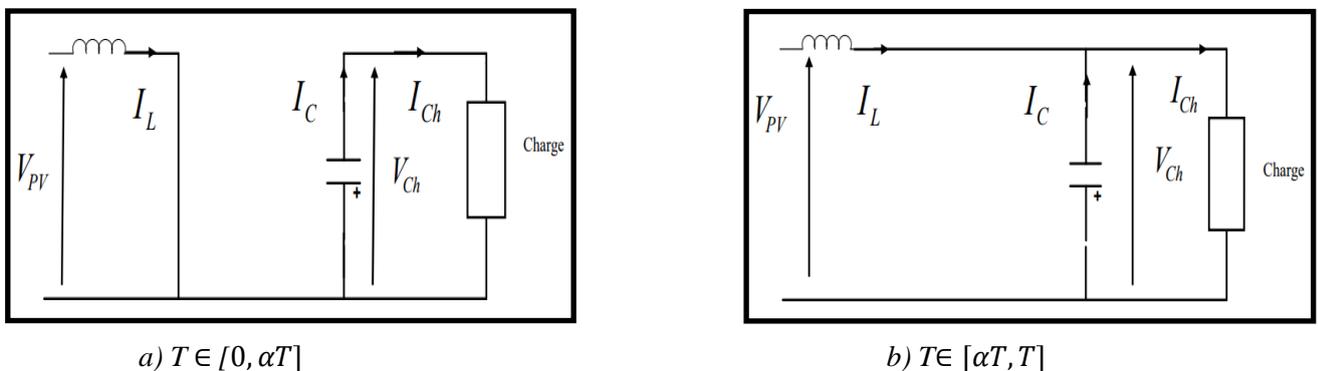


Figure II. 18 : Période du hachage du hacheur

- De  $\alpha$  jusqu'à  $T$  : l'interrupteur est fermé ( $k=1$ ) la diode est polarisée en inverse et donc bloquée ; Le rapport cyclique  $\alpha$  est compris entre 0 et 1. Le condensateur (C) est supposé initialement chargé, il fournit de l'énergie à la charge et un courant ( $I_{CH}$ ) circule dans cette dernière. La tension aux bornes de l'inductance ( $V_L$ ) est égale à la tension aux bornes du GPV,  $V_L = V_{PV}$ .

- De  $\alpha T$  jusqu'à  $T$  : L'interrupteur est ouvert ( $K=0$ ) la diode est donc passante. La tension aux bornes de l'inductance  $V_L$  vaut  $V_L = V_{PV} - V_{ch}$ . Le condensateur est chargé au même temps par le courant

stocké dans l'inductance et par le générateur [17].

Les équations électriques d'hacheur boosté sont les suivantes :

$$V_{PV} = L \frac{dI_L}{dt} + (1 - \alpha) V_{ch} \tag{II.15}$$

$$(1 - \alpha) I_L = C \frac{dV_{CH}}{dt} + I_{ch} \tag{II.16}$$

En valeur moyenne la tension et le courant de charge en fonction du rapport cyclique sont exprimés par les équations (II.17) (II.18) :

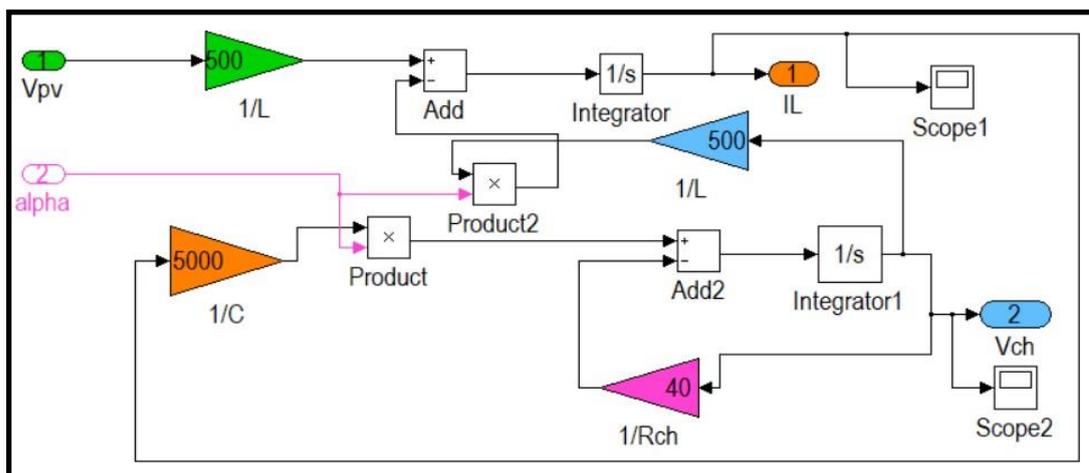
$$V_{ch} = \frac{1}{(1-\alpha)} V_{PV} \tag{II.17}$$

$$I_{CH} = (1 - \alpha) I_L = (1 - \alpha) I_{PV} \tag{II.18}$$

On conclut donc que le hacheur survolteur est un abaisseur de courant.

**II.10.2. Schéma bloc d'hacheur survolteur sur MATLAB/SIMULINK**

Sur l'espace Matlab/Simulink on a réalisé le bloc de simulation d'un hacheur survolteur qui est représenté sur la figure( II.19)



**Figure II. 19 :** Schéma bloc sur MATLAB/Simulink d'un hacheur survolteur.

II.10. Modélisation de la batterie

Il existe plusieurs types de batteries au plomb, chacun avec ses propres caractéristiques et défis lors de leur utilisation. La complexité de leur mise en œuvre réside dans la prise en compte de multiples paramètres. Étant donné que les batteries réagissent différemment selon les applications et les contraintes, il n'existe pas de modèle universel qui soit précis dans toutes les situations. Pour éviter une complexité excessive, on se tourne souvent vers le modèle R-C, également appelé modèle simple.

Contrairement à d'autres modèles couramment utilisés, le modèle R-C ne nécessite pas l'identification de paramètres empiriques à partir d'expériences.

De plus, il permet de choisir un simulateur à pas fixe, ce qui est adapté à la période de découpage des convertisseurs.

Le modèle R-C comprend une tension à vide  $E_0$  qui représente la tension de la batterie sans charge, un condensateur qui simule la capacité interne de la batterie ( $C_{bat}$ ), et une résistance interne ( $R_s$ )[18].

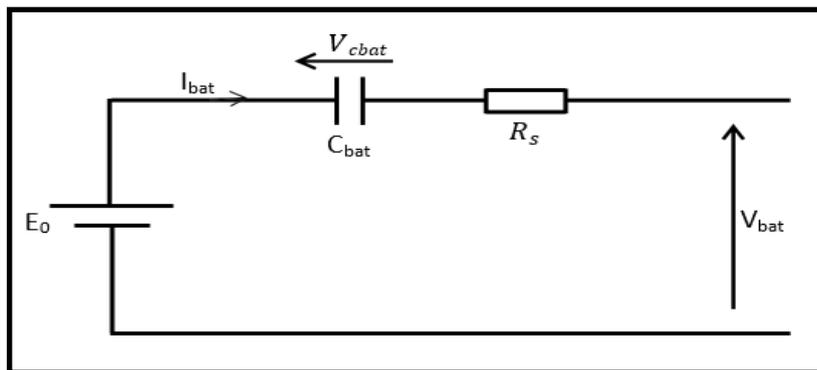


Figure II. 20 : Modèle R-C de la batterie

On a donc :

$$V_{bat} = E_0 - R_s \cdot I_{bat} - V_{Cbat} \tag{II.19}$$

On définit également l'état décharge(EDC)de la batterie par :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \int I dt \tag{II.20}$$

Avec :

$C_{bat}$  la capacité (Ah) nominale de la batterie et  $Q_d$  la quantité de charge manquante par rapport à  $C_{bat}$ .

## II.12 Conclusion

Il existe plusieurs modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, nous avons opté pour le modèle à une diode en raison de sa simplicité et son efficacité de conversion. Dans ce chapitre, nous avons modélisé le générateur PV et présenté les résultats de caractérisation obtenus sur la plateforme Matlab/Simulink, ainsi que l'influence des conditions climatiques sur les performances de notre système.

Le convertisseur statique de type DC/DC joue un rôle crucial dans la chaîne de conversion de l'énergie photovoltaïque. Cependant, il ne garantit pas que le générateur photovoltaïque fonctionne à sa puissance maximale. L'ajout d'une commande MPPT est donc indispensable pour un fonctionnement optimal.

Dans le prochain chapitre, nous explorerons les différentes méthodes de recherche et de poursuite du point de puissance maximale (MPPT), particulièrement la méthode de l'observation et perturbation(P&O) ainsi que la logique floue.

### **III.1 Introduction**

Comme démontré dans le chapitre précédent, les caractéristiques obtenues après la simulation du panneau photovoltaïque indiquent clairement que la puissance maximale générée varie en fonction de l'intensité de l'irradiation solaire et de la température ambiante. Pour cela on doit insérer entre le générateur et la charge un ensemble de structures de maximisation de la puissance (MPPT : Maximum Power Point Traking) permettant de fonctionner à tout moment au point de puissance maximal. Il existe plusieurs méthodes d'optimisation de la puissance parmi les plus utilisées on trouve la méthode perturbation et observation (P&O : Perturb and observe) qu'on verra détaillées dans ce chapitre.

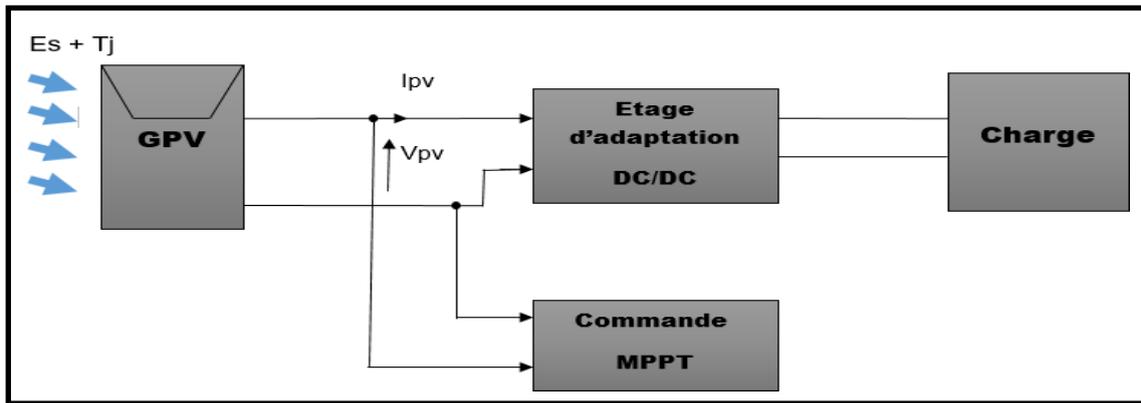
On s'intéressera également dans ce chapitre à la gestion de l'énergie photovoltaïque qui est tout aussi importante dans un système photovoltaïque. Pour optimiser la production et la consommation d'énergie solaire, la gestion nécessite d'envisager des solutions de stockage pour alimenter l'installation en électricité quand le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou mauvais temps) et fournir des puissances supérieures que celles du générateur.

### **III.2 Principe de recherche du point maximal**

Cette méthode permet au générateur PV de travailler à sa puissance maximale quel que soit les conditions météorologiques d'irradiations et de température. Un contrôleur MPPT permet donc de piloter le convertisseur statique reliant la charge et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge chaque instant [18].

