

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université A.Mira de Béjaia



FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE

En vue de l'obtention du diplôme de master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité :

- **Energies renouvelables en Electrotechnique**
- **Electrotechnique industrielle**

THÈME

**Commande par logique floue appliquée à la
gestion d'un système hybride.**

Réalisé par :

- BELMELLAT Salim
- BEDJGUELEL Cilya

Encadré par :

Mme Mokrani Zahra

Année universitaire 2022/2023

Remerciements

Nous remercions dieu de nous avoir donné la force et la sagesse de réaliser et d'aller au bout de notre travail.

Nous tenons également à remercier vivement madame Mokrani Zahra, notre encadrante pour son aide et orientation ainsi que sa disponibilité et professionnalisme tout au long de l'élaboration de notre mémoire.

Nous adressons nos chaleureux remerciements aux membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'évaluer notre travail.

Nos vifs remerciements aussi à tous nos enseignants, qui nous ont accompagnés durant notre cursus.

Dédicace

C'est avec une profonde gratitude que je dédie ce travail à mes chers parents,

C'est grâce à vos encouragements, votre bienveillance et votre présence à mes côtés que j'ai pu arriver au bout de ce respectueux parcours.

A mon cher frère Massinissa et la meilleure des sœurs Dihya qui n'ont pas cessé de me conseiller et de me soutenir tout au long de mes études ainsi que ma belle-sœur Salima.

A ma famille, mes proches et tous mes amis, particulièrement Amira pour son soutien moral et conseils durant ces dernières années.

A mon binôme Salim, pour sa grande aide, sa patience et son soutien tout au long de nos études.

Cilya

Dédicace

C'est avec une profonde gratitude que je dédie ce travail à mes chers parents,

C'est grâce à vos encouragements, votre bienveillance et votre présence à mes côtés que j'ai pu arriver au bout de ce long parcours.

A mon cher frère et ma petite sœur qui n'ont pas cessé de m'encourager et de me soutenir tout au long de mes études.

A ma famille, mes proches et mes amis, particulièrement ma tante pour son soutien moral et conseils durant ces années d'études.

A ma binôme Cilya, pour sa grande aide, sa patience et son soutien tout au long de nos études.

Salim

Liste des abréviations et symboles

Liste des abréviations et symboles

SEH : Système énergétiques Hybride.

CC : Courant continu.

AC : Alternatif courant.

DC/DC : Convertisseur Direct courant/ Direct courant.

AC/DC : Convertisseur Alternatif courant/ Direct courant.

AC/AC : Convertisseur Alternatif courant/ Alternatif courant.

PV : Photovoltaïque.

MPPT : Maximum Power Point Tracking.

GPV : Générateur Photovoltaïque.

PPM : Point de puissance maximale.

E : L'erreur.

CE : Le changement d'erreur.

K : L'instant d'échantillonnage.

GN : Grand Négatif.

PN : Petit Négatif.

Z : Zéro.

PP : Petit Positif.

GP : Grand Positif.

CLF : Commande par logique floue.

SOC : State Of Charge.

SOC_{max} : Etat de charge maximale.

SOC_{min} : Etat de charge minimale.

STC : Standard Test Condition.

Ent : Entier.

P&O : Perturbe et Observe.

EDC : L'état de charge de la batterie.

Rs : Résistance série.

Rp : Résistance parallèle.

u : Rapport cyclique.

I_{pv} : Le courant délivré par a cellule photovoltaïque.

I_{PH} : Courant produit par la photopile.

I_D : Courant de diode.

I_{SH} : Le courant shunt.

E_{Sref} : L'ensoleillement de référence.

T_{Jref} : La température de jonction référence.

T_J : Température de jonction.

E_S : Ensoleillement.

P₁, P₂, P₃, P₄ : Paramètres constants.

I_{od} : Courant de saturation de la diode.

N_S : Nombre totale de cellules connectées en série ou en parallèle.

E_g : Energie de gap.

V_{PV} : La tension délivrée par le module photovoltaïque.

q : La charge élémentaire.

k : La constante de Boltzmann.

A : Le coefficient d'idéalité de la cellule.

P_{mpp} : Puissance max du panneau.

I_{mpp} : Courant au point de puissance max.

V_{mpp} : Tension au point de puissance max.

I_{cc} : Courant de court-circuit.

V_{co} : Tension en circuit ouvert.

n_b : Cellules en série.

V_b : La tension aux bornes de la batterie.

t_{bat} : La durée de fonctionnement de la batterie.

$I_{bat,moy}$: Le courant de décharge.

Q_m : La quantité de charge manquante à la batterie.

C_{bat} : La capacité nominale de la batterie.

I_{10} : Courant nominal de la batterie donné par le constructeur.

C_{10} : Capacité nominale de la batterie en régime de décharge a courant constant durant 10 heures.

B_j : Le besoin journalier.

P_{ch} : La puissance unitaire de l'appareil.

Δ_t : La durée d'utilisation de l'appareil.

$E_{PV/j}$: Puissance journalière du panneau.

P_c : Puissance crête du panneau.

N_e : Nombre d'heures équivalentes.

N_{PV} : Nombre de panneaux photovoltaïque.

V_{DC} : La tension du générateur PV.

$N_{PV,série}$: Nombre de panneaux en série.

$N_{PV,parallèle}$: Nombre de panneaux en parallèle.

N_{batt} : Nombre de batteries.

Liste des figures

Liste des figures

<i>Figure I-1</i> Les types d'énergies renouvelables.....	4
<i>Figure I-2</i> Principe de conversion photovoltaïque [5].....	7
<i>Figure I-3</i> Configuration série d'une structure hybride à bus continue.....	8
<i>Figure I-4</i> Configuration série d'une structure hybride à bus alternatif.....	9
<i>Figure I-5</i> Configuration parallèle d'une structure hybride.....	10
<i>Figure I-6</i> Les composants d'un champ de modules photovoltaïque.....	11
<i>Figure I-7</i> Structure série d'une configuration photovoltaïque/diesel.....	14
<i>Figure I-8</i> Structure d'une configuration photovoltaïque/diesel à commutation.....	15
<i>Figure I-9</i> Structure parallèle d'une configuration photovoltaïque/diesel.....	16
<i>Figure II-1</i> Chaîne de structure photovoltaïque.....	20
<i>Figure II-2</i> Schéma électrique du générateur photovoltaïque.....	21
<i>Figure II-3</i> Caractéristiques courant-tension sous conditions STC.....	24
<i>Figure II-4</i> Caractéristiques puissance-tension sous conditions STC.....	24
<i>Figure II-5</i> Caractéristiques courant-tension pour différents niveaux de température à éclairement constant 1000W/m ²	25
<i>Figure II-6</i> Caractéristiques puissance-tension pour différents niveaux de température à éclairement constant 1000W/m ²	26
<i>Figure II-7</i> Caractéristiques courant-tension pour différents niveaux d'éclairement à température constante 25°C.....	27
<i>Figure II-8</i> Caractéristiques puissance-tension pour différents niveaux d'éclairement à température constante 25°C.....	27
<i>Figure II-9</i> Schéma illustratif du principe de la commande MPPT par la P&O.....	28
<i>Figure II-10</i> Organigramme de l'algorithme MPPT (P&O).....	29
<i>Figure II-11</i> Caractéristique courant-tension pour différents éclairements avec la réponse de l'algorithme (P&O).....	30
<i>Figure II-12</i> Caractéristique courant-tension pour différents éclairements avec la réponse de l'algorithme (P&O).....	31
<i>Figure II-13</i> Caractéristique courant-tension pour différents températures avec la réponse de l'algorithme (P&O).....	31
<i>Figure II-14</i> Caractéristique puissance-tension pour différents températures avec la réponse de l'algorithme (P&O).....	32
<i>Figure II-15</i> Circuit électrique d'un hacheur (BOOST).....	33
<i>Figure II-16</i> Schéma électrique de batterie.....	33
<i>Figure II-17</i> Influence de la température sur la capacité de la batterie.....	35
<i>Figure II-18</i> Variation de l'état de charge en fonction de la capacité de la batterie pour différentes températures.....	36
<i>Figure II-19</i> Influence de la température sur l'état de charge la batterie en fonction du temps.....	36
<i>Figure II-20</i> Schéma électrique Hacheur Buck-Boost.....	37

<i>Figure II-21</i> Architecture du bus continu.	38
<i>Figure III-1</i> Comparaison entre un ensemble classique et un ensemble flou.	40
<i>Figure III-2</i> Représentation graphique d’une variable linguistique [20].	41
<i>Figure III-3</i> Courbes illustratives de l’union des sous-ensembles flous.	42
<i>Figure III-4</i> Courbe illustrative de l’intersection des sous-ensembles flous.	43
<i>Figure III-5</i> Courbe illustrative de le l'operateur NON.	43
<i>Figure III-6</i> Schéma synoptique général d'un contrôleur flou.	45
<i>Figure III-7</i> Fonction d'appartenance de la variable d'entrée E.	48
<i>Figure III-8</i> Fonction d'appartenance de la variable d'entrée CE.	48
<i>Figure III-9</i> Fonction d'appartenance de la variable de sortie D.	49
<i>Figure III-10</i> Allure de la puissance photovoltaïque avec la commande floue.	50
<i>Figure III-11</i> Zoom sur l’allure de la puissance photovoltaïque avec la commande floue.	51
<i>Figure III-12</i> Temps de réponse par commande floue.	51
<i>Figure IV-1</i> Configuration du système SEH global.	53
<i>Figure IV-2</i> Organigramme de la gestion d’énergie proposée.	55
<i>Figure IV-3</i> Profil de l’ensoleillement.	60
<i>Figure IV-4</i> Profil de la température.	61
<i>Figure IV-5</i> Allure des puissances avec les commandes P&O et FLC sous conditions STC.	61
<i>Figure IV-6</i> Allure de la puissance avec la commande P&O aux conditions variables.	62
<i>Figure IV-7</i> Allure de la puissance avec la commande FLC aux conditions variables.	62
<i>Figure IV-8</i> Allure des puissances avec la commande P&O et FLC aux conditions variables.	63
<i>Figure IV-9</i> Allure de la charge.	64
<i>Figure IV-10</i> Allure de la puissance du GPV.	64
<i>Figure IV-11</i> Allure du courant de la batterie.	65
<i>Figure IV-12</i> Allure de la tension de la batterie.	65
<i>Figure IV-13</i> Allure de la puissance de la batterie.	66
<i>Figure IV-14</i> Etat de charge de la batterie.	66
<i>Figure IV-15</i> Allure des puissances du système globale.	67
<i>Figure IV-16</i> Mode 1.	67
<i>Figure IV-17</i> Mode 2.	68
<i>Figure IV-18</i> Mode 3.	68
<i>Figure IV-19</i> Mode 4.	69

Liste des tableaux

Liste des tableaux

<i>Tableau I-1</i> Classification des SEH selon les puissances.	13
<i>Tableau II-1</i> Caractéristiques du panneau utilisé.	23
<i>Tableau III-1</i> Table des règles du CLF.	50
<i>Tableau IV-1</i> Consommation journalière d'un foyer autonome.	56
<i>Tableau IV-2</i> Choix de la tension de fonctionnement V_{DC}	58
<i>Tableau IV-3</i> Dimensionnement des panneaux photovoltaïques.	59
<i>Tableau IV-4</i> Dimensionnement des batteries.	60

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I. Généralités sur les énergies renouvelables et les systèmes hybrides	3
I.1. Introduction	3
I.2. Les énergies renouvelables.....	3
I.2.1. Energie éolienne	4
I.2.2. Energie hydraulique.....	4
I.2.3. Energie de la biomasse	5
I.2.4. Energie de la géothermie	5
I.2.5. Energie solaire	5
I.3. La cellule photovoltaïque	6
I.4. Les systèmes hybrides.....	7
I.4.1. Architectures d'un système hybride	7
I.4.1.1 Architecture série	8
I.4.1.1.a Configuration à bus à courant continu.....	8
I.4.1.1.b Configuration a bus à courant alternatif.....	8
I.4.1.2 Architecture parallèle	9
I.4.2. Les principaux composants d'un système hybride	10
I.4.2.1 Le générateur photovoltaïque.....	10
I.4.2.2 Les batteries de stockage.....	11
• Types de batteries :	11
I.4.2.3 Les convertisseurs statiques :	12
• Hacheur (DC/DC).....	12
• Onduleur (DC/AC)	12
• Redresseur (AC/DC).....	12
I.4.3. Classification des systèmes hybrides :	12
I.4.4. Structures de systèmes hybrides	13
I.4.4.1 Système hybride avec source d'énergie conventionnelle.....	13
I.4.4.1.a Système photovoltaïque/générateur diesel	13

I.4.4.1.b Système photovoltaïque/éolien/diesel	16
I.4.4.1.c Système hydroélectrique/diesel	16
I.4.4.2 Système hybride sans source d'énergie conventionnelle	17
I.4.4.2.a Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage	17
I.4.4.2.b Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage	17
I.4.4.2.c Système hybride éolien/hydroélectrique	18
I.4.5. Avantages et inconvénients des systèmes hybrides.....	18
• Avantages	18
• Inconvénients	19
I.5. Conclusion.....	19
Chapitre II. Modélisation du système hybride	20
II.1. Introduction.....	20
II.2. Structure de la chaîne de conversion photovoltaïque.....	20
II.3. Modélisation du générateur photovoltaïque.....	21
II.4. Caractéristique électrique du panneau photovoltaïque	23
II.5. Caractéristique courant-tension et puissance-tension sous les conditions STC.....	23
II.6. Influence de la température et l'ensoleillement sur les caractéristiques d'un PV	25
II.6.1. Influence de la température	25
II.6.2. Influence de l'éclairement	26
II.7. Principe de la commande MPPT.....	28
II.8. Convertisseur DC/DC (Hacheur BOOST).....	32
II.9. Modélisation du système de stockage (Batterie)	33
II.9.1. Modélisation de la capacité C_{bat} :	34
II.9.2. Equations de la tension de décharge :	34
II.9.3. Equation de la tension de charge :	35
II.9.4. Résultats de simulation :	35
II.10. Modélisation du convertisseur DC/DC abaisseur-survolteur Buck-Boost	37
II.10.1. Mode de fonctionnement du convertisseur Buck-Boost	38
II.11. Modélisation du bus continu	38
II.12. Conclusion	38
Chapitre III. Commande par logique floue	39

III.1. Introduction	39
III.2. Notions de base de la logique floue :	39
III.2.1. Principe de la logique floue :	39
III.2.2. Ensemble floue :	40
III.2.3. Variable linguistique :	40
III.2.4. Fonction d'appartenance :	41
III.2.5. Opérations sur les ensembles flous [21] :	42
III.2.5.1 L'union (Opérateur OU) :	42
III.2.5.2 L'intersection (Opérateur ET) :	42
III.2.5.3 Le complément (Opérateur NON) :	43
III.2.6. Raisonnement flou :	43
III.3. Domaine d'application :	43
III.4. Structure générale d'un régulateur flou :	44
III.4.1. Interface de fuzzification :	45
III.4.2. Base de règles :	45
III.4.3. L'inférence :	45
III.4.3.1 Méthode Inférence de Mamdani (max-min) :	45
III.4.3.2 Méthode d'inférence Max-Produit :	46
III.4.3.3 Méthode de Sugeno :	46
III.4.4. Interface de défuzzification :	46
III.4.4.1 Méthode du centre de gravité :	46
III.4.4.2 Méthode du maxima :	46
III.4.4.3 Méthode de la moyenne des maximas :	47
III.4.4.4 Méthode des hauteurs pondérées :	47
III.5. Application de la commande mppt par la logique floue :	47
III.6. Conclusion	52
Chapitre IV. Gestion d'énergie du système hybride	53
IV.1. Introduction	53
IV.2. Gestion d'énergie	53
IV.3. But de la gestion d'énergie utilisée	53
IV.4. Les différents modes de gestion d'énergie	54

IV.5. Organigramme de la gestion d'énergie	55
IV.6. Dimensionnement du système hybride.....	56
IV.6.1. Dimensionnement des panneaux photovoltaïque	56
IV.6.2. Dimensionnement des batteries	58
IV.7. Simulation du système hybride étudié.....	60
IV.7.1. Profil de l'ensoleillement et la température.....	60
IV.7.2. Comparaison des résultats et simulation des deux commandes	61
IV.7.2.1 Résultats sous conditions STC	61
IV.7.2.2 Résultats sous conditions variables	62
IV.7.3. Application de la gestion proposée au système hybride	63
IV.7.3.1 Simulation du GPV	64
IV.7.3.2 Simulation de la batterie.....	65
IV.7.3.3 Simulation du système global	66
IV.8. Conclusion.....	69
Conclusion générale.....	70

Introduction générale

La demande mondiale en énergie est en constante augmentation dans de nombreux secteurs. Pour répondre à cette demande, les producteurs d'énergie ont eu longtemps recours à l'exploitation des ressources fossiles (charbon, gaz et pétrole) de par leurs rentabilités. Cependant, ce mode de production a engendré un impact très important sur l'environnement en matière de pollution et de réchauffement climatique dus aux émissions des gaz à effet de serre c'est pourquoi aujourd'hui on se penche vers les énergies renouvelables qui sont des sources d'énergie qui se régénèrent naturellement et continuellement. Elles sont considérées comme une alternative durable aux combustibles fossiles non renouvelables.