### **III.3 La commande MPPT**

La commande MPPT est essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Son principe repose sur la variation automatique du rapport cyclique alpha ( $\alpha$ ), en l'ajustant à sa valeur optimale afin de maximiser la puissance délivrée par le panneau PV. Pour cette raison, nous allons présenter et étudier les algorithmes de commande les plus populaires. [19]



**Figure III. 1 :** Schéma de principe d'un système photovoltaïque avec la commande MPPT.

### III.3.1. Les commandes MPPT basées ; Algorithmes indirect

Le fonctionnement de ces commandes repose sur des relations de proportionnalité entre les paramètres optimaux caractérisant le point de puissance maximale ( $V_{max}$  et  $I_{max}$ ) et les paramètres caractéristiques du module PV ( $V_{oc}$ ,  $I_{cc}$ ). Selon le paramètre contrôlé, on parle de commande en régulation de courant ou de tension. [20]

### III.3.2. Algorithme à base de la mesure d'une fraction de la tension, $V_{oc}$

Cet algorithme consiste à comparer la tension du GPV ( $V_{pv}$ ) avec une tension de référence qui correspond à la tension optimale ( $V_{mp}$ ). L'erreur de tension est alors utilisée pour ajuster le rapport cyclique du hacheur, afin de faire coïncider les deux tensions. Il se base sur la relation linéaire entre la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) du panneau et la tension optimale ( $V_{mp}$ ) donnée par l'équation suivante : [20]

$$V_{mp} = k \times V_{co} \quad (\text{III.1})$$

Où  $k$  est un facteur de tension dépendant des caractéristiques de la cellule PV et qui varie entre 0.73 et 0.8.

### III.3.3. Algorithme à base de la mesure d'une fraction du courant $I_{cc}$ :

Cette technique est basée sur la relation linéaire entre le courant de court-circuit et le courant optimal donné par l'équation suivante :

$$I_{mp} = k \times I_{cc} \quad (\text{III.2})$$

Où  $K$  est un facteur de courant qui dépend des caractéristiques de la cellule PV et dont la valeur varie entre 0.85 et 0.92.

L'équation précédente montre que le courant ( $I_{mp}$ ) peut être déterminé par une mesure de ( $I_{cc}$ ) et que le PPM peut être atteint en appliquant un courant de référence égal à ( $I_{mp}$ ) à la régulation en courant du convertisseur. Cette commande comme la précédente bien qu'elles soient simples elles présentent des inconvénients tels que l'interruption de la production d'énergie, la perte d'efficacité et précision variable. [20]

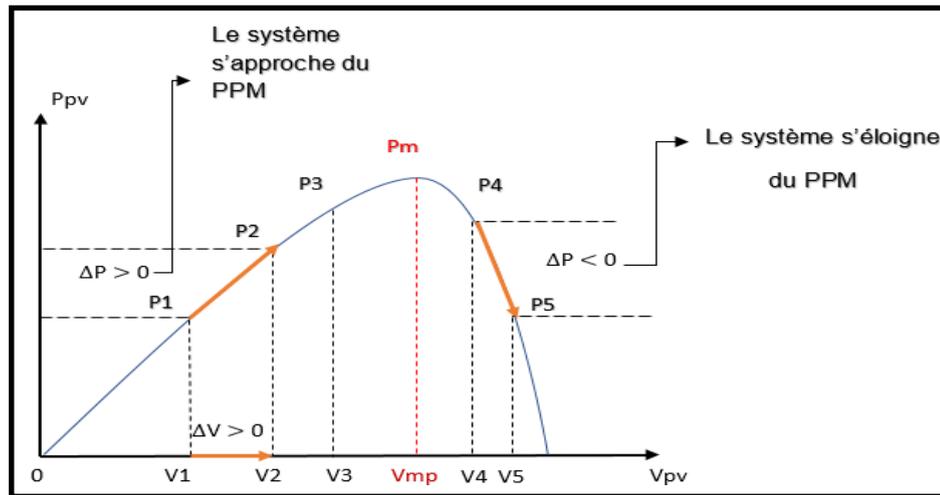
### III.4 Les commandes MPPT à algorithmes performants : Directs

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. La détermination de la valeur de la puissance du générateur PV est indispensable pour la recherche du MPP, qui se fait en multipliant les valeurs de la tension et du courant mesurées. Si la puissance de sortie est plus grande, alors la direction de recherche est maintenue pour l'étape suivante, sinon elle sera inversée.

#### III.4.1. Algorithme Perturber et observer, (P&O)

L'algorithme Perturb & Observe (P&O) est l'un des plus utilisés pour sa structure simple. C'est une méthode itérative permettant d'obtenir le MPP : elle 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.

Si l'incrément 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 PPM. Si au contraire la puissance décroît, celui-ci se trouve à droite du PPM et donc la nouvelle perturbation de la tension est réalisée dans le sens opposé pour reprendre la convergence vers le PPM. Le diagramme du suivi du PPM de la méthode Perturber et observer est représenté sur la figure (III.2) [21].



**Figure III. 2:** Diagramme schématisé de suivi de puissance de la méthode perturbation et d'observation P&O.

Le tableau suivant résume la démarche de cette méthode :

**Tableau III. 1:** Résumé de l'algorithme P&O

Perturbation	Changement de la puissance	Perturbation suivante
Positive	Positif	Positive
Positive	Négatif	Négative
Négative	Positif	Négative
Négative	Négatif	Positive

La méthode P&O est largement utilisée en raison de sa facilité d'implémentation. Cependant, elle présente quelques inconvénients, notamment des oscillations autour du point de puissance maximale (PPM) en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM.

Ces oscillations peuvent être minimisées en réduisant la valeur de la variable de perturbation.

Ce type de commande est efficace par temps ensoleillé, lorsque le PPM évolue lentement et proportionnellement à l'ensoleillement. En revanche, lors de journées avec des variations fréquentes de l'irradiation, cette méthode engendre davantage de pertes, dues au temps de réponse nécessaire pour atteindre le nouveau PPM. La figure (III.3) montre un organigramme de fonctionnement de la méthode P&O :

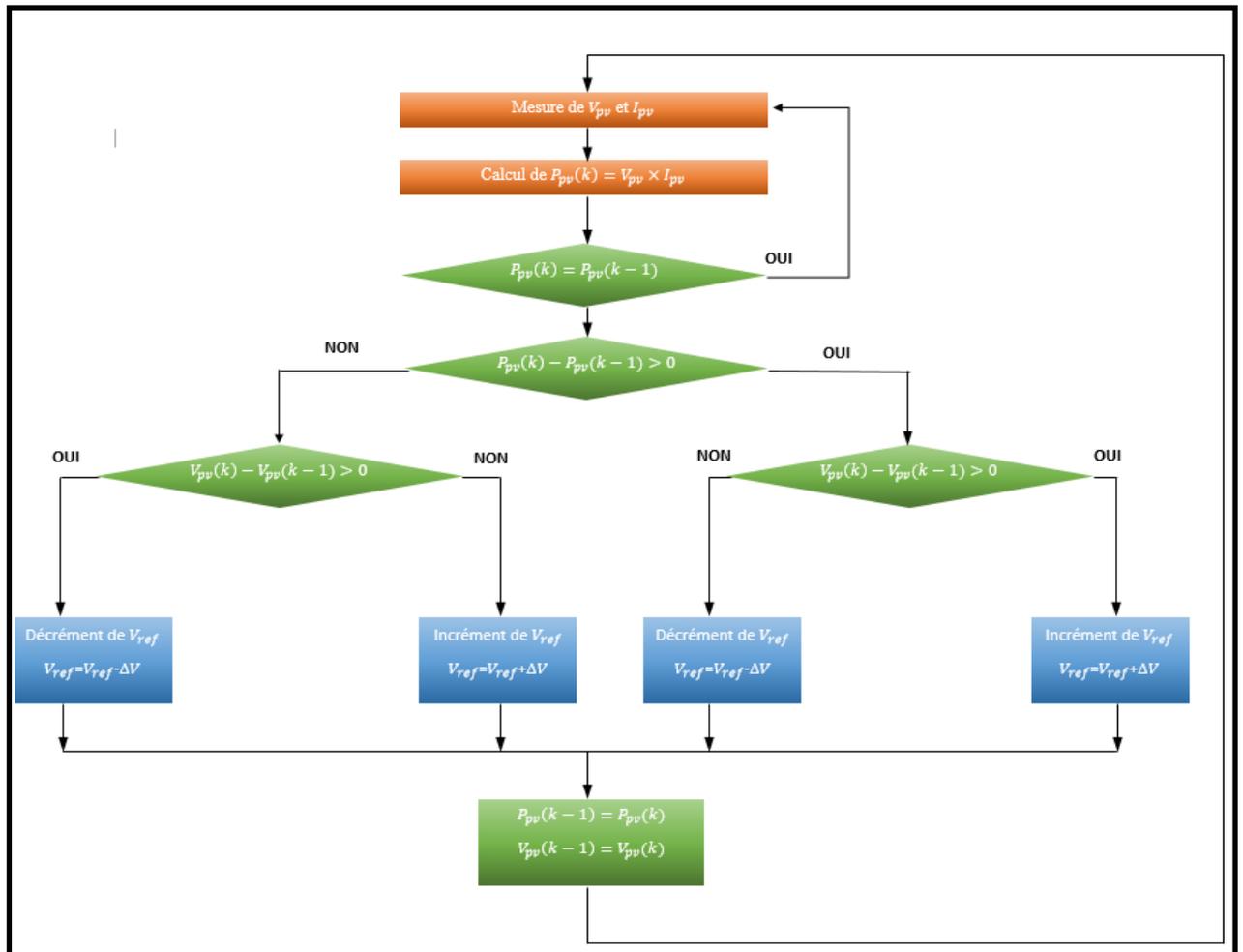


Figure III. 3: Organigramme de fonctionnement de la méthode P&O

### III.4.2. Simulation de la méthode P&O sur Matlab/Simulink

Nous présentons ci-dessous sur la figure (III.4) les résultats de simulation (sous Matlab/Simulink), du fonctionnement d'un panneau photovoltaïque de type Siemens SM110-24, avec l'application de l'algorithme P&O dans les conditions standards  $E_s = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$  :