Néanmoins, les performances d'un système basé sur une seule source renouvelable sont limitées à cause de la dépendance de cette dernière aux conditions climatiques en plus des variations de la charge, sur l'échelle annuelle ou journalière. C'est pour cela qu'on a recours à des systèmes énergétiques hybrides qui sont le résultat de la combinaison de sources renouvelables pour produire de l'électricité [1]. Par exemple, un système hybride composé de panneaux photovoltaïques et de stockage par batteries est une solution d'alimentation électrique autonome qui combine la production d'énergie solaire à partir de panneaux photovoltaïques avec le stockage de l'énergie produite dans des batteries.

Les variations des conditions atmosphériques, notamment le rayonnement solaire et la température ambiante, entraînent des fluctuations de puissance dans les systèmes de conversion photovoltaïques. Grâce aux méthodes MPPT (Maximum Power Point Tracking), le rendement des systèmes PV est considérablement amélioré. Beaucoup de méthodes ont été proposées dans la littérature pour suivre le point de puissance maximale PPM des systèmes PV, parmi ces méthodes la perturbation et observation (P&O) qui est souvent utilisée pour son implémentation simple et peu coûteuse mais cette méthode présente quelques inconvénients, notamment des oscillations autour du point de puissance maximale PPM entraînant ainsi des pertes d'énergie importantes [2].

En ce sens, des avancées récentes ont vu l'utilisation de méthodes MPPT basées sur des techniques d'intelligence artificielle, telles que les contrôleurs flous qui sont particulièrement adaptés pour le suivi du PPM dans des conditions atmosphériques variables, offrant de meilleures performances que les contrôleurs conventionnels [2]. Cependant, la conception de ces contrôleurs MPPT flous peut être difficile en raison du grand nombre de paramètres à ajuster (fonctions d'appartenance) et de la complexité de la base de règles floues.

Ainsi, le but de notre travail est de concevoir des contrôleurs MPPT flous capables d'extraire le maximum de puissance disponible dans un générateur photovoltaïque, indépendamment des variations des conditions atmosphériques et de la charge ainsi que la gestion d'énergie d'un système hybride afin de maximiser l'utilisation de l'énergie stockée et de minimiser les pertes d'énergie. Notre travail est donc partagé en quatre chapitres :

Le premier chapitre, sera porté sur les généralités des énergies renouvelables et leurs définitions ainsi que les différentes architectures et structures des systèmes hybrides avec des exemples détaillés.

Le second chapitre, sera consacré à la modélisation des différents composants de notre système hybride avec les caractéristiques du panneau photovoltaïque et de la batterie. Des techniques de maximisation de puissances MPPT seront proposées, parmi ces méthodes on proposera celle de la perturbation et observation (P&O) avec son algorithme et caractéristiques sous l'influence de conditions météorologiques spécifiques.

Le troisième chapitre, portera sur des généralités et la réalisation de la commande par logique floue pour la poursuite du PPM dans des conditions atmosphériques variables ainsi que les étapes de base nécessaires à l'élaboration de notre régulateur flou, puis on passera à la simulation de cette commande MPPT floue.

Le quatrième et dernier chapitre, sera dédié au dimensionnement et gestion d'énergie avec les différents modes définis pour notre système hybride. Puis nous présenterons les résultats des interprétations d'un profil qui correspondent à une simulation de 24H ou on fera la comparaison entre la commande par P&O et la commande par logique floue.

Chapitre I.
Généralités sur les
énergies renouvelables
et les systèmes
hybrides

I.1. Introduction

Les systèmes hybrides électriques et les énergies renouvelables sont des technologies en plein essor dans le monde entier. Les avantages de ces systèmes sont nombreux, notamment une réduction de la dépendance aux combustibles fossiles, une diminution des émissions de gaz à effet de serre et une plus grande fiabilité du système d'alimentation électrique.

Cependant, la mise en place de ces technologies peut être coûteuse et nécessite souvent des investissements importants en capital. De plus, l'efficacité énergétique des systèmes hybrides électriques et des énergies renouvelables peut varier en fonction des conditions météorologiques et des fluctuations de la demande d'électricité.

Dans ce chapitre, nous exposerons les différents types d'énergies renouvelables, puis nous définirons le système hybride ainsi que ses différents composants. Ensuite, nous donnerons les différentes architectures des systèmes hybrides et pour finir les différentes structures des systèmes hybrides.

I.2. Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont produites à partir de sources naturelles constamment renouvelées, contrairement aux énergies non renouvelables qui ont des stocks limités. Quant aux énergies fossiles, leur distribution géographique est plus équitable. Chaque région du monde dispose de ressources renouvelables importantes (soleil, biomasse, vent, hydraulique, etc.) qui peuvent jouer un rôle important dans leurs besoins énergétiques [1]. Elles sont également connues sous les noms d'"énergies propres" ou "énergies vertes" car elles génèrent peu de déchets et de polluants, mais leur potentiel énergétique est généralement plus faible que celui des énergies non renouvelables. Ces sources d'énergie peuvent être transformées en énergie utile pour l'homme à l'aide de divers moyens technologiques.

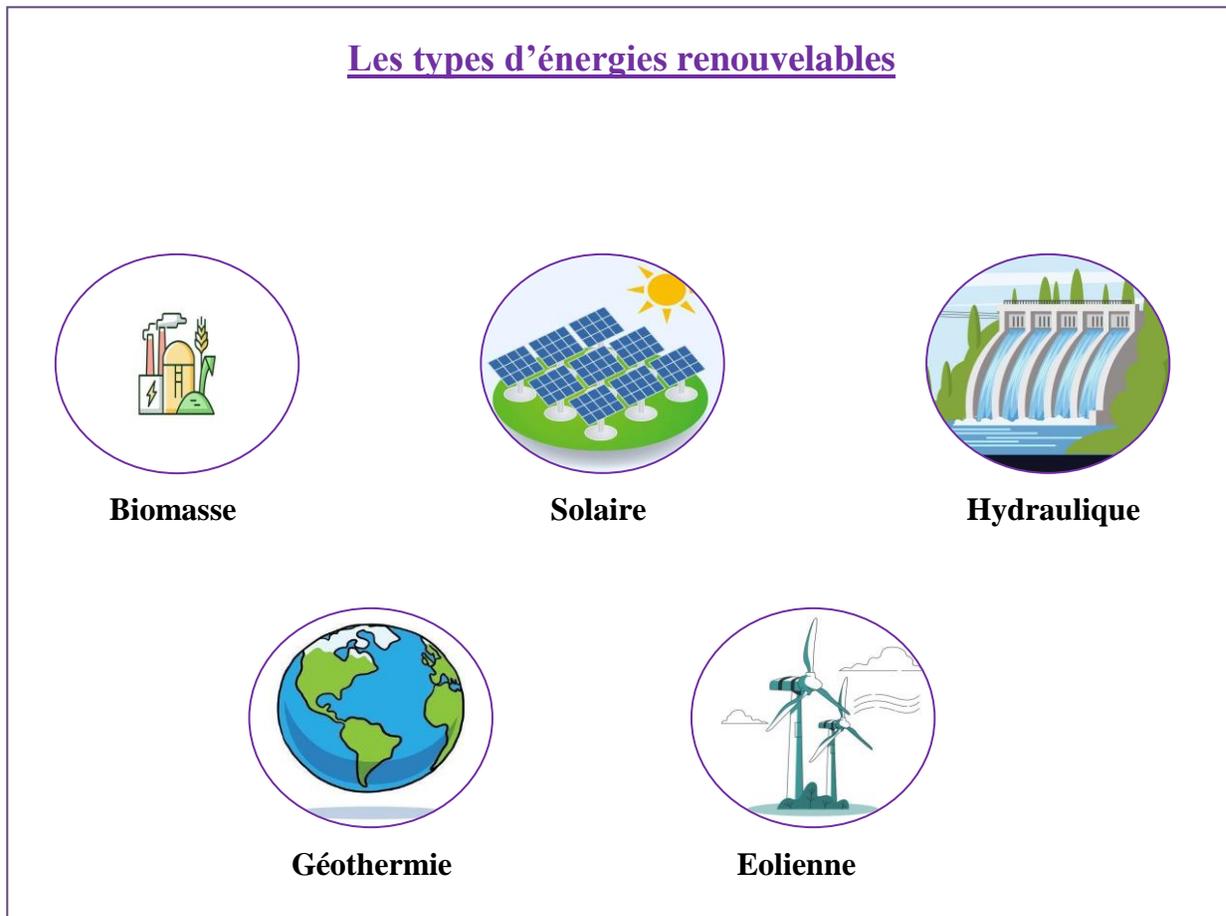


Figure I-1 Les types d'énergies renouvelables.

I.2.1. Energie éolienne

Une éolienne est une machine qui utilise l'énergie cinétique du vent pour faire tourner des pales qui sont reliées à un rotor. Le rotor est à son tour connecté à une génératrice qui transforme l'énergie mécanique en électricité. L'avantage des éoliennes est qu'elles utilisent une source d'énergie naturelle et gratuite, le vent, et qu'elles ne produisent pas de gaz à effet de serre ou de déchets polluants. Cependant, les éoliennes ont également des coûts élevés d'investissement et peuvent poser des problèmes d'acceptation sociale en raison de leur impact visuel et sonore dans certaines régions [3].

I.2.2. Energie hydraulique

L'énergie hydraulique est produite en utilisant l'énergie cinétique de l'eau en mouvement pour faire tourner une roue motrice, qui est reliée à un alternateur pour produire de l'électricité. Cette méthode de production d'énergie présente plusieurs avantages : elle est propre, car elle ne génère pas de pollution, et elle permet de stocker l'énergie facilement [1]. Les barrages hydrauliques peuvent également être équipés de filtres pour éliminer les déchets et débris, ce qui

améliore la qualité de l'eau. Toutefois, l'impact environnemental, le bruit et les installations complexes sont des inconvénients potentiels de cette source d'énergie renouvelable. Il est également important de noter que les sites appropriés pour les barrages hydrauliques peuvent être limités, ce qui limite leur utilisation à certaines régions géographiques.

I.2.3. Energie de la biomasse

L'énergie de la biomasse est une source d'énergie renouvelable qui provient de la transformation de la matière organique en énergie. Cette matière organique peut être d'origine animale ou végétale. Elle peut être transformée en combustibles solides, liquides ou gazeux pour produire de la chaleur ou de l'électricité. Les sources de biomasse comprennent le bois, les résidus agricoles, les déchets alimentaires, les déchets verts et les boues d'épuration.

Parmi les différents types de biomasse, le bois énergie est la ressource la plus utilisée au monde. Il s'agit d'une énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse, et qui est exploitée par combustion. Cette énergie est renouvelable à condition que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites. Les avantages de cette source d'énergie sont nombreux : elle permet de valoriser des déchets, elle est disponible localement et peut être utilisée pour la production d'énergie thermique, électrique ou carburants.

Cependant, l'utilisation de la biomasse peut avoir des inconvénients, notamment en termes d'émissions de gaz à effet de serre et d'impacts sur la biodiversité si elle est mal gérée [3].

I.2.4. Energie de la géothermie

La géothermie est une source d'énergie renouvelable qui exploite la chaleur contenue dans le sous-sol ou dans les roches pour produire de l'électricité ou de la chaleur. Cette technique consiste à puiser la chaleur à partir de différents types de sources, notamment la radioactivité, la chaleur initiale, la chaleur de différenciation et les mouvements différentiels [3].

La géothermie peut être utilisée de différentes manières : la production d'électricité par les centrales géothermiques, la production de chaleur pour le chauffage urbain ou résidentiel, la climatisation et le refroidissement, et la production d'eau chaude sanitaire.

Les avantages de la géothermie sont nombreux : elle est une source d'énergie propre, renouvelable et disponible 24h/24, elle n'émet pas de gaz à effet de serre et elle ne produit pas de déchets toxiques. De plus, la géothermie permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre en remplaçant les énergies fossiles.

I.2.5. Energie solaire

La catégorie de l'énergie solaire se divise généralement en deux grands types : l'énergie thermique et l'énergie photovoltaïque. L'énergie thermique utilise la chaleur du soleil pour chauffer l'eau, produisant ainsi de la vapeur qui alimente une turbine pour générer de l'électricité. Cette méthode peut également être utilisée pour chauffer des bâtiments via un système de plancher

chauffant. D'un autre côté, l'énergie photovoltaïque utilise l'effet photoélectrique pour convertir la lumière du soleil en électricité. Les panneaux solaires photovoltaïques sont constitués de cellules solaires en silicium qui capturent les photons et produisent de l'électricité en libérant des électrons [4]. L'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable inépuisable qui peut être utilisée partout où il y a du soleil, ce qui la rend particulièrement avantageuse pour les régions éloignées ou les zones rurales où les autres sources d'énergie ne sont pas facilement accessibles [3].

Thermique :

L'énergie solaire thermique est une forme d'énergie renouvelable qui utilise le rayonnement solaire pour produire de la chaleur. Cette technologie consiste à capter les rayons solaires à l'aide de panneaux solaires thermiques, qui contiennent un fluide caloporteur (liquide ou gaz) qui est chauffé par l'énergie solaire [3]. Ce fluide peut ensuite être utilisé pour chauffer de l'eau sanitaire, pour le chauffage des bâtiments ou pour produire de l'électricité à l'aide d'un cycle thermodynamique.

Photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque est un processus de conversion directe de l'énergie lumineuse en énergie électrique. Cette technologie utilise des cellules photovoltaïques, également appelées panneaux solaires, pour convertir la lumière solaire en courant électrique continu [4]. Bien que la source de lumière la plus intense et la plus courante soit le soleil, il est important de noter que tout type de lumière, y compris la lumière artificielle provenant de lampes ou de tubes fluorescents, peut générer de l'électricité à travers des cellules photovoltaïques.

Cette technologie est une source d'énergie renouvelable et durable, car elle utilise une ressource naturelle inépuisable, le soleil, pour produire de l'électricité sans émissions de gaz à effet de serre ou de polluants atmosphériques nocifs.