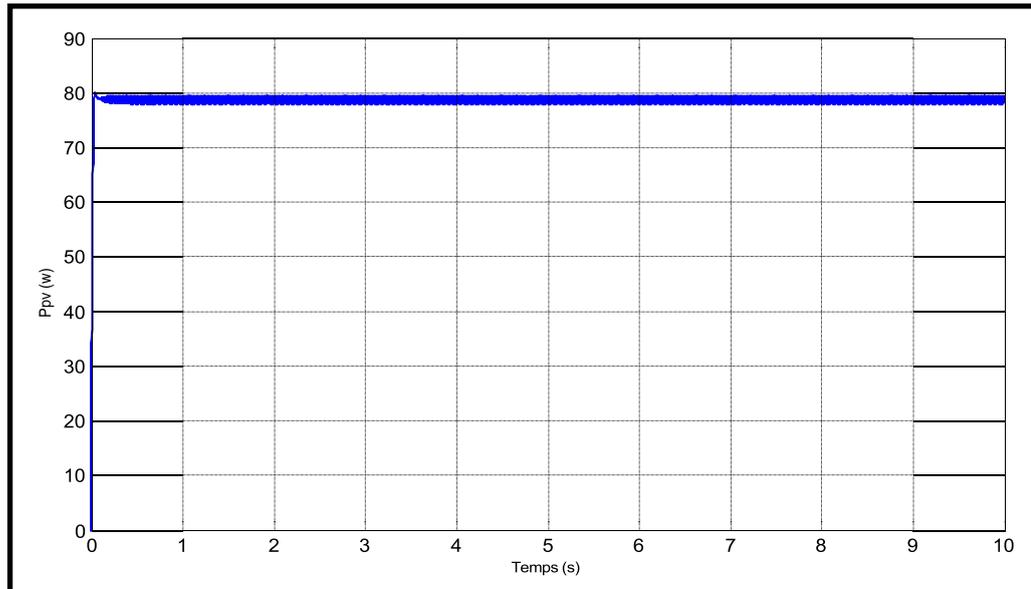


Figure III. 4: Allure de la puissance Ppv en fonction du temps

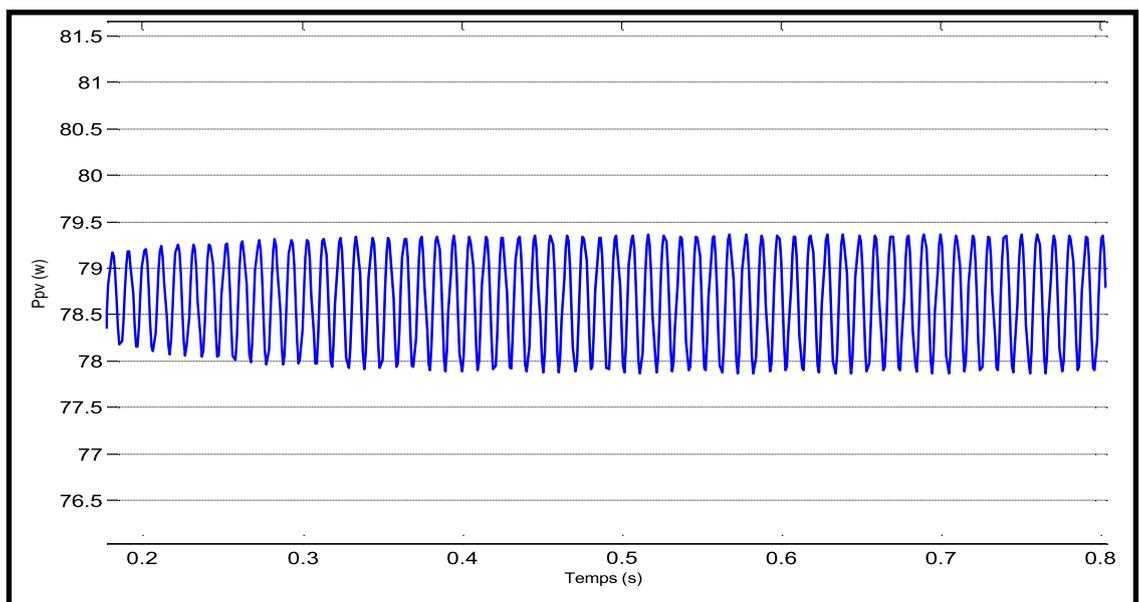
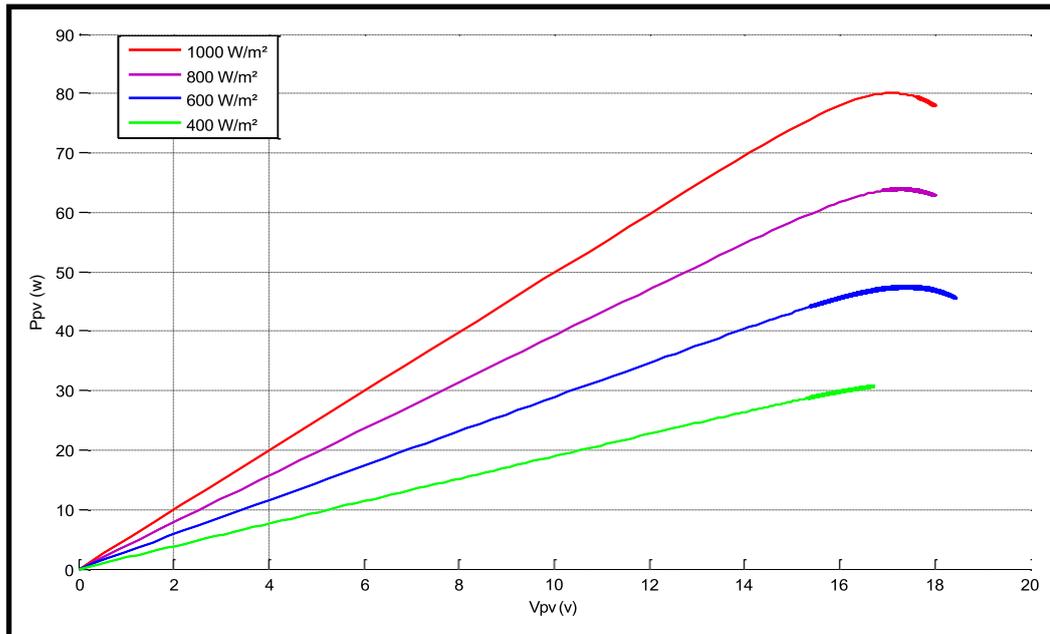


Figure III. 5: Zoom sur l'allure de la puissance Ppv.

Comme nous avons déjà expliqué précédemment, en cas de fluctuation rapide de l'ensoleillement l'algorithme de P&O diverge du point de puissance maximale. Même en cas de conditions d'exploitation constantes. Des variations de courants et de tension causent des oscillations autour du PPM qu'on peut observer sur la figure (III.5).

La figure (III.6) montre la caractéristique de la puissance en fonction de la tension sous différentes conditions d'ensoleillement maintenant la température ambiante constante ( $E_s=1000$  ;  $E_s=800$  ;  $E_s=600$  ;  $E_s=400$ ) et ( $T_a=25^\circ\text{C}$ )



**Figure III. 6:** Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique (P-V) Avec la commande P&O

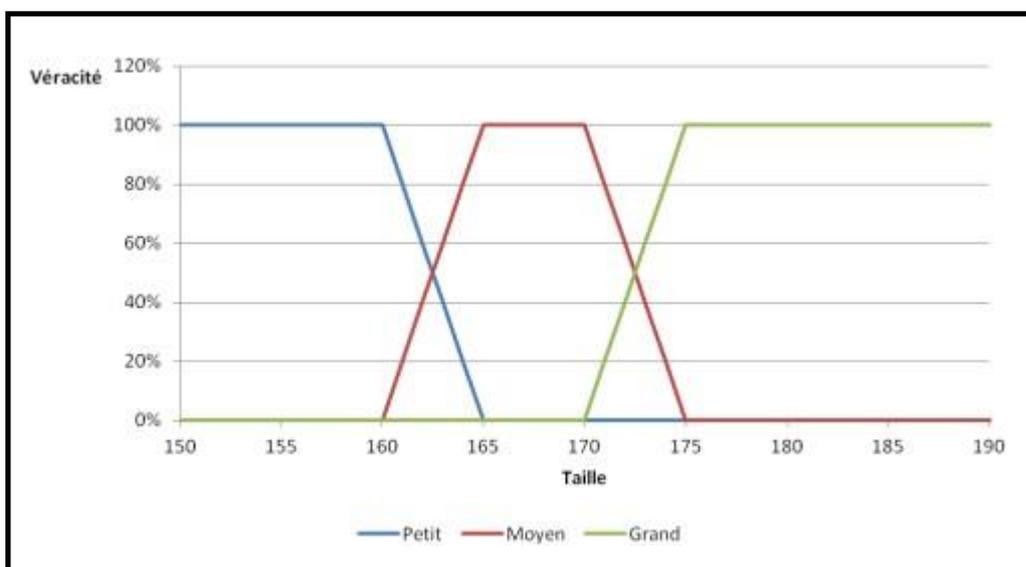
### III.4.3. Algorithme à base de la logique floue

La logique floue est une extension de la logique booléenne créée par Lotfi Zadeh en 1965 en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous. C'est une forme de logique qui traite des approximations plutôt que des raisonnements stricts et exacts. Contrairement à la logique traditionnelle, qui utilise des valeurs binaires de vrai ou faux, la logique floue permet des valeurs variables. Ceux-ci peuvent avoir différents degrés de vérité et de fausseté et peuvent être représentés par des variables linguistiques [18].

La logique floue confère une flexibilité très appréciable aux raisonnements qui l'utilisent, ce qui rend possible la prise en compte des imprécisions et des incertitudes. Un des intérêts de la logique floue est d'imiter le raisonnement humain, qui est souvent basé sur des jugements qualitatifs et approximatifs.

Prenons l'exemple de la hauteur d'une personne, elle peut être qualifiée de « petite », « moyenne » ou « grande », et chaque catégorie peut avoir des degrés de vérité contrairement à la logique classique qui admet seulement deux valeurs 0 ou 1. La classification pourrait se faire comme suit : une personne de hauteur dépassant les 180cm appartient à l'ensemble « grande » et toute personne de 165cm et moins est considérée appartenir à l'ensemble « petite » sans prendre en compte les hauteurs de personnes situées dans la zone « entre deux hauteurs : moyenne ».

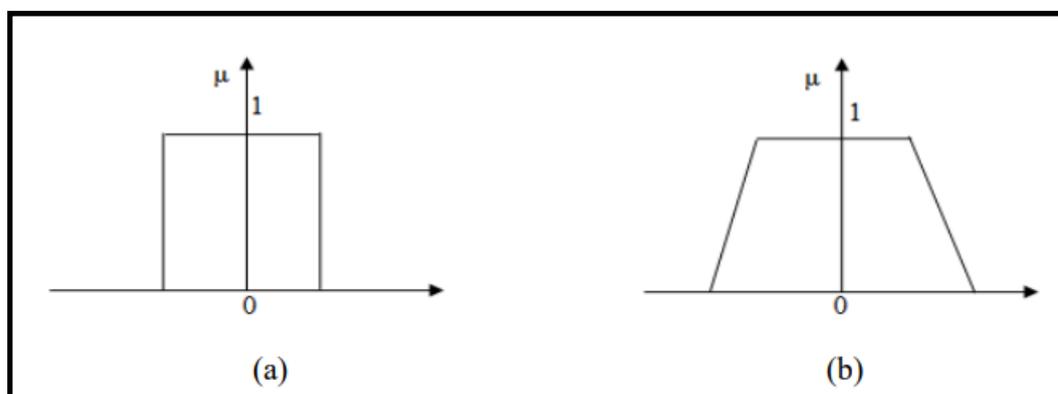
La logique floue, dont la fonction d'appartenance peut prendre n'importe quelle valeur entre 0 et 1, permet de tenir compte de cette réalité. Ainsi, elle offre une classification progressive plutôt que des limites soudaines. Par exemple, un individu mesurant 162 cm peut être considéré comme « petit » à 60 % et « moyen » à 40 %. Le graphique de véracité correspondant illustre cette gradation, démontrant comment la logique floue permet une évaluation plus nuancée et flexible des caractéristiques [22].



**Figure III. 7 :** Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique (P-V) de l'algorithme P&O

### III.4.1.a Les ensembles flous

Si on désigne par F un ensemble flou dans un univers de discours U, cet ensemble flou est caractérisé par une fonction d'appartenance  $\mu_F$  qui prend des valeurs entre 0 et 1 à la différence pour l'ensemble booléen qui prend deux valeurs 0 ou 1 [18].