Parmi ces divers sources de production d'énergie utilisés dans les systèmes hybrides, nous avons opté pour le photovoltaïque qui est le plus adéquat de par sa simplicité de réalisation et son coût moins élevé comparé aux autres sources.

I.3. La cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque fonctionne selon le principe de l'effet photovoltaïque. Lorsqu'un photon (une particule de lumière) frappe la surface de la cellule, il libère un électron dans le matériau de la cellule, créant ainsi un déséquilibre de charges électriques. Les électrons libérés sont alors capturés par un circuit électrique connecté à la cellule, créant ainsi un courant électrique.

Les cellules photovoltaïques sont généralement fabriquées à partir de silicium, un matériau semi-conducteur. Le silicium est traité de manière à créer une zone p-dopée (chargée positivement) et une zone n-dopée (chargée négativement) à l'intérieur de la cellule. Lorsque la

lumière frappe la surface de la cellule, les électrons sont libérés dans la zone n-dopée et sont capturés par la zone p-dopée, créant ainsi un courant électrique [5] [4].

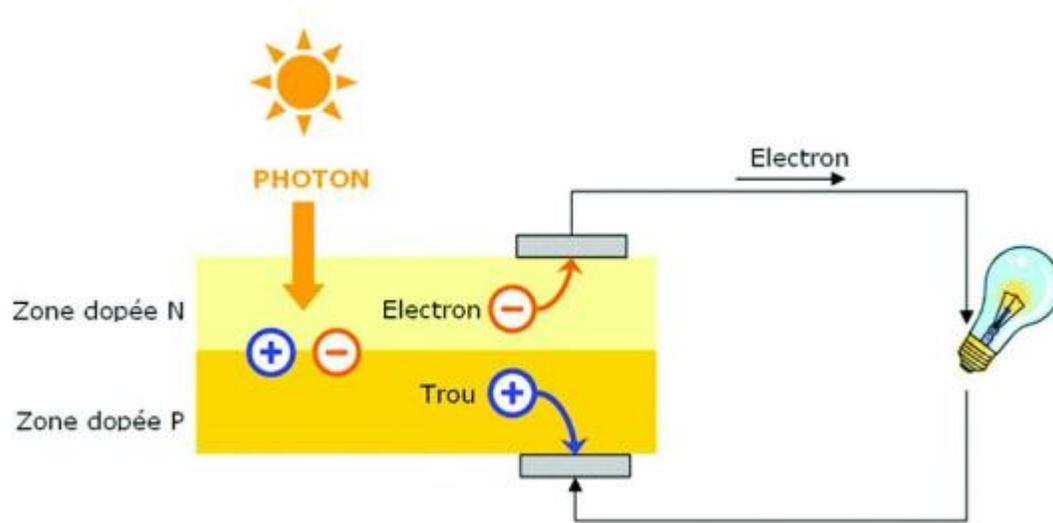


Figure I-2 Principe de conversion photovoltaïque [5].

I.4. Les systèmes hybrides

Les Systèmes Energétiques Hybride (SEH), combinent des sources d'énergie renouvelable et des sources conventionnelles pour garantir une alimentation électrique continue. Cela peut inclure une combinaison de sources d'énergie renouvelable telles que l'énergie solaire, éolienne ou hydroélectrique, ainsi que des générateurs diesel ou à gaz naturel [1].

Ils sont équipés de dispositifs de stockage tels que des batteries, des supercondensateurs et des piles à combustible pour optimiser leur fonctionnement. Les systèmes hybrides "isolés" sont autonomes et ne sont pas connectés aux réseaux de distribution électrique.

L'objectif principal des systèmes hybrides est d'optimiser l'utilisation des sources d'énergie renouvelable plutôt que des sources auxiliaires comme les groupes diesel pour répondre à la demande en électricité. La performance et la durée de vie d'un système hybride dépendent de sa conception, y compris la taille et la technologie de ses composants ainsi que son architecture. De plus, le choix de la stratégie de gestion est également un facteur clé pour améliorer les performances du système hybride [1].

I.4.1. Architectures d'un système hybride

Afin de présenter les différentes architectures d'un système hybride autonome, nous considérons dans cet exemple, un système composé d'un générateur photovoltaïque, de batteries de stockage, d'un groupe diesel et d'un réseau électrique.

Les différentes architectures d'un système hybride se divisent en deux grandes catégories :

- L'architecture série.
- L'architecture parallèle.

I.4.1.1 Architecture série

I.4.1.1.a Configuration à bus à courant continu

Dans cette architecture, les sources de production d'énergie sont toutes connectées au bus à courant continu CC à travers des convertisseurs de puissance. Pour les sources de productions d'énergie à courant alternatif, leur tension est redressée (AC/DC) avant qu'elle ne soit connectée au bus tel que le générateur diesel. Par contre les sources à courant continu (PV, batterie) sont reliées à des convertisseurs DC/DC dans le but d'amplifier ou de réduire la tension d'entrée selon la tension du bus et pour pouvoir gérer le flux d'énergie à la fin [6][7].

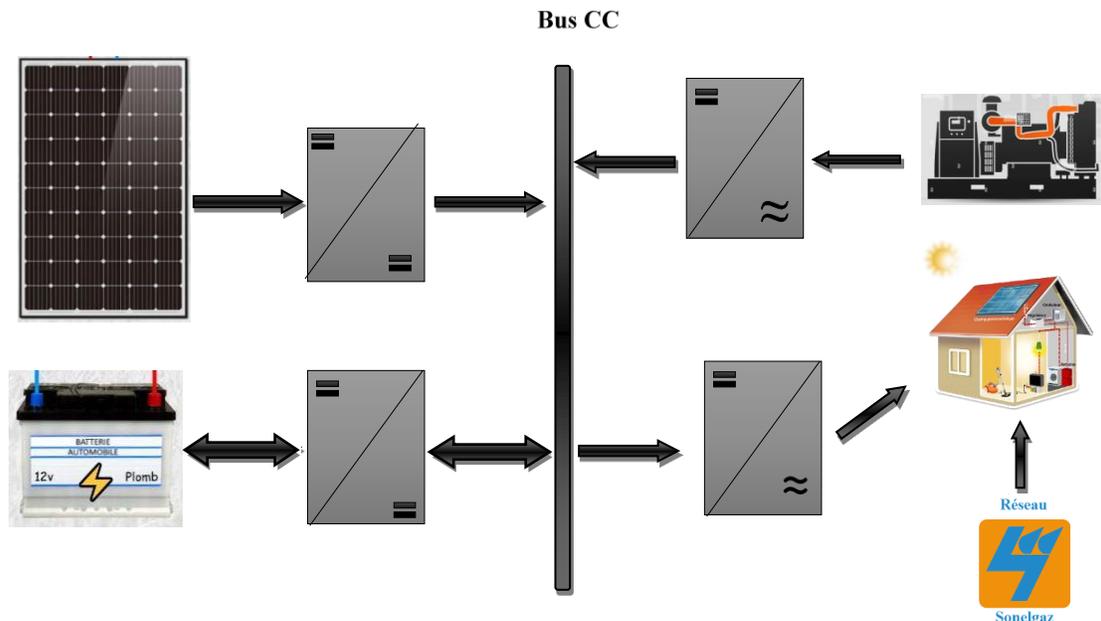


Figure I-3 Configuration série d'une structure hybride à bus continue

L'avantage dans cette architecture réside dans sa simplicité, ce qui simplifie la mise en œuvre de sa commande. Cependant le rendement de l'ensemble du système est relativement faible à cause de certaines pertes au niveau des convertisseurs.

I.4.1.1.b Configuration a bus à courant alternatif

L'architecture a bus a courant alternatif n'était pas possible auparavant, c'est juste après l'optimisation des onduleurs qu'elle est devenue possible. La puissance fournie par chaque source

est centralisée sur un bus alternatif. Pour les sources de production d'énergie alternative, leur sortie est connectée aux convertisseurs AC/AC et les générateurs continus sont reliés à des convertisseurs DC/DC, dont l'objectif est d'avoir des tensions efficaces et la fréquence du bus, pour qu'elles soient connectables à ce dernier continuellement l'alimentation de la charge. Par contre il est difficile d'accorder la tension et la fréquence de chaque source à celle du bus [6] [8].

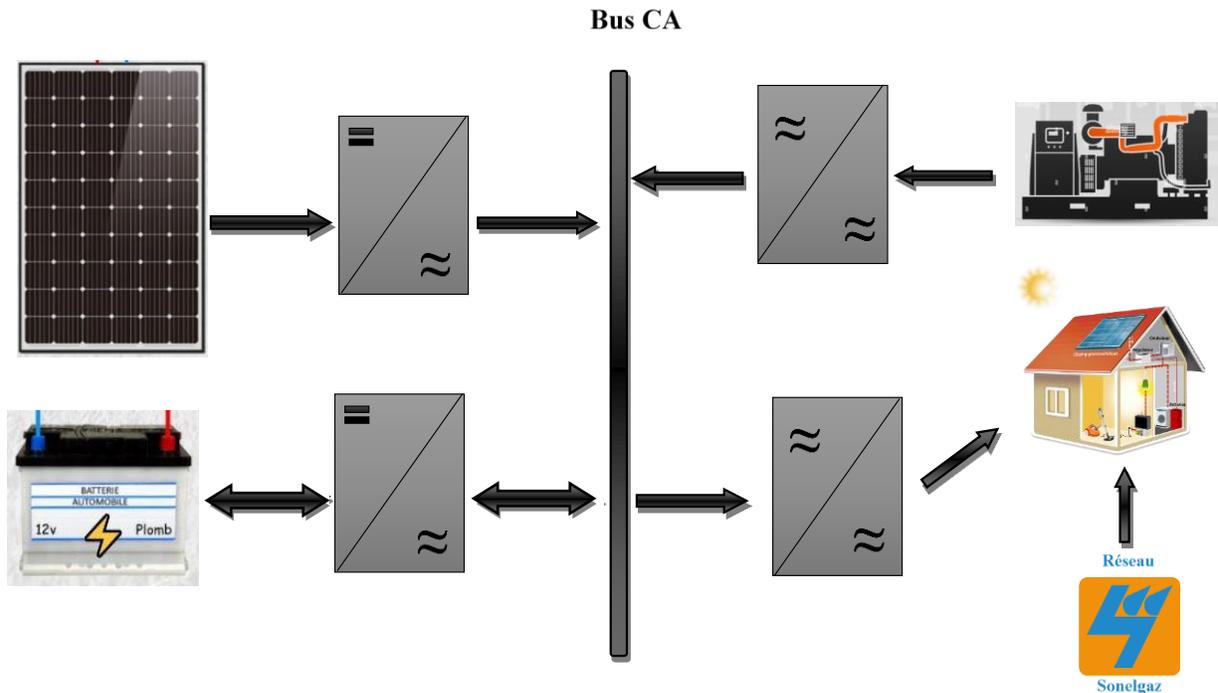


Figure I-4 Configuration série d'une structure hybride à bus alternatif

I.4.1.2 Architecture parallèle

La configuration parallèle utilise deux bus : l'un est à bus continu ou sont connectées les sources continue (batterie et PV) à travers des convertisseurs DC/DC variable pour en avoir la possibilité de varier la tension du bus et d'alimenter par la suite une charge à courant continu [7].

L'autre est à bus alternatif où est connectée une source à courant alternatif (générateur diesel) à travers des convertisseurs AC/AC variable qui résoudra le problème de connexion (fréquence et tension) entre les sources.

Les deux bus sont connectés par l'intermédiaire d'un convertisseur bidirectionnel pour contrôler le transfert de l'énergie dans les deux côtés [8] [1].

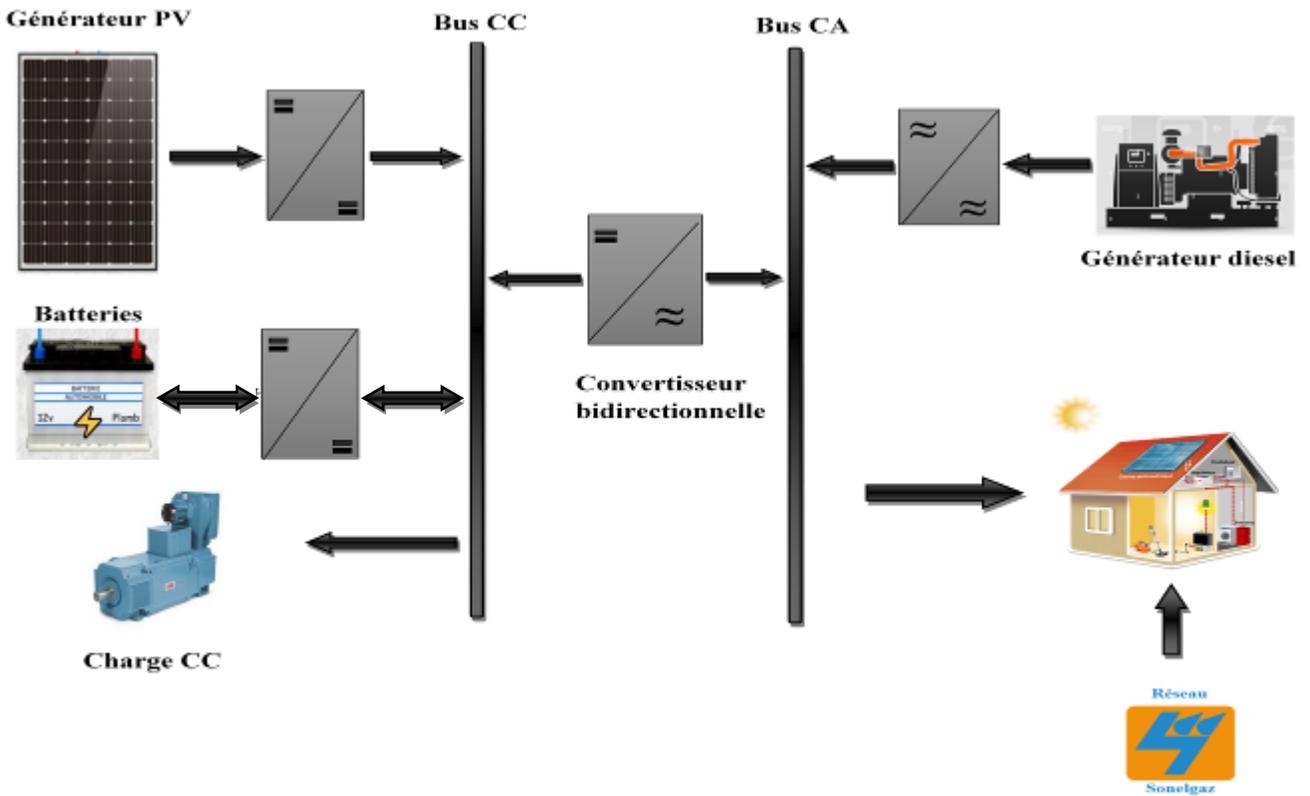


Figure I-5 Configuration parallèle d'une structure hybride.

I.4.2. Les principaux composants d'un système hybride

L'énergie solaire photovoltaïque, l'énergie éolienne ainsi que l'énergie hydraulique sont des énergies renouvelables souvent utilisées dans les systèmes hybrides. Ces systèmes peuvent inclure d'autres composants comme les convertisseurs, les batteries pour le stockage de l'énergie, les charges principales et les charges de délestage. La majorité de ces éléments fonctionnent en parallèle pour avoir un système équilibré qui permet d'atteindre un but précis.