**Figure III. 8:** Fonction d'appartenance pour la logique booléenne (a), la logique floue (b)

Pour la logique floue, la fonction d'appartenance peut être écrite sous la forme : [18]

$$\left[ \begin{array}{l} \mu_F : U \rightarrow [0 \ 1] \\ F = \{(u, \mu_F(u)), u \in U\} \end{array} \right. \quad \text{(III.3)}$$

On peut avoir une autre forme de F comme :

$$\left[ \begin{array}{l} F = \int_u \frac{\mu_F(u)}{u} \text{ si } \mathbf{u} \text{ est continu} \\ F = \int_{i=1}^n \mu_F(u_i) \quad \text{si } \mathbf{u} \text{ est discret} \end{array} \right. \quad \text{(III.4)}$$

### III.4.2.b Les fonctions d'appartenance

La fonction d'appartenance est un moyen d'exprimer graphiquement le niveau de participation des entrées, elle attribue une valeur aux entrées qui peuvent également servir de chevauchements fonctionnels entre les entrées. La fonction d'appartenance peut prendre plusieurs formes, parmi les plus utilisées on trouve [24] :

- **Fonction triangulaire** : elle est définie par trois paramètres {a, b, c}

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

- **Fonction trapézoïdale** : elle est définie par quatre paramètres [a, b, c, d]

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad \text{(III.6)}$$

- **Fonction Gaussienne** : elle est définie par deux paramètres {a, x<sub>0</sub>}

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2a}\right) \quad \text{(III.7)}$$

- **Fonction cloche** : elle est définie par deux paramètres {a, x<sub>0</sub>}

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \frac{(x-x_0)^2}{a}} \quad \text{(III.8)}$$

- **Fonction Sigmoidale** : elle est définie par deux paramètres {a, c} :

$\mu$

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(a + (x - c))} \quad (III.9)$$

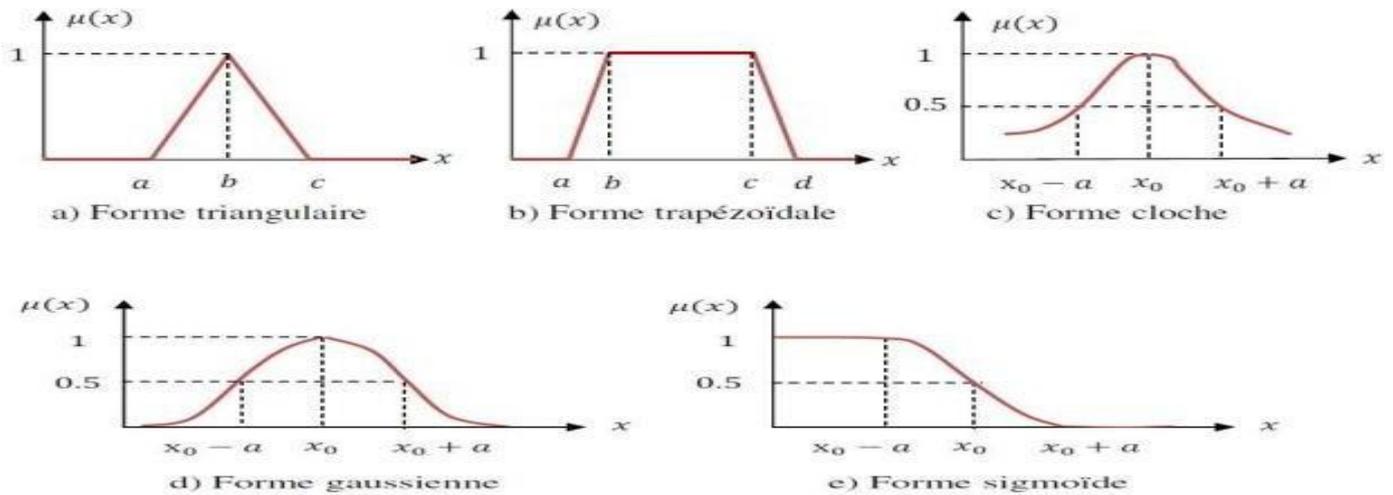


Figure III. 9: formes des fonctions d'appartenance

Les sous-ensembles flous possèdent quelques propriétés comme le support, le noyau et la hauteur :

- **La hauteur** :  $H(x) = \text{Sup}_{x \in U}(\mu_A(x))$  de la fonction d'appartenance, un sous -ensemble flou est dit normalisé s'il est de hauteur 1.
- **Le noyau** :  $N(x) = \{x | \mu_A(x) = 1\}$  est l'ensemble des éléments qui appartiennent totalement à A, pour les fonctions de type triangulaire, le noyau est un singleton qui est appelé aussi valeur modale
- **Le support** :  $S(A) = \{x | \mu_A(x) \neq 1\}$  cet ensemble décrit l'ensemble des éléments qui sont partiellement dans A.

### III.4.2.c. Les opérateurs de la logique floue

#### ➤ Opérateur ET (intersection floue) :

L'opérateur ET correspond à l'intersection de deux ensembles A et B. Dans le cas de la logique floue, l'opérateur ET est réalisé dans la plupart des cas par la fonction du minimum, qui est appliquée aux fonctions d'appartenance  $\mu_A(x)$  et  $\mu_B(x)$  des ensembles A et B (voir figure III.8) [28]:

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$$

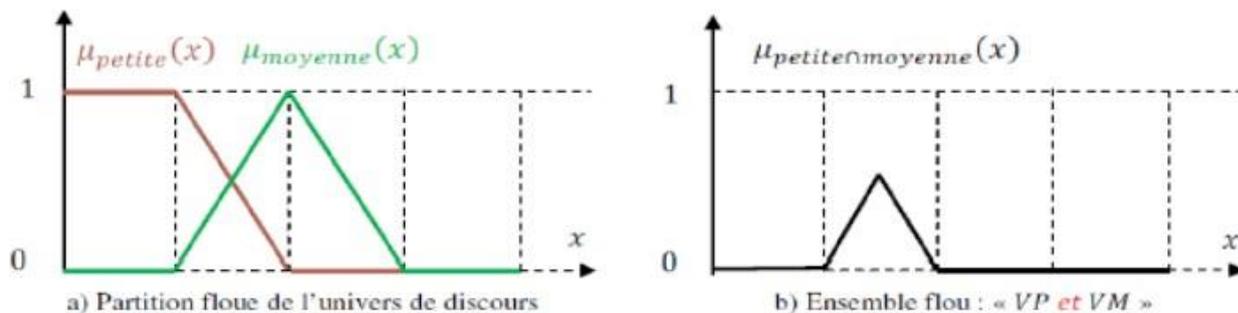


Figure III. 10: Intersection des sous-ensembles flous

➤ **Opérateur OU (Union floue)**

L'opérateur ou correspond à l'union de deux ensemble A et B. Dans le cas de la logique floue, l'opérateur OU souvent par la fonction du maximum, qui est appliquée aux fonctions d'appartenance  $\mu_A(x)$  et  $\mu_B(x)$  des ensembles A et B (voir figure III.9) :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}$$

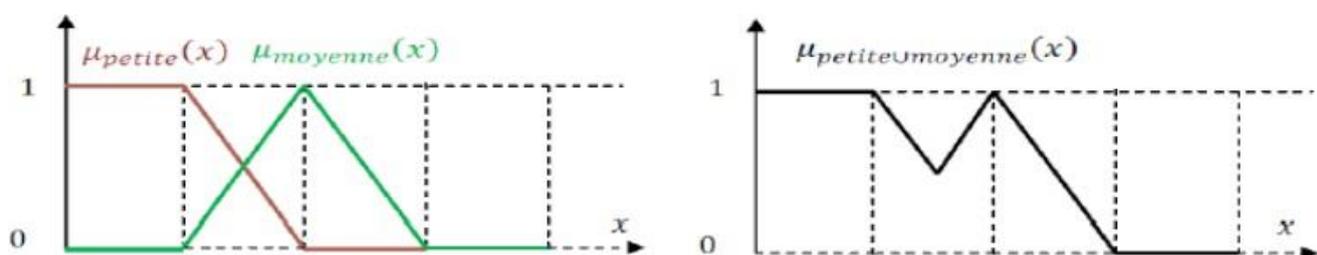


Figure III. 11 : Union des sous-ensembles flous

➤ **Opérateur NON (complément) :**

L'opérateur logique correspondant au complément d'un ensemble est la négation :

$$\bar{\mu}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

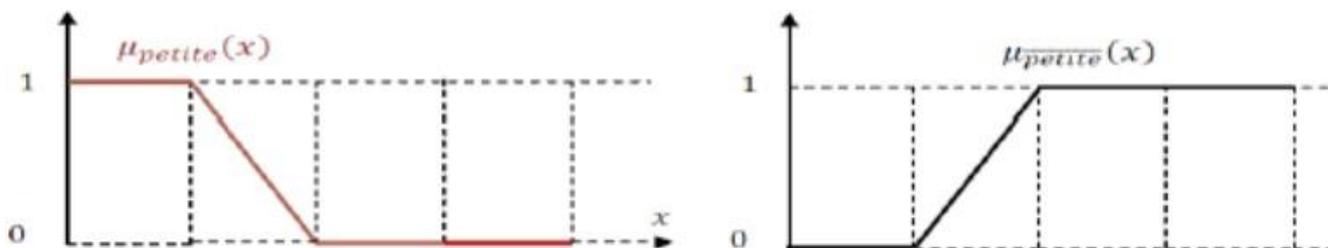


Figure III. 12: Illustration de l'opérateur NON

#### III.4.2.d . Structure d'un contrôleur flou

Le schéma synoptique général d'un système flou est illustré par la figure (III-11). Quel que soit le type d'application, on retrouve généralement la même configuration répartie en quatre blocs :

- Une interface de fuzzification à l'entrée.
- Une base de règles.
- Un mécanisme d'inférence.
- Une interface de fuzzification à la sortie.