I.4.2.1 Le générateur photovoltaïque

L'énergie solaire est une source d'énergie abondante sur Terre, ce qui fait du photovoltaïque la source d'énergie renouvelable la plus importante et la plus prometteuse, avec un potentiel illimité. Un générateur photovoltaïque est composé de plusieurs cellules assemblées en série et/ou en parallèle. Ces cellules convertissent la lumière solaire captée (les photons) en électricité [1].

Pour utiliser l'énergie PV à grande échelle, les cellules sont connectées entre elles en série pour augmenter la tension et en parallèle pour augmenter le courant.

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un module photovoltaïque.

Le générateur photovoltaïque est réalisé par une association en série et en parallèle de modules photovoltaïques.

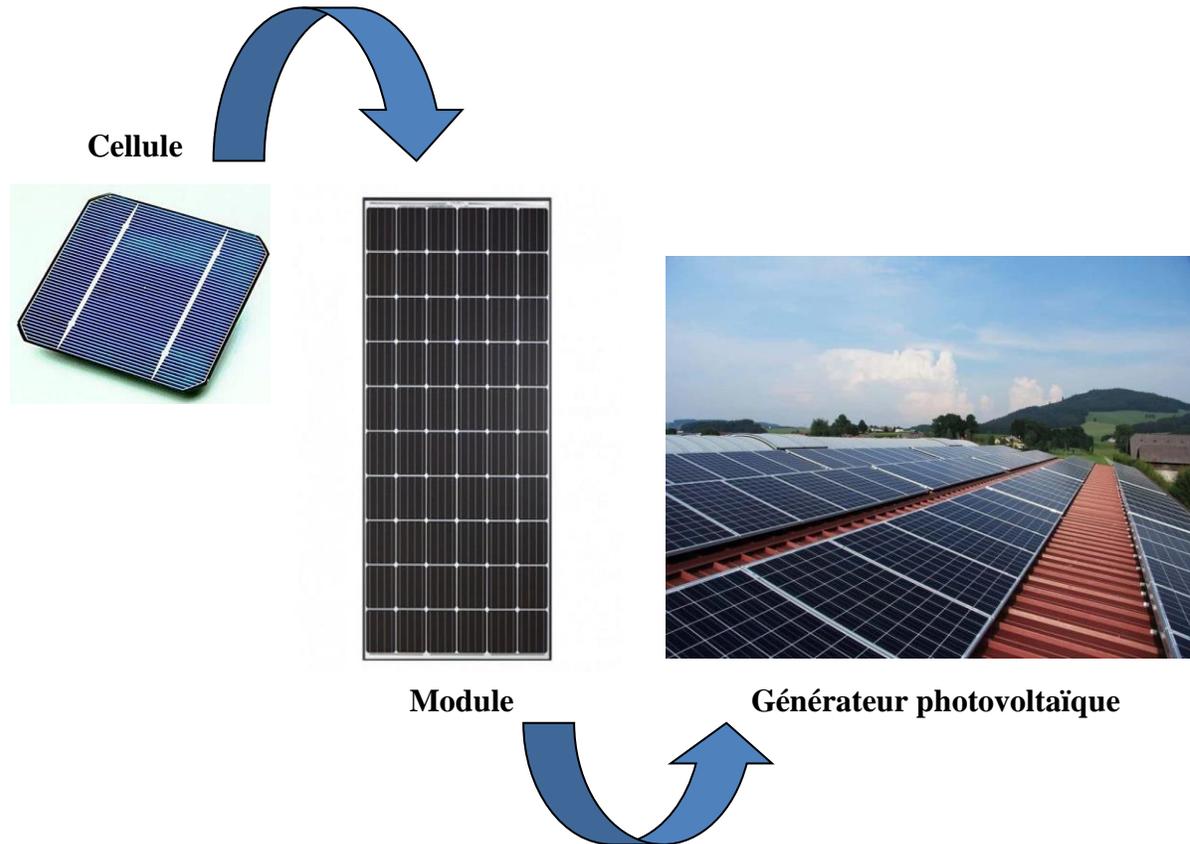


Figure I-6 Les composants d'un champ de modules photovoltaïques

I.4.2.2 Les batteries de stockage

Le stockage de l'énergie est un élément clé des systèmes hybrides électriques et des énergies renouvelables. Les batteries de stockage sont souvent utilisées pour stocker l'énergie excédentaire produite par les sources d'énergie renouvelable pour une utilisation ultérieure.

• Types de batteries :

Les batteries solaires stockent l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques afin d'assurer l'alimentation électrique en toutes circonstances. On distingue généralement trois types de batteries solaires importantes [9] :

- Batterie plomb/acide.

- Batterie Nickel cadmium.
- Batterie lithium ion.

Les batteries plomb acide sont souvent utilisées dans les systèmes PV pour les nombreux avantages qu'elles représentent, elles permettent le stockage de l'énergie solaire pour les systèmes isolés, et restitue la nuit où durant les journées nuageuses cette électricité accumulée durant le temps ensoleillé.

I.4.2.3 Les convertisseurs statiques :

Les convertisseurs servent en premier lieu à charger les batteries de stockages et faire la conversion électrique en deuxième lieu (CA/CC ou inversement) [6]. Dans la structure des systèmes hybrides, on trouve trois types de convertisseurs : les redresseurs, les hacheurs et les onduleurs.

• Hacheur (DC/DC)

Les convertisseurs continus ont pour fonction de fournir une tension continue variable à partir d'une tension continue fixe. La tension continue de départ peut être un réseau alternatif redressé et filtré, une batterie d'accumulateurs, une alimentation stabilisée [9].

• Onduleur (DC/AC)

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu produit par le générateur solaire en courant alternatif monophasé ou triphasé. Un onduleur est habituellement conçu pour fonctionner sur une plage assez réduite [9].

• Redresseur (AC/DC)

Le redresseur commandé est le montage le plus simple des montages d'électronique de puissance et permet de transformer l'énergie alternative provenant en général du réseau électrique en une énergie unidirectionnelle quasi continue que l'on peut diriger vers les moteurs à courant continu [9].

I.4.3. Classification des systèmes hybrides :

Le champ d'application des systèmes hybrides SEH est trop vaste à cause des multiples structures, néanmoins on peut essayer de réaliser un classement par gamme de puissance selon le tableau suivant [1] [7] :

Puissance du SEH en KW	Application
Faible < 10	Système autonome : station de télécommunication, pompage de l'eau et autres application isolée.
Moyenne entre 10 et 250	Micro réseaux isolés, chantiers isolés, alimentation d'un village isolé, l'électrification rurale.
Grande > 500	Grands réseaux isolés : îles, réseaux insulaire.

Tableau I-1 Classification des SEH selon les puissances.

I.4.4. Structures de systèmes hybrides

I.4.4.1 Système hybride avec source d'énergie conventionnelle

C'est un système qui utilise une source d'énergie traditionnelle telle que le diesel, le gaz naturel, l'électricité du réseau en plus d'une ou plusieurs sources d'énergie renouvelable telles que l'énergie solaire, éolienne, hydroélectrique [1].

Le but de ce type de système hybride est d'optimiser l'utilisation de l'énergie conventionnelle pour minimiser les coûts, tout en utilisant les sources d'énergie renouvelables pour réduire la dépendance à l'énergie fossile et réduire les émissions de gaz à effet de serre.

I.4.4.1.a Système photovoltaïque/générateur diesel

Dans cette configuration, l'énergie solaire est utilisée en combinaison avec un groupe électrogène (diesel) pour fournir de l'énergie électrique. Les panneaux solaires convertissent l'énergie lumineuse en énergie électrique, qui est utilisée directement pour alimenter les charges électriques ou stockée dans les batteries. Si l'énergie solaire n'est pas suffisante, le groupe électrogène est activé pour fournir de l'énergie supplémentaire. Le système est conçu pour que le groupe électrogène ne soit activé que lorsque cela est nécessaire pour économiser du carburant et prolonger la durée de vie du générateur. Le système PV/Diesel est souvent utilisé dans les zones isolées ou les zones où il n'y a pas de réseau électrique, comme les zones rurales ou les îles. Il est également utilisé dans les applications mobiles, comme les camping-cars, les bateaux et les véhicules récréatifs.

Dans les zones isolées, le système PV/Diesel permet de fournir de l'électricité fiable et stable à des coûts moins élevés que l'utilisation exclusive de générateurs diesel. Dans les applications mobiles, le système PV/Diesel permet de réduire la consommation de carburant, ce qui peut être important pour les propriétaires de bateaux et de camping-cars qui souhaitent réduire les coûts de carburant et minimiser leur empreinte carbone.

Le système PV/Diesel est également utilisé dans les zones où les fluctuations de la

demande d'énergie sont importantes, comme les zones industrielles, les hôpitaux, les centres commerciaux et les centres de données. Dans ces zones, le système PV/Diesel permet de répondre à la demande d'énergie variable de manière efficace et économique. Il existe plusieurs configurations possibles pour un système hybride PV/Diesel en fonction des besoins spécifiques de l'application. Les configurations les plus courantes sont [10] [11] :

- **Connexion série :**

La connexion série est l'une des configurations possibles pour les systèmes hybrides photovoltaïque/diesel. Dans cette configuration, le générateur diesel est connecté sur le même bus que l'installation photovoltaïque et la batterie, qui sont également liées à ce bus. L'énergie produite par les panneaux photovoltaïques est disponible pour alimenter directement la charge ou pour charger la batterie, tandis que le générateur diesel peut alimenter la charge via des convertisseurs électroniques ou charger la batterie si nécessaire. Les consommateurs sont alimentés à partir de ce bus par l'intermédiaire d'un onduleur. Cette configuration permet une gestion optimale de l'énergie produite par les différentes sources en fonction de la demande de la charge et des conditions climatiques.

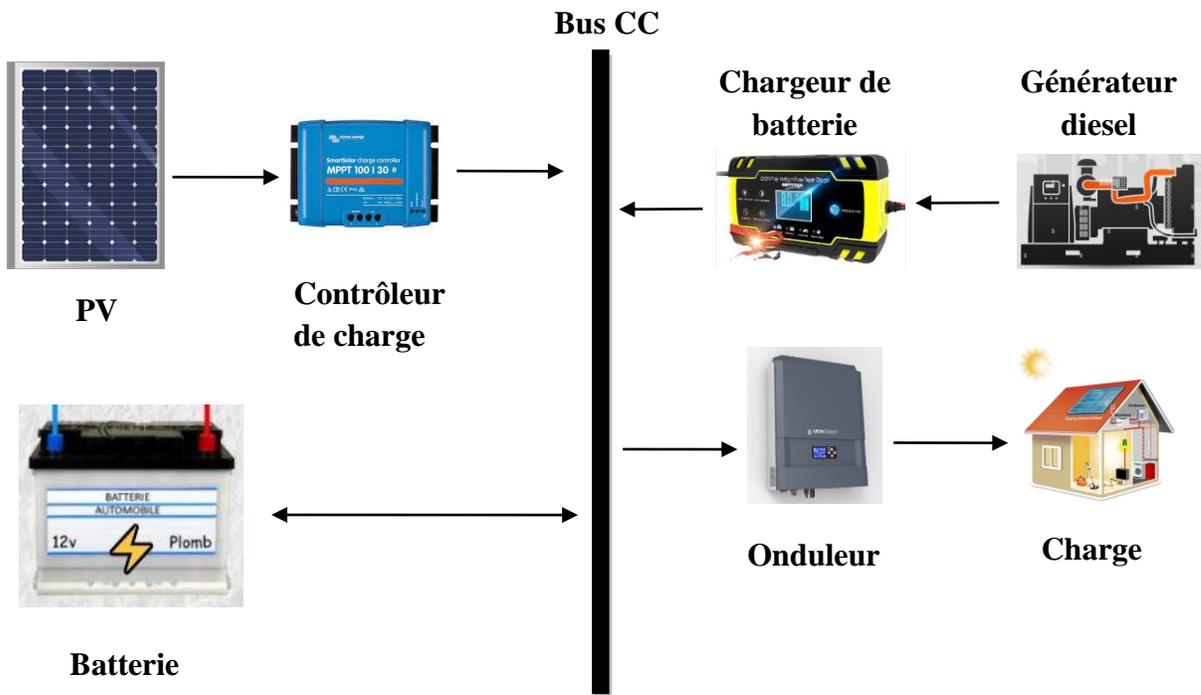


Figure I-7 Structure série d'une configuration photovoltaïque/diesel.

- **Connexion à commutation**

Dans cette configuration, le consommateur peut être alimenté soit par la source conventionnelle, soit par l'installation photovoltaïque et la batterie via l'onduleur. Toutefois, l'alimentation simultanée par les deux sources n'est pas possible. Le générateur diesel peut

charger la batterie par l'intermédiaire d'un redresseur.

La gestion du système doit être automatique pour garantir une utilisation optimale de l'énergie produite et stockée. Cette gestion automatique prend en compte différents paramètres, tels que la charge de la batterie, la demande de puissance, la puissance produite par le générateur diesel et l'installation photovoltaïque, etc [7].

Bien que la configuration à commutation présente quelques inconvénients, tels que la nécessité d'une gestion automatique du système, elle est souvent utilisée car elle permet une utilisation efficace et optimale de l'énergie produite par les différentes sources.

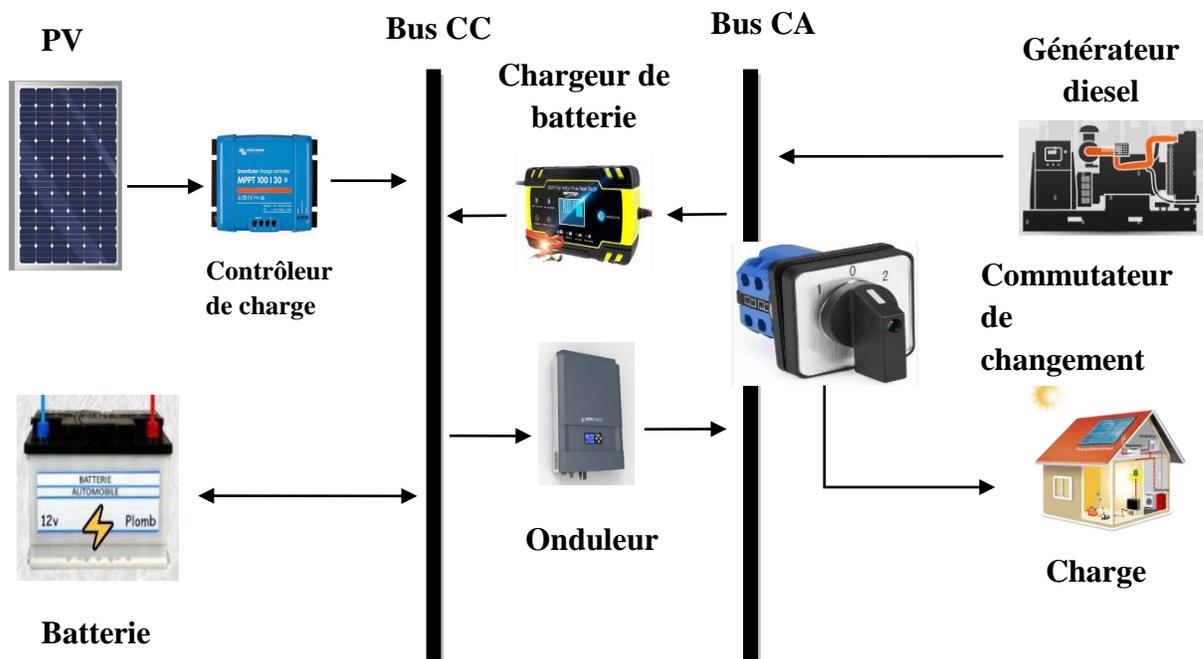


Figure I-8 Structure d'une configuration photovoltaïque/diesel à commutation.