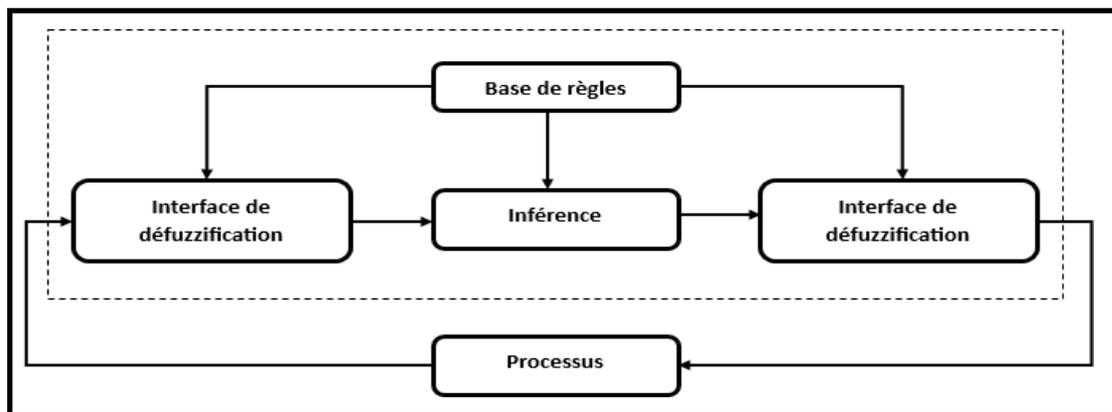


Figure III. 13: Structure de base d'un contrôleur flou

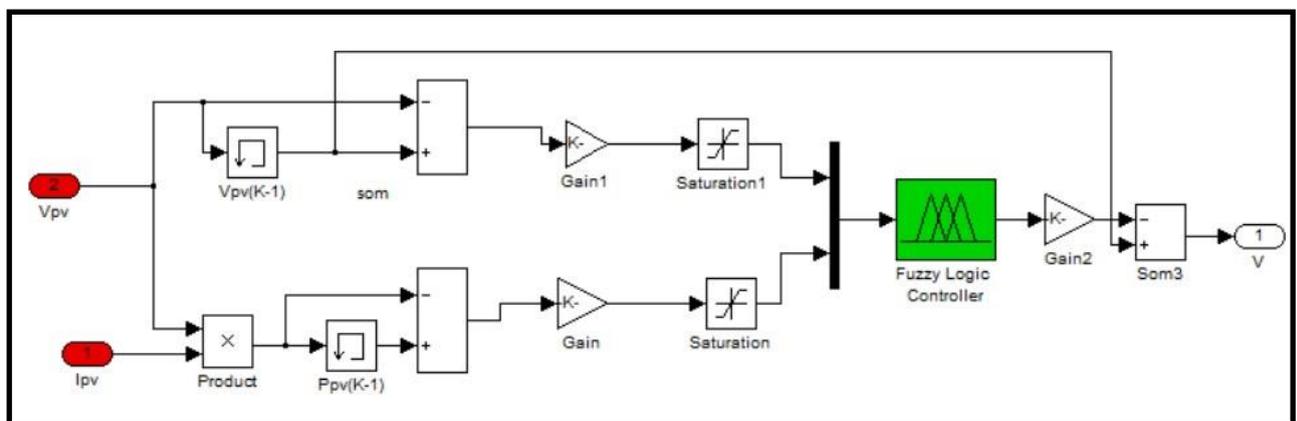
Cette commande est basée sur deux variables d'entrées qui sont l'erreur  $E$  et le changement d'erreur  $\Delta E$  et une variable de sortie  $\Delta \alpha$  (variation du rapport cyclique). La valeur de la variable de sortie, qui pilote le convertisseur statique pour rechercher le PPM, est déterminée à l'aide d'une table de vérité et de l'évolution des paramètres d'entrée. Le fonctionnement de cet algorithme se fait en trois étapes [26] :

- **La fuzzification** : La fuzzification permet la conversion des variables physiques d'entrée en ensembles flous. Durant cette étape, les variables d'entrées numériques sont converties en variable linguistique pouvant prendre les valeurs suivantes : NG (Négative Grand), NM (Négative Moyen), NP (Négative Petit), Z (Zéro), PP (Positive Petit), PM (Positive Moyen) et PG (Positive Grand).
- **L'inférence** : Les méthodes d'inférences permettent la réalisation des différents opérateurs ET, OU, ALORS... intervenant dans les règles d'inférences et s'appliquant aux fonctions d'appartenances. Les trois méthodes d'inférence les plus usuelles sont :
  - Méthode d'inférence Max - Min de MAMDANI ;
  - Méthode d'inférence Max - Prod de LARSEN ;
  - Méthode d'inférence Somme - Prod de ZADAH.

- **La défuzzification** : La défuzzification a pour but de transformer les valeurs de la sortie situées dans l'univers du discours en valeurs réelles comprises dans le domaine de variation. Cette étape ne s'applique qu'à la variable de sortie  $\Delta\alpha$ . Durant cette étape,  $\Delta\alpha$  sera convertir d'une variable linguistique à une variable numérique afin de pouvoir piloter le convertisseur de puissance pour atteindre le PPM.

### III.5 Application d'un contrôleur flou sur le système PV

Dans le but d'améliorer la précision en minimisant les oscillations autour du PPM dans les résultats obtenus avec la commande P&O et afin de réduire le temps réponse, nous introduisons un contrôleur flou dans notre programme. La figure (III.12) représente le bloc de simulation sur (Matlab/Simulink) d'un contrôleur flou :



**Figure III. 14:** Bloc de simulation d'un contrôleur flou

Comme entrées le contrôleur flou reçoit la variation de la puissance et de la tension du générateur photovoltaïque  $\Delta Ppv$  et  $\Delta Vpv$  tels que :

$$\Delta Ppv = Ppv(k) - Ppv(k-1)$$

$$\Delta Vpv = Vpv(k) - Vpv(k-1)$$

Pour la sortie le contrôleur flou détermine l'incrément optimal qui doit être ajouté à la tension de fonctionnement pour extraire le point de puissance maximal, cette sortie est utilisée pour calculer le rapport cyclique du convertisseur DC/DC. [9]

$$\Delta V_{pv,ref} = V_{pv,ref}(k) - V_{pv,ref}(k-1)$$

Pour le réglage de la logique floue, on a utilisé la méthode MAX-MIN (Méthode de Mamdani)

La base des règles est résumée dans le tableau (III.2) :

**Tableau III. 2:** Table de règles de décisions à 7 classes

$\Delta V \backslash \Delta P$	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
NG	PG	PG	PM	Z	NM	NG	NG
NM	PG	PM	PP	Z	NP	NM	NG
NP	PM	PP	PP	Z	NP	NP	NM
Z	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
PP	NM	NP	NP	Z	PP	PP	PM
PM	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
PG	NG	NG	NM	Z	PM	PG	PG

Les règles de contrôle floues sont dérivées en analysant le comportement du système. Différentes conditions de fonctionnement sont prises en compte pour améliorer les performances de suivi, tant en termes de réponse dynamique que de robustesse. Pour illustrer comment les règles de contrôle floues fonctionnent dans notre système, nous examinerons deux exemples d'incrémentation de la variable alpha ( $\alpha$ ). Dans notre cas, l'univers de discours est découpé en sept classes : NG(négatif grand), NM (négatif moyen), NP (négatif petit), Z (environ zéro), PP (positif petit), PM (positif moyen) et PG (positif grand) :

**Exemple 1 :**

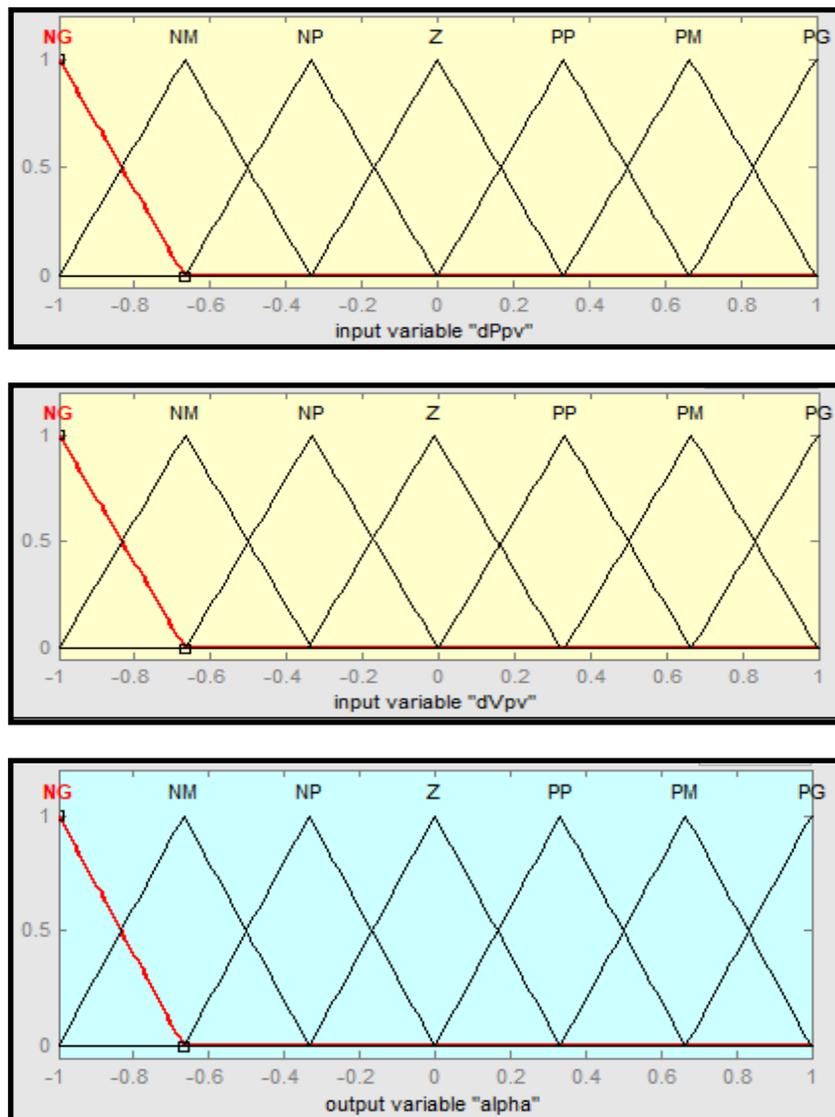
Si la variation de la puissance est négative et grande (GN) et que la variation de la tension est positive et grande (GP), cela signifie que nous avons une grande diminution de puissance avec une grande augmentation de tension.

- Règle : **Si**  $\Delta P$  est GN et  $\Delta V$  est GP, **alors**  $\Delta\alpha$  est GN
- Interprétation : Diminuer  $\alpha$  de manière significative pour corriger la grande perte de puissance avec l'augmentation de tension.

**Exemple 2 :**

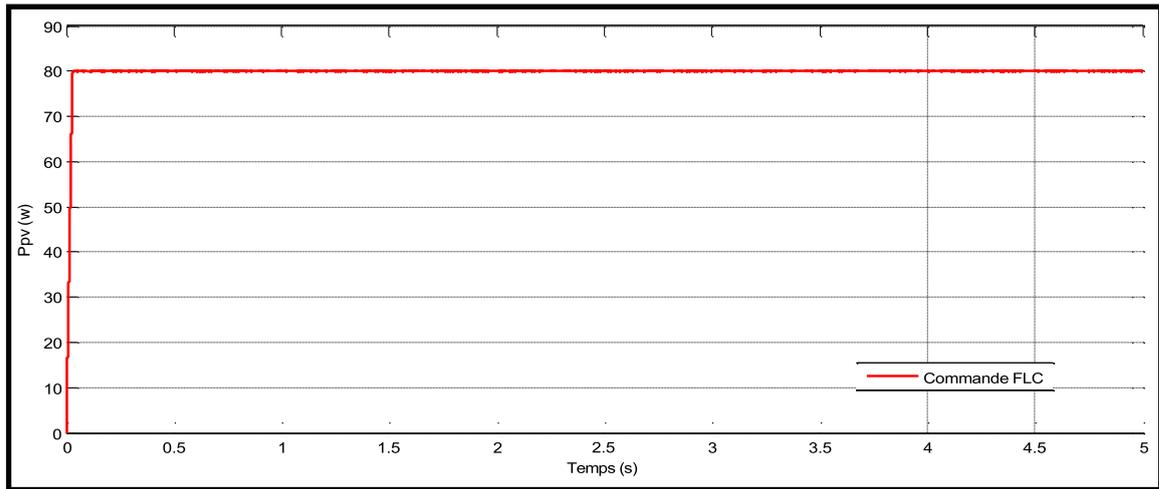
- Règle : Si  $\Delta P$  est ZE et  $\Delta V$  est ZE, alors  $\Delta \alpha$  est ZE
- Interprétation : Aucun changement ou un changement minimal de alpha ( $\alpha$ ) est nécessaire pour maintenir la stabilité autour du point de puissance maximal.

Les fonctions d'appartenance utilisées dans le cas de notre contrôleur flou, sont de types triangulaire pour les entrées ainsi que pour les sorties. Ces fonctions sont représentées sur la figure III.13 :

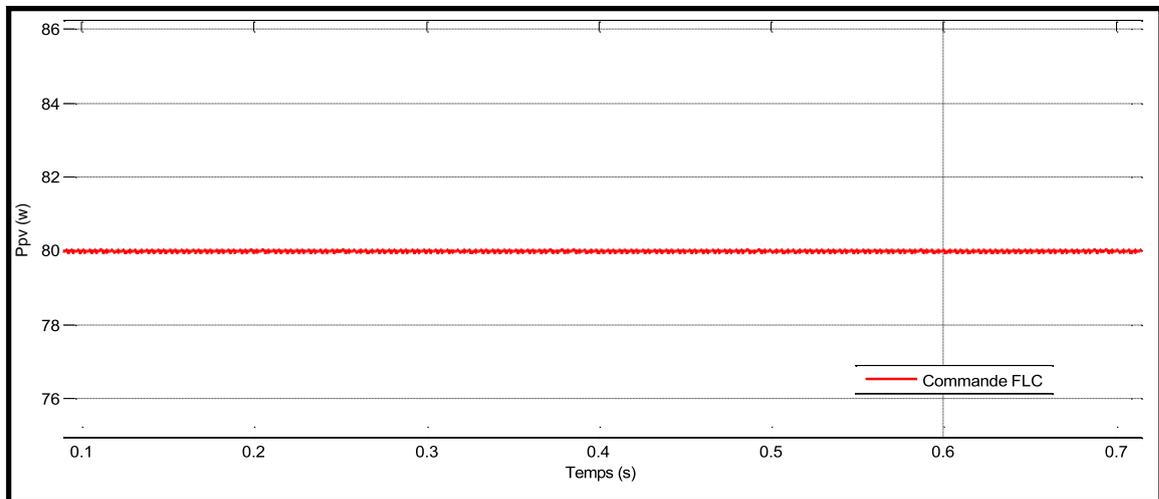


**Figure III. 15:** Fonctions d'appartenance du contrôleur flou

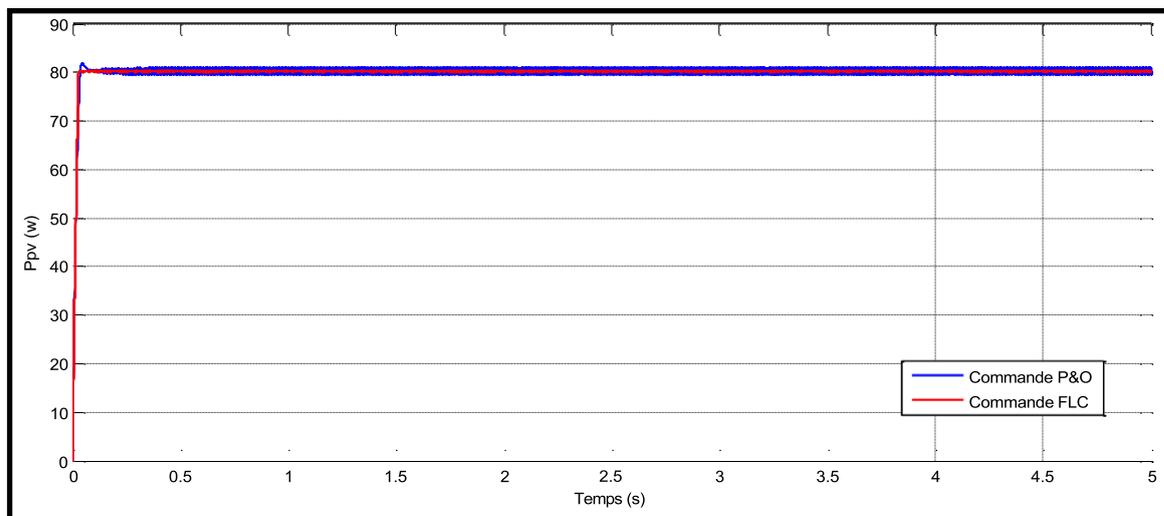
Les figures (16,17,18,19) montrent les résultats de simulation de l'algorithme de la logique floue pour un panneau de type Siemens Suntech 80, dans les conditions STC ( $E_s=1000W/m^2$  et  $T=25^\circ$  :



**Figure III. 16:** Allure de la puissance photovoltaïque par la commande FLC



**Figure III. 17:** Zoom de L'allure de la puissance photovoltaïque en régime permanent avec la



**Figure III. 18 :** Allure de la puissance photovoltaïque (commande P&O et FLC)

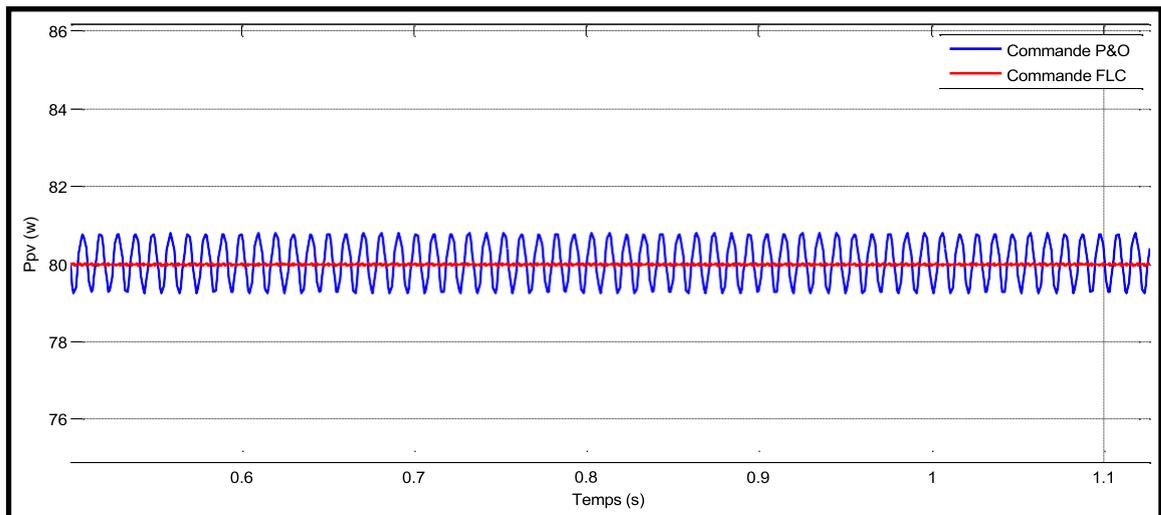


Figure III. 19 : Allure de la puissance photovoltaïque (commande P&O et FLC)

### III.6. Gestion de l'énergie

Dans les systèmes réels, la gestion de l'énergie produite et consommée par les différents composants au cours de leurs fonctionnements est généralement assurée par un composant central, auquel les appareils sont connectés via divers convertisseurs. Des algorithmes de gestion de l'énergie y sont implémentés permettant d'assurer l'autonomie du système. La figure ci-dessous montre le schéma synoptique pour le système de supervision de l'énergie photovoltaïque. En utilisant [10]:

- Hacheur série contrôlé pour un fonctionnement à puissance maximale.
- Hacheur série-parallèle (Buck-boost) pour contrôler l'énergie stocker ou extraite dans les batteries.
- Un onduleur pour alimenter la charge.
- Un superviseur qui permet d'actionner les interrupteurs S1, S2, S3 et S4 en fonction de la puissance produite et consommée

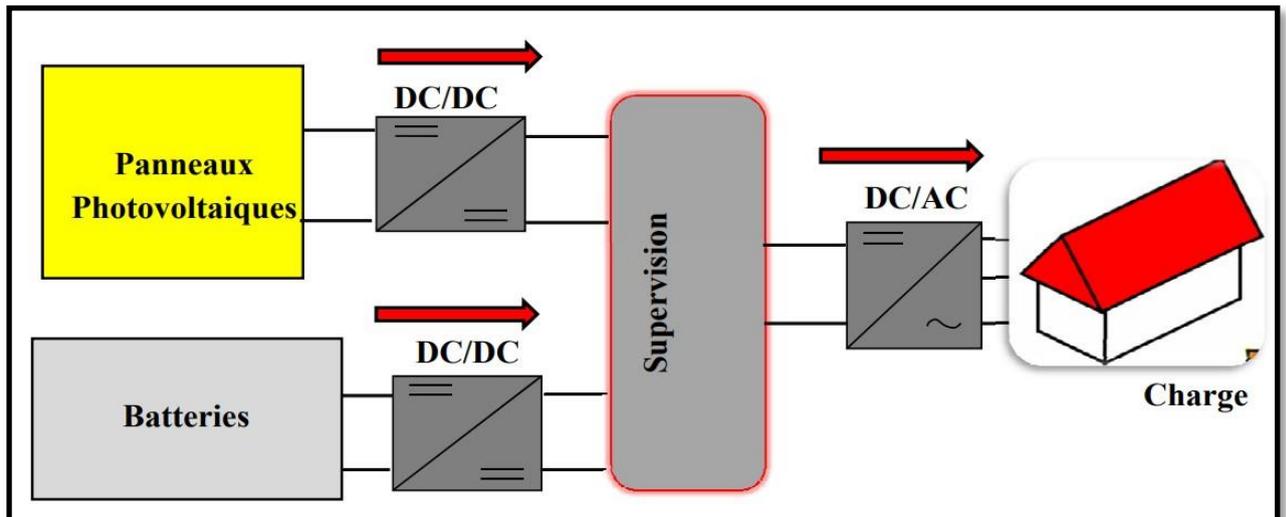


Figure III. 20: Chaîne de conversion de l'énergie solaire[10]

### III.6.1. Organigramme de la gestion des puissances

L'objectif de cette gestion est d'extraire l'énergie demandée tout en optimisant le transfert d'énergie vers la charge, en tenant compte du profil de charge, de l'état de charge et de décharge des batteries à chaque instant et de la disponibilité de l'énergie PV. La puissance disponible  $P_{disp}$  est calculée selon l'équation (III.5).

On compare entre la puissance produite par les panneaux photovoltaïque ( $P_{pv}$ ) et la puissance consommée par la charge ( $P_{ch}$ ). Si la puissance disponible est positive, notre charge est alimentée et les batteries sont mises en état de charge jusqu'à ce qu'elles atteignent un état de charge maximal ( $EDC_{max}$ ) puis elles se déconnectent.

Si  $P_{disp}$  est négative, alors la charge est compensée par l'énergie de décharge des batteries jusqu'à ce qu'elles atteignent un état de charge minimal ( $EDC_{min}$ ) puis elles se déconnectent. Dans le cas  $P_{disp}$  est nulle, alors la charge est alimentée directement par les PV. [11]

$$P_{disp} = P_{pv} - P_{ch} \quad (III.5)$$

Les batteries sont utilisées dans une plage d'états de charge (EDC) délimitée afin de maximiser leur durée de vie. Pour protéger les batteries et prévenir leur vieillissement prématuré, il est crucial d'éviter les états de charge extrêmes.