- **Connexion parallèle**

Dans la configuration à connexion parallèle d'un système hybride photovoltaïque/source conventionnelle, le générateur diesel est interconnecté sur le bus de courant alternatif, tandis que l'installation photovoltaïque et la batterie sont liées sur un autre bus de courant continu. Les deux bus sont connectés à l'aide d'un convertisseur électronique bidirectionnel, qui peut travailler soit comme redresseur, lorsque le générateur diesel couvre la consommation électrique et participe dans le chargement de la batterie, soit comme onduleur, quand la charge (ou une part d'elle) est satisfaite par les panneaux photovoltaïques et/ou la batterie. Cela permet à la charge d'être

alimentée par les deux bus simultanément.

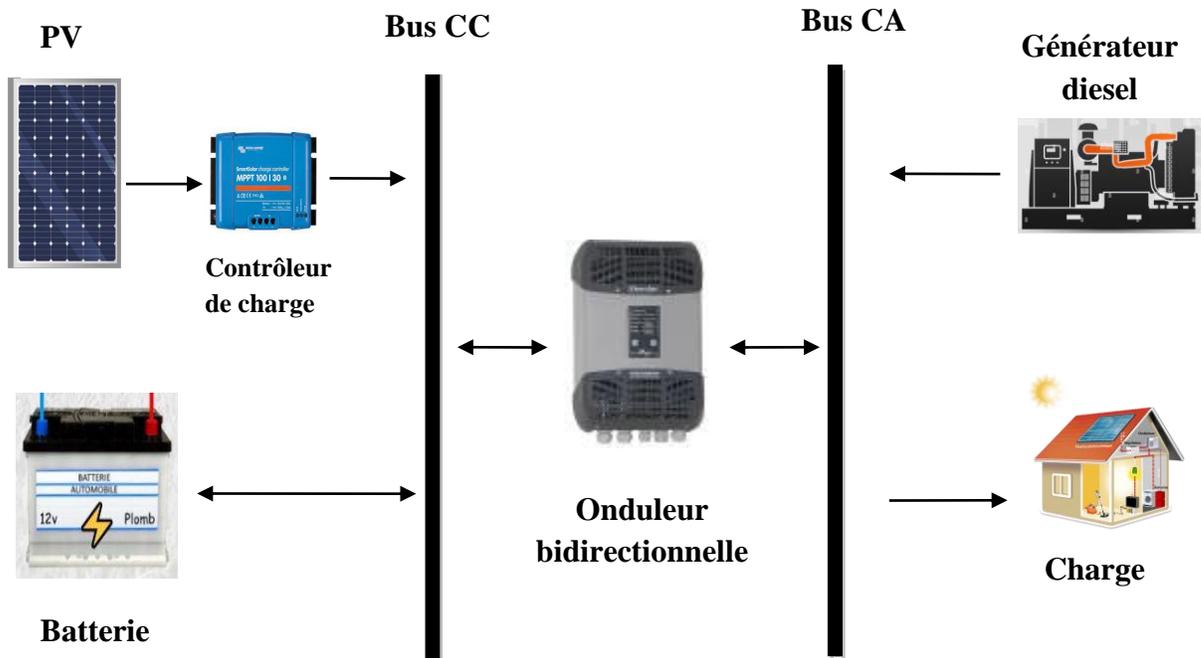


Figure I-9 Structure parallèle d'une configuration photovoltaïque/diesel

I.4.4.1.b Système photovoltaïque/éolien/diesel

Le système hybride solaire-éolien-diesel est une combinaison de trois sources d'énergie différentes, à savoir l'énergie solaire, l'énergie éolienne et l'énergie diesel [11]. Le système utilise des panneaux solaires pour capturer l'énergie solaire pendant la journée et des éoliennes pour capter l'énergie éolienne lorsqu'il y a du vent. Ces deux sources d'énergie sont utilisées pour alimenter la charge directement ou pour recharger la batterie du système. En cas de faible luminosité ou de faible vent, le générateur diesel est utilisé pour produire de l'électricité et recharger la batterie. La combinaison de ces trois sources d'énergie permet d'obtenir une alimentation stable et continue, avec une utilisation efficace des ressources disponibles, réduisant ainsi la dépendance vis-à-vis des sources d'énergie conventionnelles et coûteuses. Ce système hybride est particulièrement utile dans les zones isolées où l'accès aux sources d'énergie conventionnelles est limité ou coûteux, ou lorsqu'une alimentation électrique stable est nécessaire pour des applications critiques.

I.4.4.1.c Système hydroélectrique/diesel

Le système hybride hydroélectrique-diesel est une combinaison d'une source d'énergie renouvelable, l'hydroélectricité, avec une source d'énergie conventionnelle, le diesel.

L'hydroélectricité est produite à partir de la force de l'eau qui fait tourner une turbine, générant ainsi de l'électricité. Cette source d'énergie renouvelable est généralement fiable, mais sa production peut varier en fonction des saisons et des conditions météorologiques.

Le générateur diesel, quant à lui, est utilisé comme source d'énergie de secours pour compenser les fluctuations de la production d'électricité de l'hydroélectricité. Il est également utilisé pour fournir de l'électricité lorsque la production d'hydroélectricité est insuffisante.

La gestion de ce système hybride est souvent automatisée pour garantir une alimentation électrique constante et fiable. Les contrôleurs de charge et les onduleurs sont utilisés pour réguler la production et la consommation d'énergie, et pour basculer automatiquement entre l'hydroélectricité et le diesel en fonction des besoins énergétiques.

Ce système est idéal pour les zones éloignées qui disposent d'une source d'eau suffisante pour produire de l'électricité à partir de l'énergie hydraulique. Ce système est souvent utilisé pour les installations isolées telles que les villages, les centres touristiques ou les stations de pompage. Il est également adapté pour les sites où les niveaux d'eau sont élevés et où le potentiel de production d'énergie hydroélectrique est important. Cependant, il est important de noter que la faisabilité et la rentabilité d'un tel système dépendent de nombreux facteurs, tels que la disponibilité d'eau, les coûts d'installation et de maintenance, et les coûts du carburant diesel.

I.4.4.2 Système hybride sans source d'énergie conventionnelle

C'est un système qui utilise uniquement des sources d'énergie renouvelables pour produire de l'électricité. Les sources d'énergie renouvelables les plus courantes dans les systèmes hybrides sont l'énergie solaire, éolienne, hydraulique et géothermique. Ces systèmes sont souvent utilisés dans des zones reculées ou des sites isolés où l'accès à l'électricité est limité ou inexistant.

I.4.4.2.a Systèmes hybrides photovoltaïque/stockage

C'est une combinaison d'un panneau solaire photovoltaïque et d'une batterie de stockage. Lorsque le panneau solaire produit de l'énergie, une partie est utilisée pour alimenter les appareils électriques et une partie est stockée dans la batterie pour une utilisation ultérieure [10]. Si le panneau solaire ne produit pas suffisamment d'énergie pour alimenter tous les appareils électriques, l'énergie stockée dans la batterie peut être utilisée pour compléter la demande en énergie [1]. Cela permet une utilisation plus efficace de l'énergie solaire, en maximisant la quantité d'énergie utilisée et en minimisant le gaspillage.

I.4.4.2.b Système hybride photovoltaïque/éolien/stockage

Un système hybride photovoltaïque/éolien avec batterie combine l'énergie solaire et l'énergie éolienne pour fournir de l'électricité, tout en stockant l'énergie excédentaire dans une batterie pour une utilisation ultérieure. Ce système est particulièrement efficace dans les zones où l'énergie solaire et l'énergie éolienne sont complémentaires, c'est-à-dire lorsque l'ensoleillement est

faible et le vent est fort, ou vice versa.

Le système se compose d'un panneau solaire, d'une éolienne, d'un régulateur de charge, d'un onduleur, d'une batterie et d'un contrôleur de charge. L'énergie produite par le panneau solaire et l'éolienne est d'abord envoyée à un régulateur de charge, qui s'assure que la batterie est chargée en toute sécurité et efficacement. Lorsque la batterie est pleine, le régulateur de charge envoie l'énergie excédentaire à l'onduleur, qui convertit le courant continu en courant alternatif utilisable pour alimenter des appareils électriques.

En cas de faible production d'énergie solaire ou éolienne, la batterie fournit l'énergie nécessaire pour alimenter les appareils électriques. Lorsque la batterie est faible, le système passe en mode de charge pour recharger la batterie à partir de l'énergie solaire ou éolienne disponible.

Les avantages d'un système hybride photovoltaïque/éolien avec batterie sont qu'il peut fournir une alimentation électrique fiable et autonome, réduire les coûts d'énergie à long terme et réduire l'impact environnemental en réduisant la dépendance aux combustibles fossiles. Cependant, les coûts initiaux d'installation et de maintenance peuvent être élevés, et la performance du système dépendra de la qualité de l'installation, de la régulation de charge et de la batterie [10].

I.4.4.2.c Système hybride éolien/hydroélectrique

La centrale hydro-éolienne d'El Hierro est un exemple de système hybride renouvelable qui a été réalisé. Il s'agit d'un système combinant une installation éolienne et une centrale hydroélectrique de pompage-turbinage pour répondre à la demande en électricité de l'île d'El Hierro, dans les îles Canaries en Espagne [10].

Le parc éolien est conçu pour fournir une puissance crête de 11,5 MW grâce à cinq éoliennes et d'une centrale hydroélectrique de pompage-turbinage de 11,3 MW, qui utilise de l'eau de mer pour stocker l'énergie produite par les éoliennes. Ce système permet de fournir plus de 50% de la demande en électricité de l'île à partir d'énergies renouvelables.

I.4.5. Avantages et inconvénients des systèmes hybrides

- **Avantages** :

- La capacité à produire de l'électricité de manière fiable et constante grâce à la combinaison de différentes sources d'énergie.
- Système flexible qui peut être adapté en fonction des conditions météorologiques et des besoins en énergie.
- Réduction considérable des émissions de gaz à effet de serre par rapport aux centrales électriques traditionnelles.

• Inconvénients :

- Nécessite un investissement initial important pour la mise en place des différentes sources d'énergie.
- Les variations climatiques qui peuvent entraîner une production d'électricité irrégulière.
- Le stockage de l'énergie produite peut être un défi car les batteries nécessaires peuvent être coûteuses et difficiles à recycler.

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une présentation détaillée sur les différentes sources d'énergies renouvelables existantes ainsi que sur les systèmes électriques hybrides et leurs composants ainsi que les différentes structure des systèmes hybrides.

En conclusion, le système hybride à énergies renouvelables offre de nombreux avantages en termes de production d'électricité fiable, flexible et respectueuse de l'environnement. Bien qu'il présente également quelques inconvénients, ce type de système est de plus en plus utilisé dans le monde entier pour répondre aux besoins en énergie de manière durable et efficace.

Chapitre II.

Modélisation du système hybride

II.1. Introduction

Après avoir cité les divers composants du système SEH, nous allons procéder à la modélisation d'un panneau photovoltaïque afin d'obtenir les différentes caractéristiques du courant et de la puissance en fonction de la tension, ainsi que l'influence des paramètres et conditions météorologiques spécifiques sur le fonctionnement du système photovoltaïque.

Grâce aux méthodes de poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking) dites méthodes (MPPT), le rendement des systèmes photovoltaïques (PV) est considérablement amélioré. Parmi ces méthodes on proposera celle de la perturbation et observation (P&O) avec son algorithme et caractéristiques. Puis la modélisation de la batterie et du hacheur élévateur et abaisseur.

II.2. Structure de la chaîne de conversion photovoltaïque

Notre système de conversion photovoltaïque est constitué de panneaux photovoltaïques, qui servent de générateur photovoltaïque, ainsi qu'un convertisseur DC/DC (hacheur) qui assure l'adaptation entre la source (GPV) et la charge pour un transfert de puissance maximal. Pour ce faire, nous maintenons le point de fonctionnement sur ou près du point de puissance maximale (PPM) pour toutes les conditions de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristiques de charge, etc.), en utilisant un algorithme MPPT qui permet de trouver le PPM que chaque panneau solaire photovoltaïque peut fournir. Ce système alimente une batterie en tant que charge en maintenant le point de fonctionnement sur ou assez proche du PPM (point de puissance maximale) pour n'importe quelle condition de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc...) en utilisant un algorithme MPPT qui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. Ce système alimente une charge (Batterie).

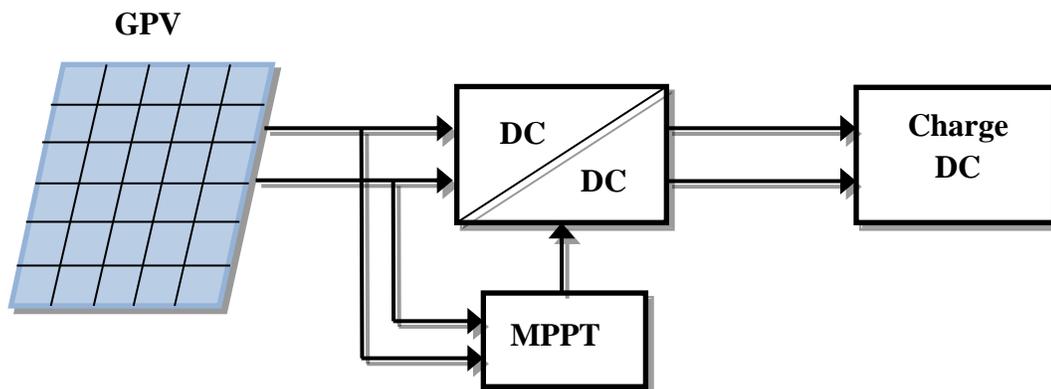


Figure II-1 Chaîne de structure photovoltaïque.

II.3. Modélisation du générateur photovoltaïque

Pour avoir un modèle optimal qui correspond au point de puissance maximale, il est important de modéliser le générateur photovoltaïque.

Il existe différents modèles de générateurs photovoltaïques dans la littérature technique, tels que ceux à une, deux ou trois diodes. La différence entre ces modèles réside dans le nombre de paramètres pris en compte pour calculer la tension et le courant produits par le générateur photovoltaïque.

On a choisi le modèle à une diode car il tient compte des variations du courant et de la tension de la cellule photovoltaïque en fonction des conditions atmosphériques. Il est caractérisé par son schéma électrique équivalent représenté sur la figure (II-3). Il se compose d'une source de courant symbolisant la conversion du flux lumineux en énergie électrique, d'une résistance parallèle R_{sh} caractérisant le courant de fuite à la surface de la cellule dû à la non idéalité de la zone P et N et des impuretés près de la jonction. Une résistance série R_s représente les diverses résistances de contact et de connexions [12] [4].

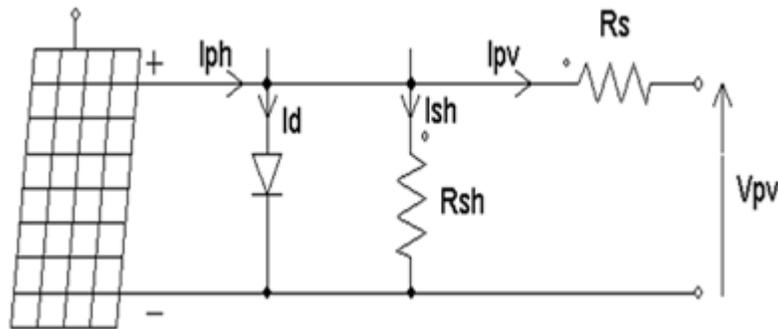


Figure II-2 Schéma électrique du générateur photovoltaïque.