Dans un système réel, cette protection est généralement assurée par le contrôle de leurs tensions. Les batteries sont déconnectées si leurs tensions dépassent les limites prédéterminées de EDC min et EDC max. En imposant ces seuils d'état de charge, nous nous assurons que les batteries fonctionnent

de manière optimale sans subir de dommages liés à des charges trop faibles ou trop élevées. Cette gestion prudente des seuils de charge est essentielle pour garantir la fiabilité et la longévité des batteries. Nous présenterons ici-bas l'organigramme de gestion de l'énergie photovoltaïque :

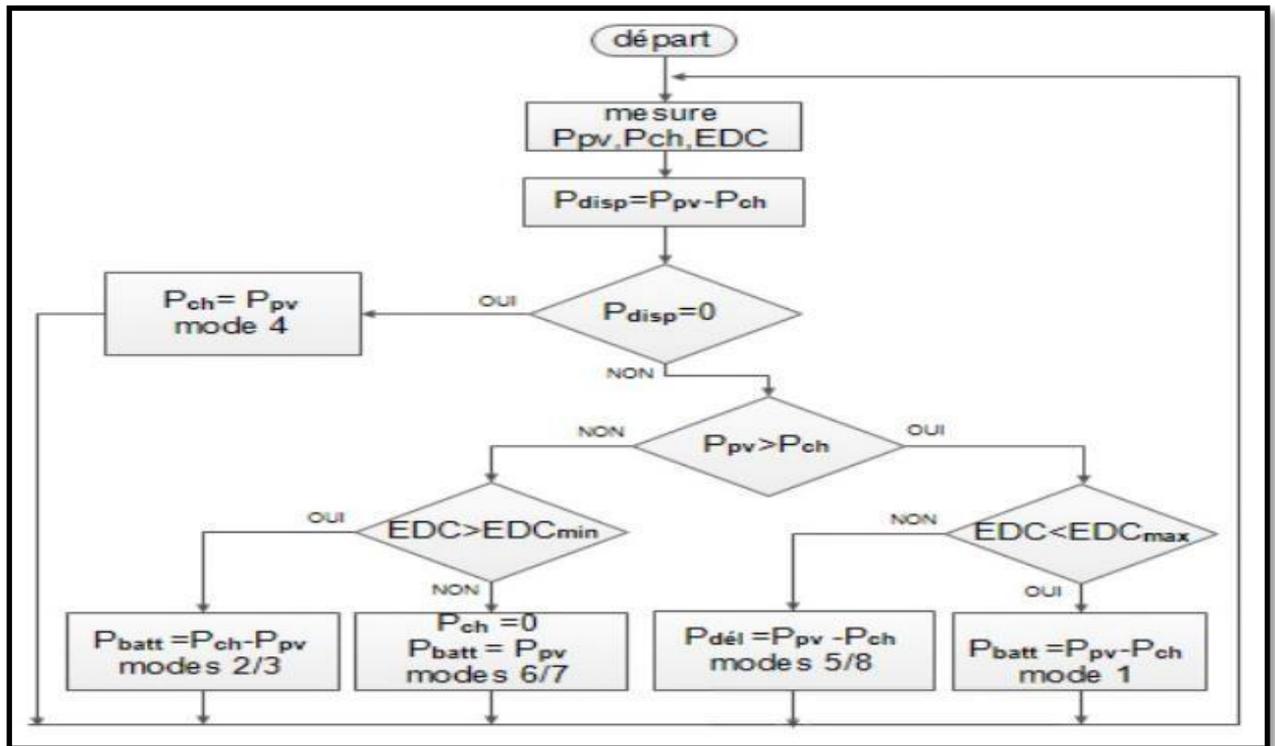


Figure III. 21 : Organigramme de la gestion de la puissance photovoltaïque

- Mode1 : Dans ce mode, la puissance photovoltaïque produite est supérieure par rapport à la puissance de charge ( $P_{pv} > P_{ch}$ ), le surplus d'énergie est stocké dans les batteries. Cette situation se produit généralement quand l'ensoleillement est élevé et la charge est faible.
- Mode2 : dans ce mode, la puissance photovoltaïque est insuffisante par rapport a la puissance de charge, d'où on fait appel à la compensation par batterie ( $P_{ch} = P_{pv} + P_{batt}$ ).
- Mode3 : La puissance photovoltaïque est nulle ( $P_{pv} = 0$ ), alors la charge est alimentée par les batteries.
- Mode4 : Ici nous avons la puissance photovoltaïque est égale à la puissance de la charge ( $P_{pv} = P_{ch}$ ), donc la charge est alimentée par la puissance PV et les batteries sont déconnectées.
- Mode5 : Dans ce mode, la puissance photovoltaïque produite est supérieure par rapport à la puissance de charge et les batteries sont pleinement chargées, le surplus d'énergie est dissipé dans la résistance de délestage ( $P_{del} > 0$ ).
- Mode6 : la puissance produite par les panneaux photovoltaïques est insuffisante pour l'alimentation de la charge et les batteries sont déchargées alors on charge les batteries.

- Mode7 : la puissance photovoltaïque est nulle ( $P_{pv}=0$ ), les batteries sont déchargées donc il n'y a pas d'énergie alors la charge est déconnectée ( $P_{ch}=0$ ).
- Mode8 : la charge est déconnectée ( $P_{ch}=0$ ), les batteries sont pleinement chargées donc la puissance produite par les PV est parcourue dans la résistance de délestage ( $P_{dél}>0$ )[26].

### III.7. Simulation des résultats

Après avoir présenté l'algorithme de gestion du système photovoltaïque, nous avons conçu et simulé un modèle équivalent dans Matlab/Simulink. Ce modèle permet d'étudier le comportement du système sous différentes conditions d'ensoleillement et de demande de puissance.

#### 1. Panneau Photovoltaïque (GPV) :

Le panneau photovoltaïque convertit l'énergie solaire en électricité. La production d'énergie dépend de l'ensoleillement et de la température, modélisés par les blocs "Variation de l'ensoleillement" et "Tj" représentant une température constante de 298 K.

#### 2. Batterie (Batt) :

La batterie stocke l'énergie excédentaire produite par le panneau PV. Les paramètres de la batterie incluent la tension ( $V_{batt}$ ), le courant ( $I_{batt}$ ), et l'état de charge (SOC).

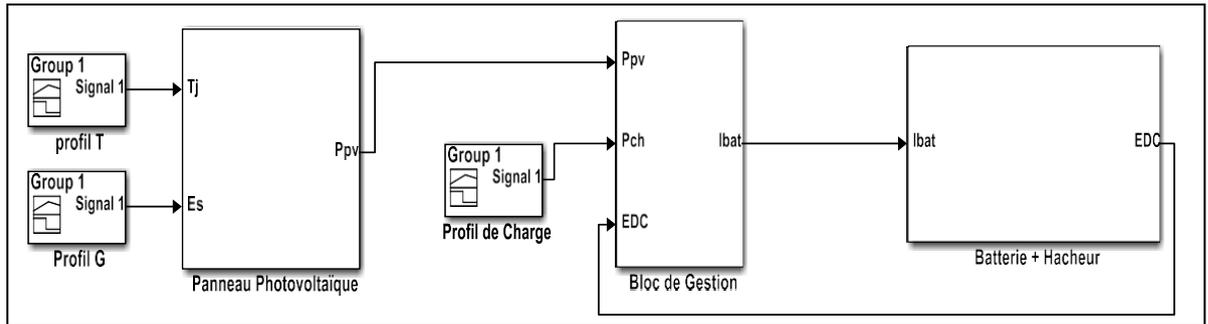
#### 3. Gestion de l'Énergie (Gest) :

Le bloc de gestion de l'énergie régule les flux d'énergie entre le panneau PV, la batterie, et la charge. Il s'assure que l'état de charge de la batterie reste dans des limites sûres (EDC) et que la puissance demandée ( $P_{ch}$ ) est fournie.

#### 4. Convertisseur Buck-Boost :

Ce convertisseur ajuste la tension de sortie du système pour qu'elle soit compatible avec la charge. Il utilise la tension ( $V_{batt}$ ) et le courant ( $I_{batt}$ ) de la batterie pour réguler la tension de sortie ( $V_{dc}$ ).

La figure ci-dessous illustre le schéma complet du modèle Matlab/Simulink utilisé pour cette simulation :

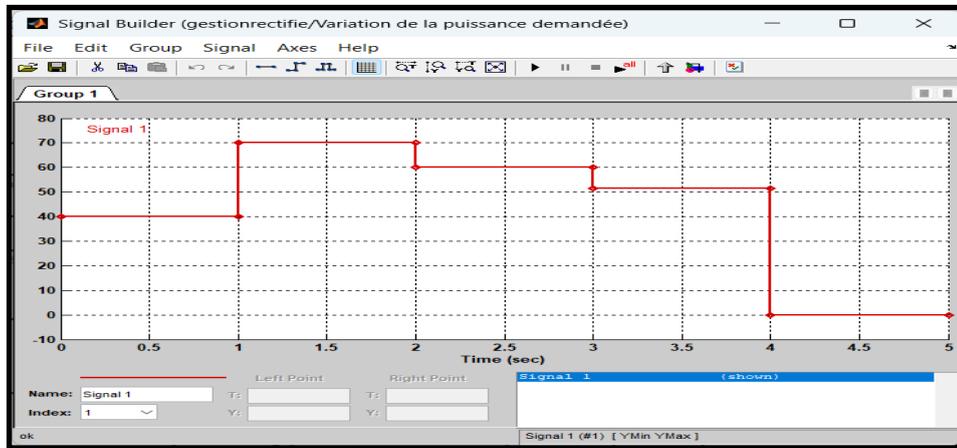


**Figure III. 22:** Schéma global sur Matlab/Simulink

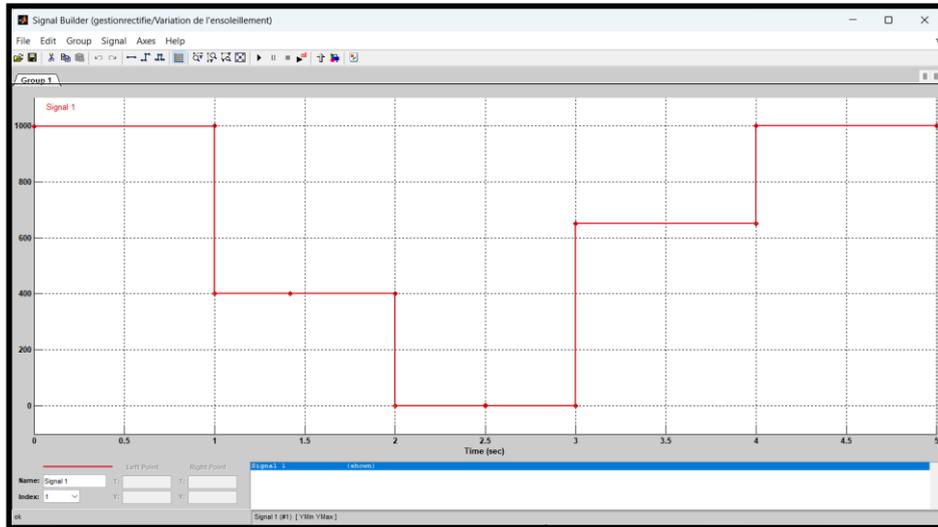
Ce modèle permet de simuler différents scénarios en ajustant les paramètres d'entrée, ce qui aide à analyser l'impact des variations d'ensoleillement et de demande de puissance sur la performance globale du système.

Les résultats obtenus permettent de mieux comprendre les interactions entre les composants du système et d'optimiser la gestion de l'énergie pour assurer une performance optimale et prolonger la durée de vie des batteries.

Les figures (III.23), (III.24) représentent le profil de charge appliqué dans cette étude ainsi que la variation de l'ensoleillement :

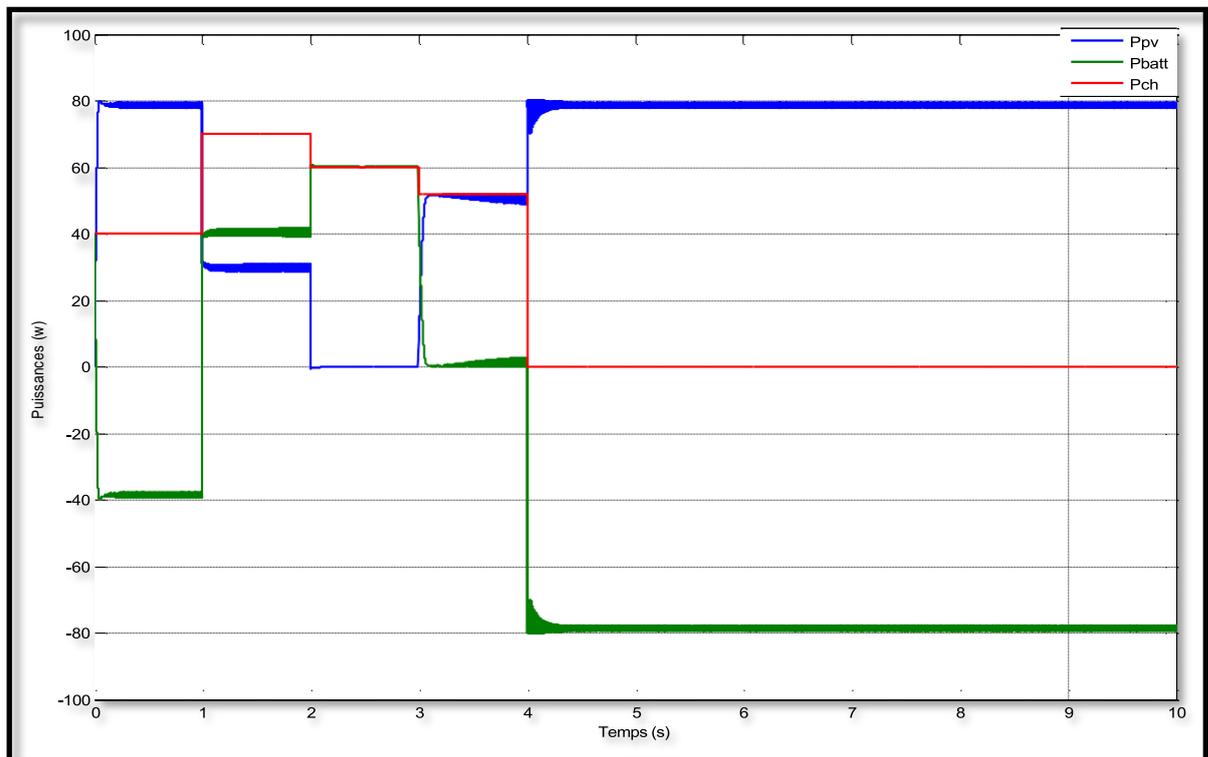


**Figure III. 23:** Profil de charge



**Figure III. 24:** Variation de l'ensoleillement

La figure (III.25) représente les résultats de simulation de la puissance de totale qui inclut la puissance fournie par le panneau photovoltaïque ( $P_{pv}$ ), la puissance de la batterie ( $P_{batt}$ ) ainsi que la puissance demandée par la charge ( $P_{ch}$ ) :



**Figure III. 25:** Allure des puissances en fonction du temps

### III.7.2. Interprétation des résultats

Cette analyse montre que le système photovoltaïque, avec l'aide de la batterie, peut répondre efficacement aux variations de la demande de puissance et de la production photovoltaïque, en assurant une alimentation continue et stable pour la charge.

- **Charge et décharge de la batterie** : La batterie se charge ( $P_{batt}$  négatif) lorsque la production photovoltaïque excède la demande de la charge. Elle compense la demande ( $P_{batt}$  positif) lorsque la production photovoltaïque est insuffisante.
- **Équilibre énergétique** : La relation  $P_{ch} = P_{pv} - P_{batt}$  est bien respectée. Les fluctuations montrent les ajustements nécessaires de la batterie pour maintenir cet équilibre.
- **Stabilité du système** : Les variations de  $P_{pv}$  sont bien gérées par les ajustements de  $P_{batt}$ , ce qui démontre la capacité du système à maintenir une alimentation stable pour la charge.

Les ajustements constants permettent de maximiser la production d'énergie, tandis que la batterie joue un rôle crucial en compensant les variations et en assurant une alimentation stable pour la charge. Cette combinaison garantit que le système peut répondre aux besoins énergétiques même avec des fluctuations de la production photovoltaïque.

### III.8 Conclusion

Ce chapitre a approfondi l'étude des techniques d'optimisation et de gestion de l'énergie dans les systèmes photovoltaïques. Il a mis en lumière l'importance cruciale des méthodes MPPT, notamment l'algorithme P&O (Perturb and Observe) et la logique floue. La modélisation d'un système complet intégrant des panneaux solaires, des batteries et une charge variable a permis d'explorer les défis complexes de la gestion énergétique.

L'algorithme proposé s'est avéré efficace pour optimiser l'utilisation de l'énergie, garantissant une alimentation stable tout en préservant la durée de vie des batteries. Les résultats démontrent la remarquable capacité du système à s'adapter aux fluctuations d'ensoleillement et de demande, soulignant ainsi la robustesse de l'approche.

L'intégration de la logique floue a significativement amélioré la précision et la stabilité du système par rapport à l'algorithme P&O classique.

## Conclusion générale :

Cette étude a couvert l'ensemble du spectre des systèmes photovoltaïques, depuis leurs principes fondamentaux jusqu'aux défis technologiques actuels. Nous avons exploré les différentes technologies de cellules solaires, leurs caractéristiques et applications, ainsi que les méthodes de stockage d'énergie essentielles à leur efficacité.

Notre recherche s'est concentrée sur la modélisation et l'optimisation des systèmes photovoltaïques. Le modèle à une diode a été choisi pour sa simplicité et son efficacité, permettant une caractérisation précise du générateur PV sous diverses conditions climatiques via Matlab/Simulink.

L'étude a mis en évidence l'importance cruciale des méthodes MPPT, en particulier l'algorithme P&O et la logique floue, pour maximiser l'efficacité des systèmes. La modélisation d'un système complet intégrant panneaux solaires, batteries et charge variable a permis d'explorer les défis complexes de la gestion énergétique.

L'algorithme de gestion proposé s'est révélé particulièrement efficace pour optimiser l'utilisation de l'énergie, assurant une alimentation stable tout en préservant la longévité des batteries. Les résultats démontrent la remarquable capacité du système à s'adapter aux fluctuations d'ensoleillement et de demande énergétique.

L'intégration de la logique floue a considérablement amélioré la précision et la stabilité du système par rapport à l'algorithme P&O classique. Cette avancée ouvre la voie à une intégration plus efficace des énergies renouvelables dans le mix énergétique global.

Contribue significativement à l'avancement des systèmes photovoltaïques autonomes, posant les bases pour le développement futur de solutions énergétiques durables et hautement efficaces. Malgré les progrès réalisés, des défis persistent, notamment en termes de rendement et de coûts initiaux, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour la recherche future dans ce domaine en constante évolution.

---

## ***Bibliographie***

- [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] : Pr K.Idjdarene Gisement solaire Université de Bejaia
- [3] BERREZZOUG H « Principe de fonctionnement et mesure des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque » Thème de master Université de Saida 201
- [4] : SAHOUR D, GUESSAB B« Etude et modélisation d'un panneau photovoltaïque » Thème master université de Guelma 2021
- [5] Stocker de l'électricité, comment ça marche ? (theconversation.com)
- [6] -Stockage de l'énergie sous forme mécanique: STEP, volant d'inertie et air comprimé – énergie#7 – Le Réveilleur (lereveilleur.com)
- [7] Volant de stockage solaire : une piste pour le stockage de l'énergie ? | Choisir.com + Cours : Dr Nasser-eddine MEBARKI Chapitre 1.pdf (univ-bejaia.dz)
- [8] Cours : Dr Nasser-eddine MEBARKI Chapitre 1.pdf (univ-bejaia.dz)
- [9] : Supercondensateurs : technologie et applications (centraliens-lyon.net)
- [10] : cours PR ,Rikioua université Bejaia 2020
- [12] : Rezigui.M et Attachi.M « Rationalisation et maîtrise de la consommation d'énergie électrique dans le secteur industriel », Mémoire fin d'études, Université Laghouat 2023
- [13] Mme Pr. Rikioua, Systèmes de conversion de l'énergie photovoltaïque. Université A.MIRA Bejaia.
- [14] Benredjem.S, Djeroud.I : Effet des Différents Types de Modèle sur les Caractéristiques de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque. Mémoire de master 2021 Univ de Guelma.
- [15] Bendjellouli Zakaria. Contribution à la modélisation d'une cellule solaire. Thème de Magister, Université de Bechar 2009.
- [16] TAMER, KHATIB. WILFRIED, ELMENRE. Modeling of photovoltaic systems using matlab. Canada: Wiley, 2016. 226.
- [17] Hamidouche.M, Mokhtari.B. Etude d'un système photovoltaïque. Mémoire de master, Université A.MIRA Bejaia 2016.
- [18] A.T. Singo « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse de Doctorat de l'Université Henri, 2010.

## *Bibliographie*

- [19] Mme Hamouche née Serir « Techniques d'optimisation et de contrôle de puissance. » Université A.miraBejaia.
- [20] BENSMAIL Wafa, ABDALLAH FATMAZOHRA «Etude et simulation de la commande MPPT basée sur l'approche Hill-Climbing Flou », Thèse de MASTER, Université SAAD DAHLAB DE BLIDA(2015/2016).
- [21] H Abbes , H Abid, K Loukil, A Toumi et M Abid «Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque » National School of Engineering of Sfax, University of Sfax 2014.
- [22] M.Hatti, IEEE Member « Contrôleur Flou pour la Poursuite du Point de Puissance Maximum d'un Système Photovoltaïque. » Centre de Recherche Nucléaire de Birine, B.P 180 Ain Oussera 17200, Djelfa Algérie.
- [23] RAMDANI I, SADOK Y « Commande MPPT basée sur le contrôleur flou de type 2 sur un système de conversion d'énergie photovoltaïque autonome » Thème de Master université de Bejaia 2022
- [24] HIZI N , DJABOREBBI T « Etude comparative des commandes MPPT pour les systèmes photovoltaïques » Thème master UNIVERSITE KASDI MERBAH-OUARGLA 2022
- [25] Yahiaoui Y « Commande MPPT à base la logique floue et les algorithmes génétiques »
- [26] Cours « Chapitre 2 : Différentes méthodes de diagnostic- systèmes d'inférences flous »Université de Mila.  
Microsoft Word - cours l logique floue (centre-univ-mila.dz)
- [27] BELLIL Abderrahmane YAGOUNI Yacine Optimisation d'un système photovoltaïque par la logique flouebejaia 2020
- [28] MOUASSANE S, KICIRI S « Gestion d'énergie d'un système photovoltaïque avec batteries » Thème demaster université de Bejaia 2014.
- [29] AOUMER A, HARFOUCHE K « Maximisation de l'Energie d'un Système Photovoltaïque » Thème demaster Université de Bejaia 2016