- Le courant généré par le module photovoltaïque est donné par la loi de Kirchhoff :

$$I_{PV} = I_{PH} - I_D - I_{SH} \quad (\text{II-1})$$

Tel que :

I_{PV} : Le courant délivré par le module [A].

I_{PH} : Courant produit par la photopile [A].

I_D : Courant de diode [A].

I_{SH} : Le courant shunt [A].

- Le courant produit par la photopile est donné par :

$$I_{Ph} = P_1 \cdot E_S \left(1 + P_2 (E_S - E_{Sref}) \right) + P_2 (E_S - E_{Sref}) + P_3 (T_J - T_{Jref}) \quad (\text{II-2})$$

Tel que :

E_{Sref} : L'ensoleillement sous conditions STC (Standard Test Conditions) [W/m^2].

T_{Jref} : La température sous conditions STC [K].

T_J : Température de jonction en Kelvin [K].

E_S : Ensoleillement [W/m^2].

P_1, P_2, P_3 : Paramètres constants.

➤ Le courant de la diode est donné par :

$$I_D = I_{od} \left[\exp \left(\frac{q(V_{PV} + R_S I_{PV})}{k.A.N_S.T_J} \right) - 1 \right] \quad (\text{II-3})$$

$$I_{od} = P_4 \cdot T_J^3 \cdot \exp \left[\frac{E_g}{k.T_J} \right] \quad (\text{II-4})$$

Tel que :

I_{od} : Courant de saturation de la diode [A].

N_S : Nombre totale de cellules connectées en série ou en parallèle.

E_g : Energie de gap.

V_{PV} : La tension délivrée par le module [V].

q : La charge élémentaire ($1.6 \cdot 10^{-19}$ C).

k : La constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ (SI)).

A : Le coefficient d'idéalité de la cellule.

P_4 : Paramètre constant.

R_S : Résistance série de la cellule [Ω].

➤ Le courant de résistance shunt est donné par :

$$I_{Sh} = \frac{V_{PV}}{R_{Sh}} \quad (\text{II-5})$$

➤ L'équation globale modélisant le générateur photovoltaïque est la suivante :

$$I_{pv} = \left(P_1 \cdot E_s \left(1 + P_2 (E_s - E_{sref}) \right) + P_3 (T_J - T_{Jref}) \right) - P_4 \cdot T_J^3 \cdot \exp\left[\frac{E_g}{k \cdot T_J}\right] \left[\exp\left(\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{k \cdot A \cdot N_s \cdot T_J}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_{sh}} \quad (\text{II-6})$$

II.4. Caractéristique électrique du panneau photovoltaïque

Pour l'étude de notre système hybride nous avons utilisé un panneau solaire de 80W, le tableau suivant indique les paramètres électriques :

Puissance max du panneau P_{mpp}	80 W
Courant au point de puissance max I_{mpp}	4.38 A
Tension au point de puissance max V_{mpp}	18.3 V
Courant de court-circuit I_{cc}	4.68 A
Tension en circuit ouvert V_{co}	22.5 V
Coefficient d'incrémentatation du courant	1.4mA/°C
Coefficient d'incrémentatation de la tension	-152mV/°C

Tableau II-1 Caractéristiques du panneau utilisé.

II.5. Caractéristique courant-tension et puissance-tension sous les conditions STC

La caractéristique courant-tension et puissance-tension illustrée dans les figures (II-3) et (II-4) décrit le comportement du générateur photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques spécifiques (niveau d'éclairement $G=1000 \text{ W/m}^2$ et température ambiante $T=25^\circ\text{C}$) :

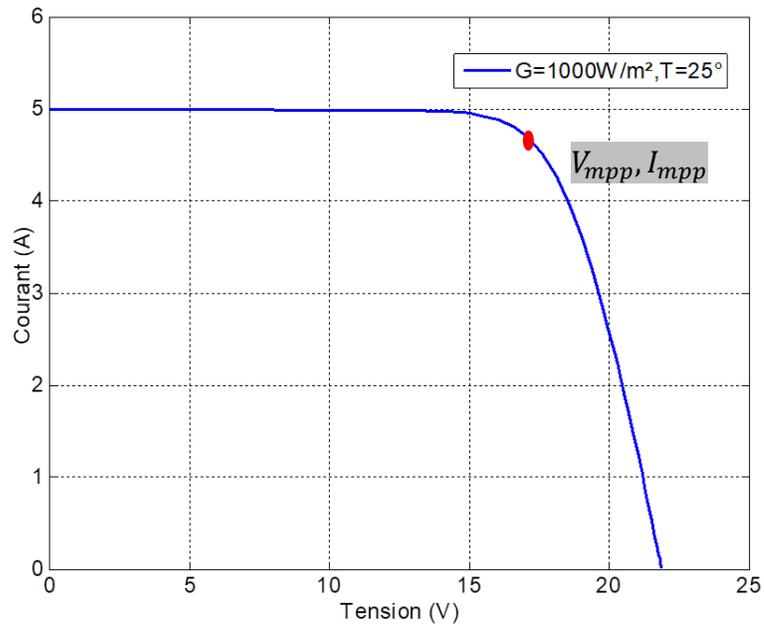


Figure II-3 Caractéristiques courant-tension sous conditions STC.

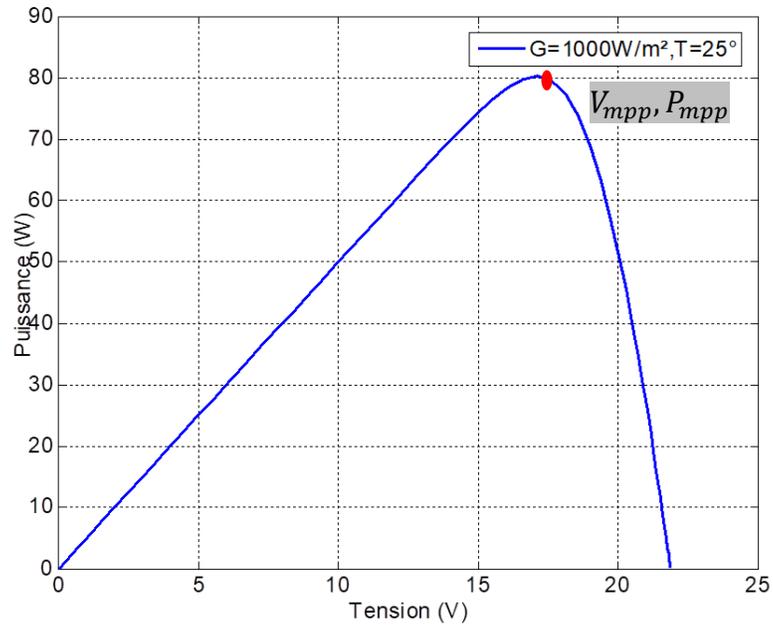


Figure II-4 Caractéristiques puissance-tension sous conditions STC.

II.6. Influence de la température et l'ensoleillement sur les caractéristiques d'un PV

II.6.1. Influence de la température

La tension à circuit ouvert décroît avec la température (voir figure II-5). Plus la température est élevée, plus V_{oc} est faible, par contre le courant de court-circuit a augmenté légèrement, mais cette hausse est vraiment faible par rapport à la variation de la tension et que l'influence de la température sur le courant de court-circuit est souvent négligée vers la fin.

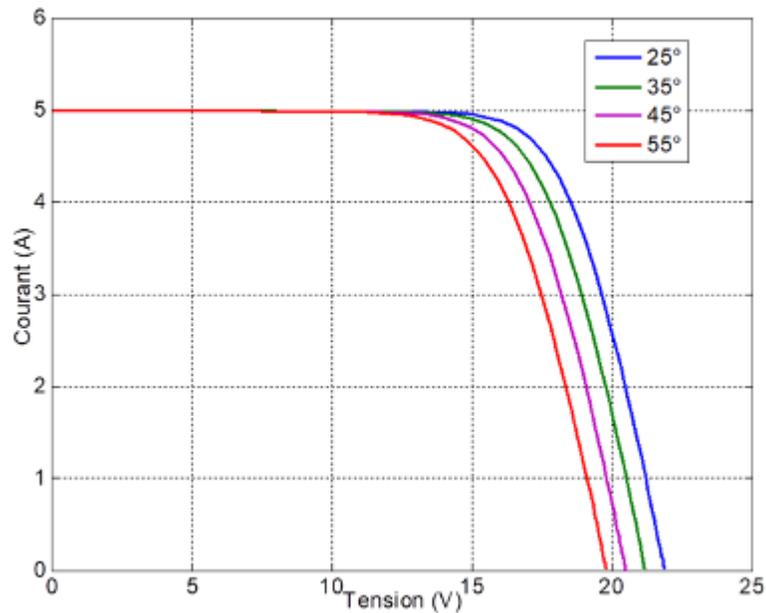


Figure II-5 Caractéristiques courant-tension pour différents niveaux de température à éclairement constant $1000\text{W}/\text{m}^2$.

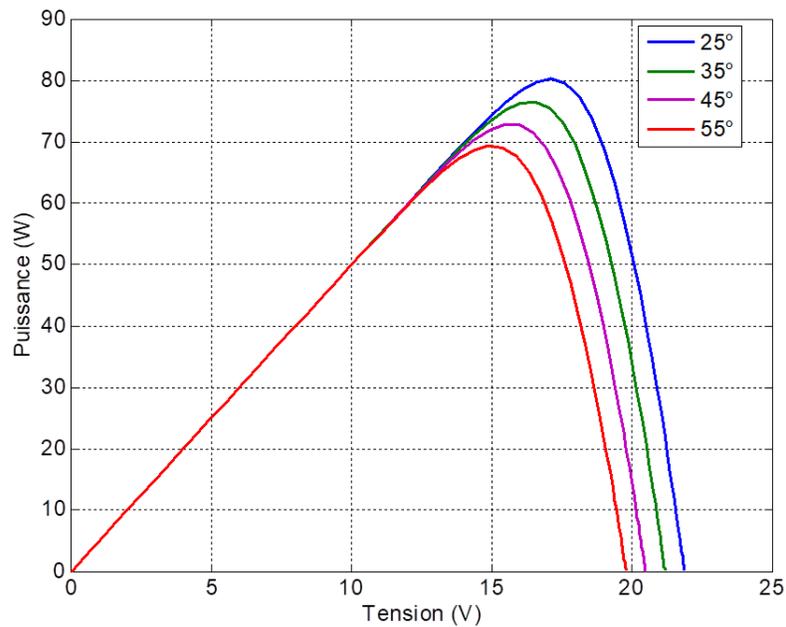


Figure II-6 Caractéristiques puissance-tension pour différents niveaux de température à éclairement constant 1000W/m².

Dans la figure (II-6) l'augmentation de la température a un effet décroissant sur la puissance et la tension de circuit ouvert.

II.6.2. Influence de l'éclairement

Lorsque l'éclairement varie pour une température donnée, le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'éclairement. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert V_{co} varie très peu sur les panneaux photovoltaïques comme illustrés sur les figures (II-7) et (II-8) :

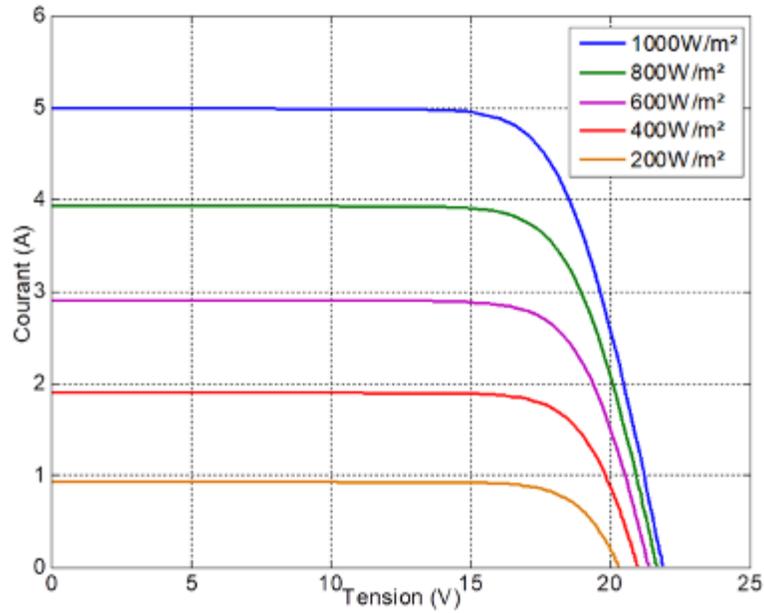


Figure II-7 Caractéristiques courant-tension pour différents niveaux d'éclairement à température constante 25°C.

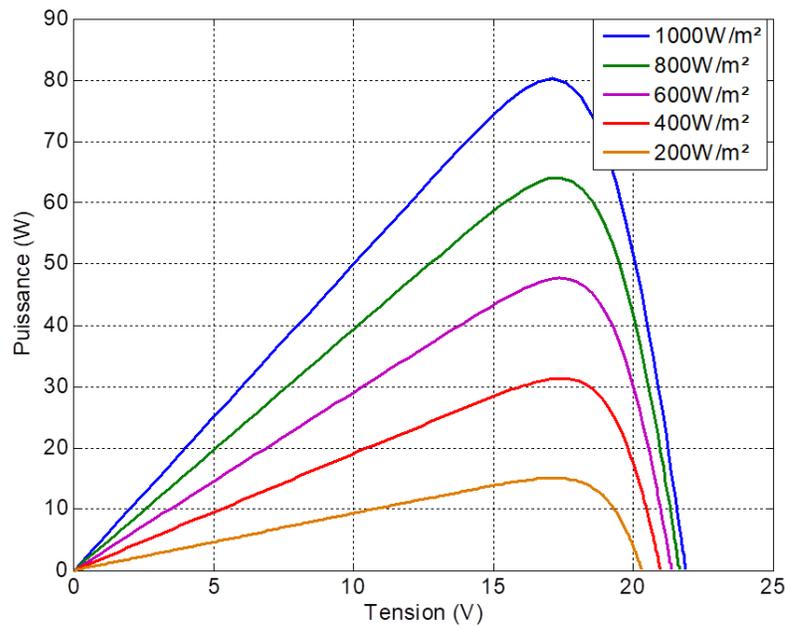


Figure II-8 Caractéristiques puissance-tension pour différents niveaux d'éclairement à température constante 25°C.

II.7. Principe de la commande MPPT

En théorie, une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), associée à un convertisseur DC/DC d'adaptation permet (dans le cadre du PV) de réaliser l'adaptation entre la source GPV et la charge pour un transfert de puissance maximal. Ceci est obtenu en maintenant le point de fonctionnement sur ou assez proche du PPM (point de puissance maximale) pour n'importe quelle condition de fonctionnement (rayonnement, température, caractéristique de charge, etc...).

L'étage d'adaptation utilise un algorithme MPPT qui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque.

Plusieurs algorithmes ont été proposés pour la réalisation de la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking). Parmi ces algorithmes de recherche du point à puissance maximale, existant dans la littérature technique, nous citons :

- La méthode d'ajustement de courbe.
- La méthode Look-up table.
- La méthode de la tension de circuit ouvert.
- La méthode de court-circuit.
- Méthode de Hill Climbing, Perturb & Observe (P&O).
- Commande d'incrément de conductance (IncCond).
- Algorithme basé sur mode glissant, logique floue, réseaux de neurones.

Dans notre travail, nous avons choisi d'utiliser la commande P&O, qui est largement utilisée en raison de sa simplicité d'implémentation. Cependant, cette méthode présente quelques inconvénients, notamment des oscillations tour du point de puissance maximale (PPM) en régime permanent, car elle doit être répétée périodiquement [2] [13]. Le principe et l'algorithme de cette méthode de commande sont illustrés sur les figures (II-9) (II-10) :

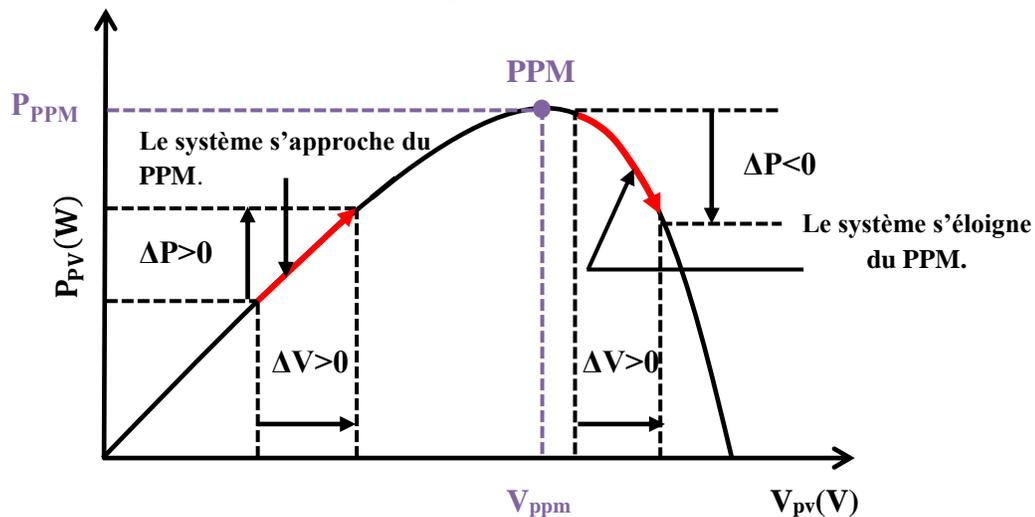


Figure II-9 Schéma illustratif du principe de la commande MPPT par la P&O.

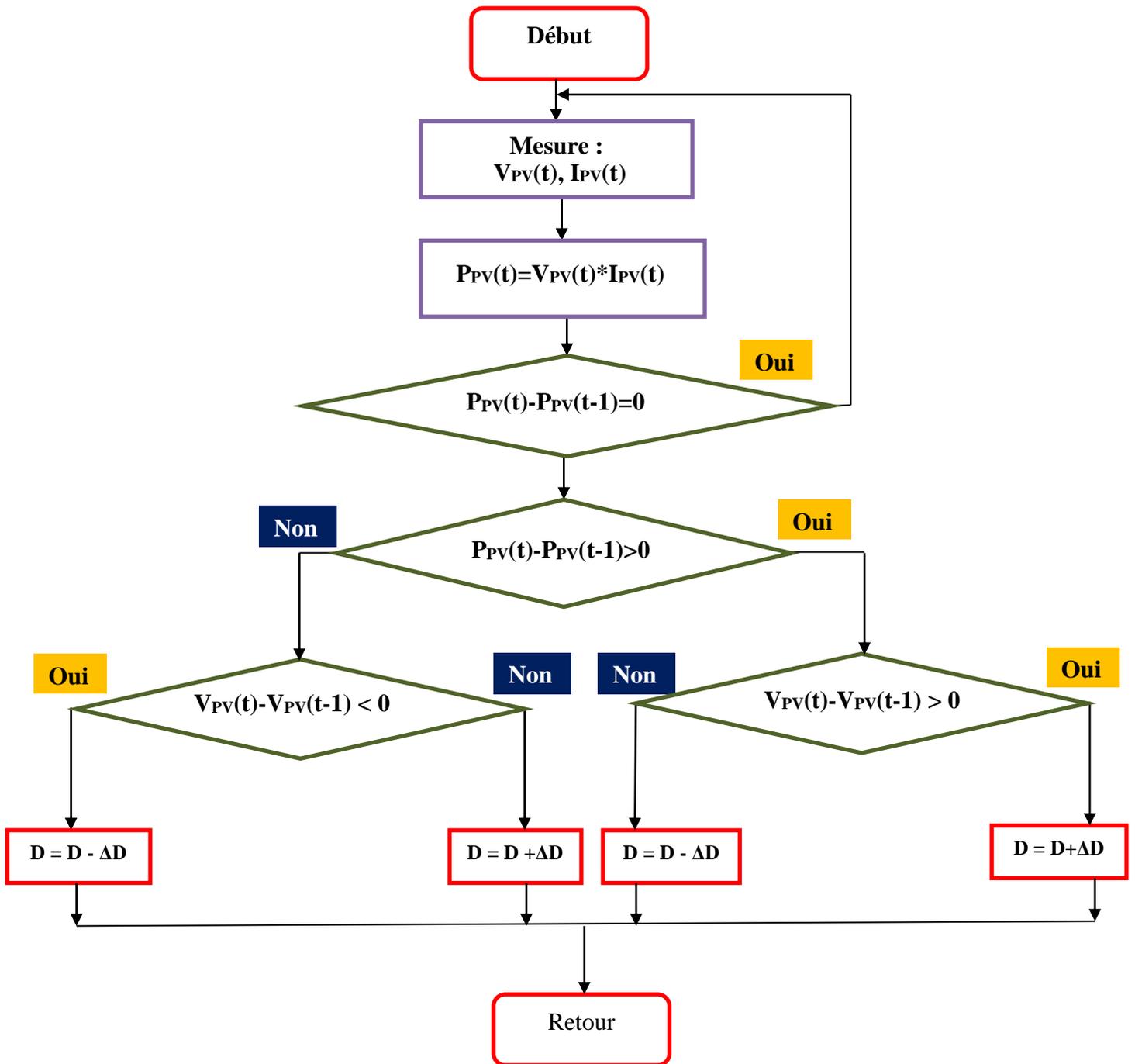


Figure II-10 Organigramme de l’algorithme MPPT (P&O).

➤ **Résultats de simulation :**

Les résultats de simulation illustrés par les figures concernent l'algorithme P&O. On a choisi cet algorithme "perturbation et observation" car c'est la méthode la plus utilisée du fait de sa simplicité.

La simulation a été faite en utilisant le logiciel MATLAB pour un panneau de 80Wc, pour différentes variations de l'éclairement ($E_s=200-400-600-800-1000 \text{ W/m}^2$) et de températures ($T=25-35-45-55-65 \text{ }^\circ\text{C}$). Les résultats obtenus sont représentés sur les figures suivantes :

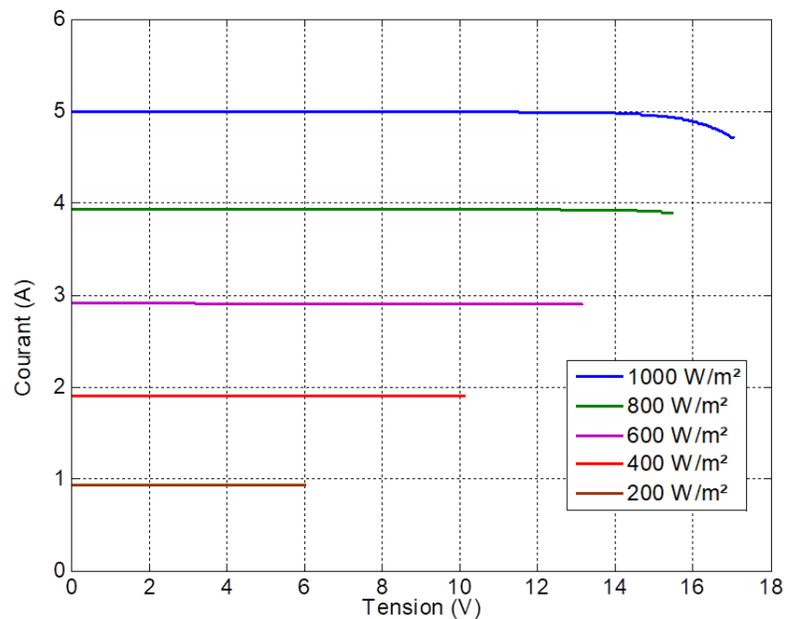


Figure II-11 Caractéristique courant-tension pour différents éclairements avec la réponse de l'algorithme (P&O).

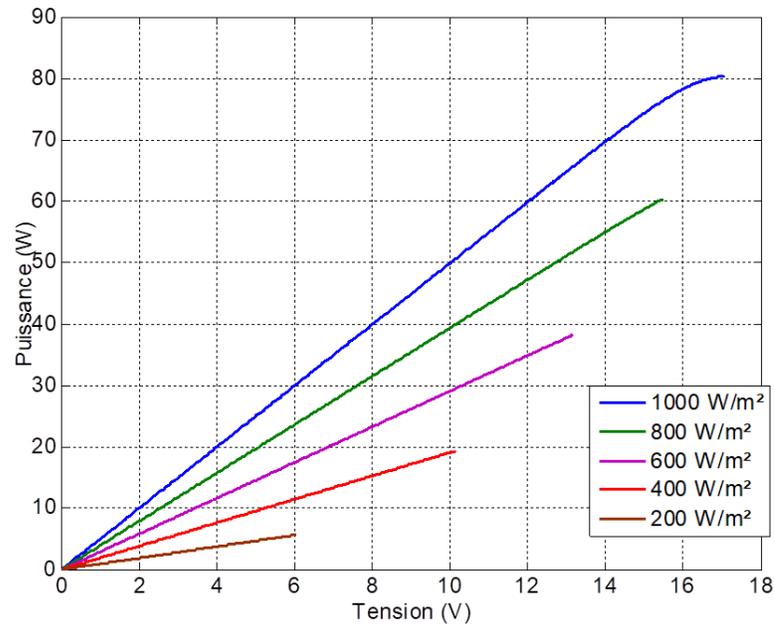


Figure II-12 Caractéristique courant-tension pour différents éclairagements avec la réponse de l'algorithme (P&O).

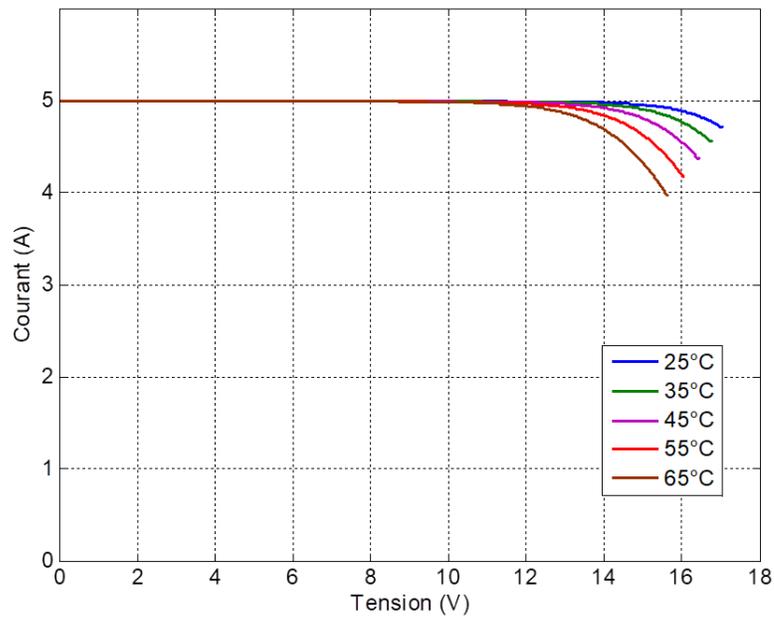


Figure II-13 Caractéristique courant-tension pour différentes températures avec la réponse de l'algorithme (P&O).

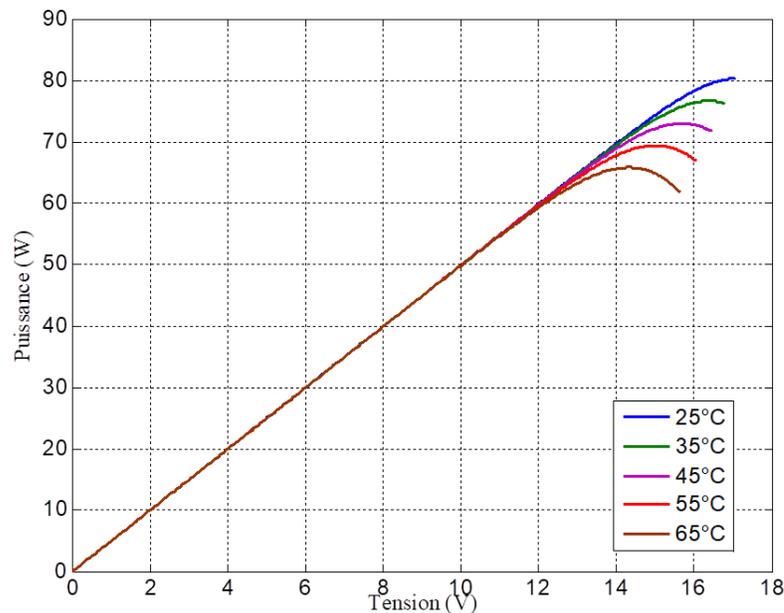


Figure II-14 Caractéristique puissance-tension pour différents températures avec la réponse de l'algorithme (P&O).

Pour les deux tests en variant l'ensoleillement puis la température on remarque toujours une convergence de la puissance vers le point de puissance maximal PPM, le courant converge également vers un point qui correspond à la valeur de la puissance maximal.

II.8. Convertisseur DC/DC (Hacheur BOOST)

Le convertisseur statique utilisé dans cette étude est de type DC/DC élévateur (BOOST). Le hacheur a pour but de protéger l'état de la sortie en tension dans le système photovoltaïque.

En plus de réguler la tension de sortie, le convertisseur DC/DC fonctionne comme le suiveur (tracker) du point de puissance maximale (PPM) [1]. Vu que l'intensité du rayonnement change, le courant et la tension du générateur solaire fluctuent constamment et le PPM du GPV se déplace également. Avec un suiveur PPM, la puissance de sortie du GPV est presque optimale. Le hacheur peut être utilisé comme régulateur de mode de commutation pour convertir une tension continue normalement non régulée en une sortie de tension continue.

Son schéma électrique équivalent est présenté par la figure (II-15) :

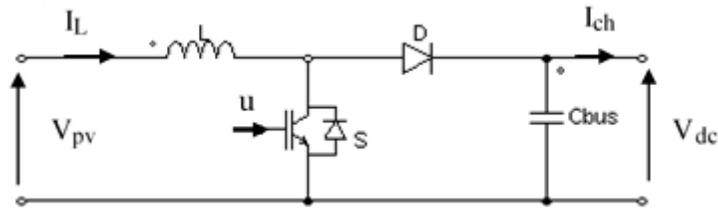


Figure II-15 Circuit électrique d'un hacheur (BOOST).

Le convertisseur est représenté par le système d'équation suivant :

$$V_{PV} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{DC}(1 - u) \tag{II-7}$$

$$(1 - u)I_L = C \frac{dV_{DC}}{dt} + I_{ch} \tag{II-8}$$

Tel que

u : représente le rapport cyclique.

II.9. Modélisation du système de stockage (Batterie)

Il existe plusieurs types de modèles de batteries. Pour notre étude nous avons opté pour le modèle CIEMAT ou la batterie est décrite uniquement par deux éléments, une source de tension et une résistance interne, dont les valeurs dépendent d'un certain nombre de paramètres [14]. Le modèle est illustré avec la Figure (II-16) :

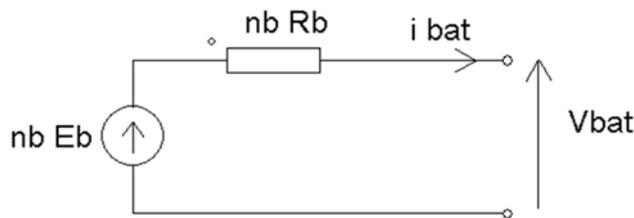


Figure II-16 Schéma électrique de batterie.

On a donc pour n_b cellules en série, la tension aux bornes de la batterie est donnée ci-dessous :

$$V_{bat} = n_b E_b + n_b R_b I_{bat} \tag{II-9}$$

L'état de charge de la batterie EDC est définit par l'expression :

$$EDC = 1 - \frac{Q_m}{C_{bat}} \quad (\text{II-10})$$

Tel que :

$$Q_m = I_{bat} \times t_{bat} \quad (\text{II-11})$$

$$C_{bat} = \frac{Q_m}{V_{bat}} \quad (\text{II-12})$$

Avec :

t_{bat} : La durée de fonctionnement de la batterie.

$I_{bat,moy}$: Le courant de décharge.

Q_m : La quantité de charge manquante à la batterie.

C_{bat} : La capacité nominale de la batterie.

II.9.1. Modélisation de la capacité C_{bat} :

La capacité C_{bat} donne la quantité d'énergie que peut restituer la batterie en fonction du courant moyen de décharge $I_{bat,moy}$ et elle est donnée par l'équation :

$$C_{bat} = \frac{1.67 \times C_{10}}{1 + 0.67 \times \left(\frac{I_{bat,moy}}{I_{10}}\right)^{0.9}} (1 + 0.005 \Delta T) \quad (\text{II-13})$$

Avec :

I_{10} : Courant nominal de la batterie donné par le constructeur ($I_{10} = 10A$).

C_{10} = Capacité nominale de la batterie en régime de décharge a courant constant durant 10 heures [Ah].

$I_{bat,moy} = 5$ A.

II.9.2. Equations de la tension de décharge :

En régime de décharge, la f.e.m et la résistance interne sont déterminés par :

$$E_{b_déch} = 1.965 + 0.12 \times EDC \quad (\text{II-14})$$

$$R_{b_déch} = R_{bat} = \frac{1}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + I_{bat}^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} \right) \quad (\text{II-15})$$

L'expression de la tension de batterie, pour ce régime de décharge :

$$V_{bat_déch} = n_b [1.965 + 0.12 EDC] - n_b \frac{I_{bat}}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + I_{bat}^{0.8}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007 \cdot \Delta T) \quad (\text{II-16})$$

II.9.3. Equation de la tension de charge :

En régime de charge, la f.e.m et la résistance interne sont déterminés par :

$$E_{b_char} = 2 + 0.16 EDC \quad (\text{II-17})$$

$$R_{b_déch} = R_b = \frac{1}{C_{10}} \left(\frac{6}{1+(I_{bat})^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \quad (\text{II-18})$$

D'où l'expression de la tension de la batterie avant surcharge

$$V_{b_char} = n_b [2 + 0.16 EDC] + n_b \frac{I_{bat}}{C_{10}} \left(\frac{6}{1+(I_{bat})^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \quad (\text{II-19})$$

II.9.4. Résultats de simulation :

Influence de la température :

La température de la batterie influence énormément sur le comportement des caractéristiques de fonctionnement de base du système de stockage et en particulier sur sa capacité de stockage comme montré sur la figure (II-17) :

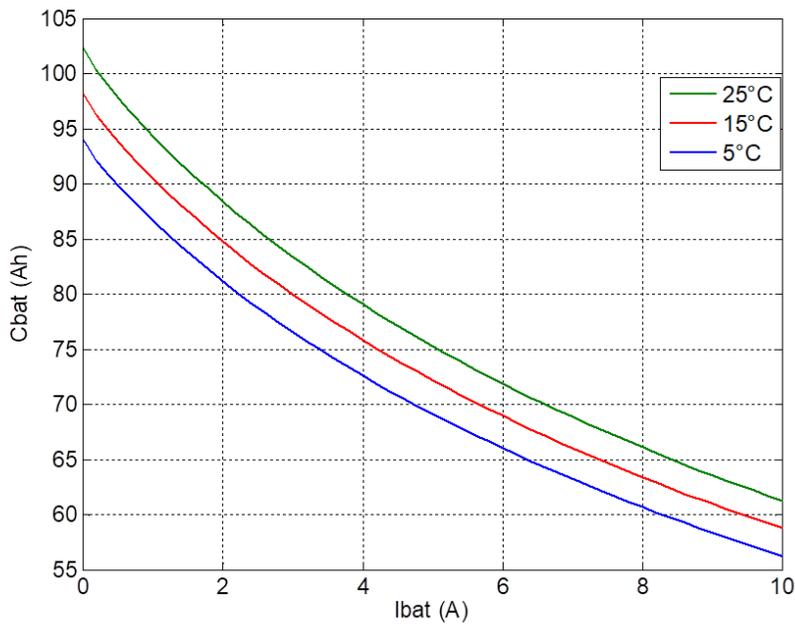


Figure II-17 Influence de la température sur la capacité de la batterie.

La figure (II-17) montre la croissance de la capacité de stockage des batteries en fonction l'augmentation de la température. Les températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de la capacité.

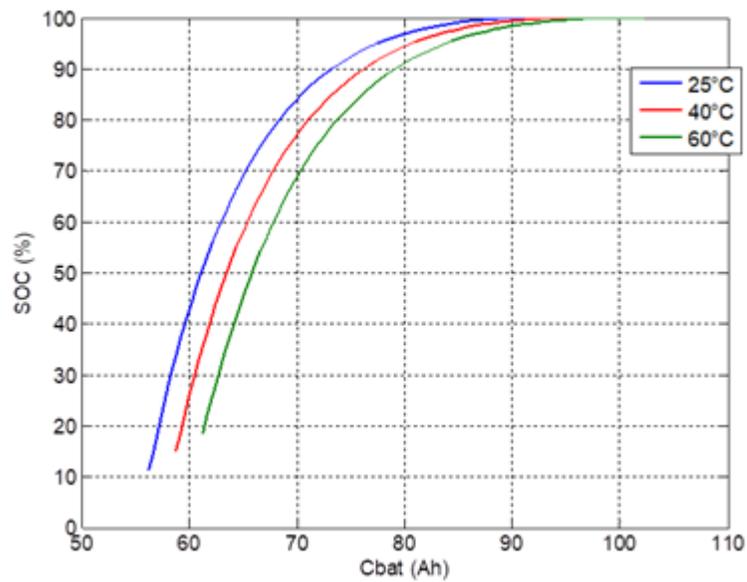


Figure II-18 Variation de l'état de charge en fonction de la capacité de la batterie pour différentes températures.

La figure (II-18) montre la variation de l'état de charge SOC en fonction de la capacité de la batterie C_{bat} pour différentes températures. Nous remarquons que l'augmentation de la température a pour effet de diminuer l'état de charge, ce qui veut dire qu'une batterie soumise à une haute température a tendance à se charger moins rapidement qu'une autre à basse température.

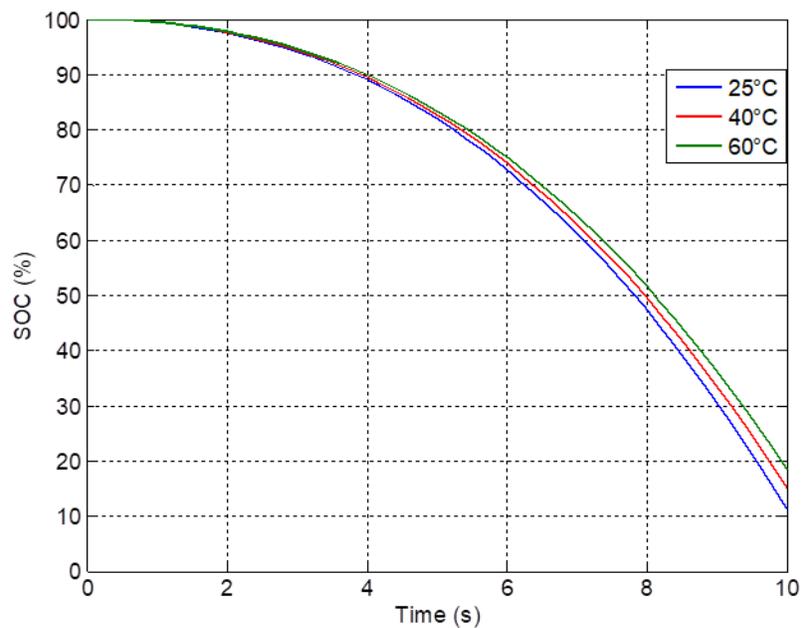


Figure II-19 Influence de la température sur l'état de charge la batterie en fonction du temps.

II.10. Modélisation du convertisseur DC/DC abaisseur-survolteur Buck-Boost

Le hacheur utilisé pour réaliser la charge et la décharge de la batterie ainsi que le transfert de puissance (courant) doit être réversible [14]. Son schéma électrique équivalent est donné par la figure (II-20) :

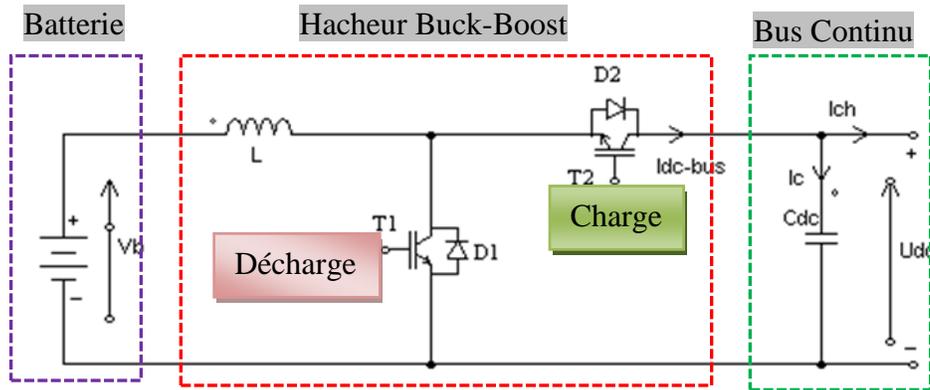


Figure II-20 Schéma électrique Hacheur Buck-Boost.

Afin de réaliser la réversibilité du flux de puissance, les commutateurs du convertisseur doivent idéalement transférer le courant dans les deux directions. La première direction correspond au mode décharge. Le convertisseur transfère l'énergie de la batterie vers le bus CC lorsque la production d'énergie renouvelable est déficitaire.

Le second représente le mode charge. Quand il y a un excès de production d'énergie renouvelable, le convertisseur bidirectionnel transfère l'excès de puissance du bus CC vers la batterie. Le convertisseur bidirectionnel fonctionne comme convertisseur élévateur (Boost) pendant la décharge de la batterie et comme convertisseur abaisseur (Buck) pendant la charge de la batterie.

Dans les deux modes de fonctionnement (charge et décharge), le convertisseur bidirectionnel régule la tension du bus CC et contrôle le flux de puissance. Le modèle du hacheur Buck-Boost peut être décrit par les deux équations suivantes :

$$\frac{dI_b}{dt} = \frac{V_b}{L} - \frac{U_{dc}}{L} (1 - u) \quad (\text{II-20})$$

$$\begin{aligned} \frac{dU_{dc}}{dt} &= \frac{I_b}{C_{dc}} (1 - u) - \frac{1}{C_{dc}} I_{ch} \\ &= \frac{I_{dc-b}}{C_{dc}} - \frac{1}{C_{dc}} I_{ch} \end{aligned} \quad (\text{II-21})$$

Ou : u représente le rapport cyclique.

II.10.1. Mode de fonctionnement du convertisseur Buck-Boost

Le convertisseur bidirectionnel sert d'interface entre la batterie et le bus CC, il reconnaît deux modes de fonctionnements : charge et décharge la batterie [1].

- **Mode 1 : Charge**

Pour le mode charge, le modèle du convertisseur dépend de l'état de l'interrupteur T2. Par conséquent, avec l'interrupteur T2 et la diode D1 on retrouve les caractéristiques dynamiques du convertisseur abaisseur (Buck).

- **Mode 2 : Décharge**

Pour le mode décharge, le modèle du convertisseur dépend de l'état de l'interrupteur T1. Par conséquent, avec l'interrupteur T1 et la diode D2 on retrouve les caractéristiques dynamiques du convertisseur élévateur (Boost).

II.11. Modélisation du bus continu

Le bus continu est composé d'une capacité, qui a pour but le lissage de la tension. Le bus continu assure le couplage entre les sources d'énergie, les batteries et la charge.

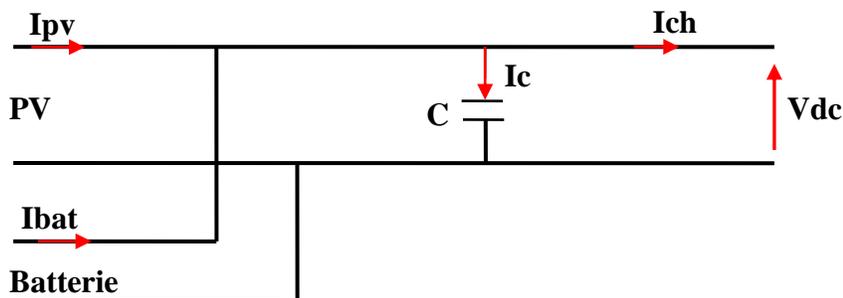


Figure II-21 Architecture du bus continu.

II.12. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé la modélisation d'un système électrique hybride composé d'un générateur photovoltaïque, une batterie et un hacheur ainsi que la commande MPPT perturbation & observation. La modélisation nous a permis de simuler le comportement du système dans différentes conditions environnementales (ensoleillement, température) et de prendre en compte les caractéristiques électriques du panneau et de la batterie. Grâce à cette modélisation, il sera possible de simuler les performances du système global étudié.

Chapitre III.
Commande par logique
floue

III.1. Introduction

La logique floue a été inventée en 1965 par Lotfi Zadeh, un mathématicien et ingénieur électricien américain d'origine iranienne. Cette méthode de représentation et de traitement de connaissances imprécises ou approximatives a été conçue pour répondre aux besoins des systèmes complexes ou mal connus, pour lesquels les méthodes classiques de logique binaire ne sont pas adaptées [16].

Dès 1974, la logique floue a été appliquée aux systèmes de réglage et de contrôle, grâce à l'implantation du premier contrôleur flou par l'équipe du professeur Madani sur une machine à vapeur au Queen Mary Collège de Londres. Depuis lors, cette méthode a connu de nombreuses autres applications, notamment dans la robotique, la reconnaissance de formes, la prise de décision, la modélisation de systèmes complexes, etc [17].

La logique floue permet de traiter des données incertaines ou imprécises en utilisant des variables linguistiques plutôt que des numériques, ce qui la rend particulièrement utile dans des domaines où les données sont difficiles à quantifier avec précision. Elle est également capable de fournir des résultats plus intuitifs et faciles à comprendre que les méthodes classiques de logique binaire.

En résumé, la logique floue a révolutionné le traitement des connaissances imprécises ou approximatives dans les systèmes complexes, et continue d'être une méthode de choix dans de nombreux domaines de l'intelligence artificielle et de l'ingénierie comme la gestion de l'énergie.

L'utilisation de contrôleurs flous est plus appropriée pour le suivi du PPM par rapport aux contrôleurs conventionnels, car ils produisent de meilleures performances dans les conditions atmosphériques variables donc permettre de prendre en compte l'imprécision des données environnementales pour optimiser la production d'énergie solaire [2].

III.2. Notions de base de la logique floue :

Dans cette section, nous allons expliquer les principes fondamentaux de la théorie de la logique floue afin de pouvoir créer un régulateur flou.

III.2.1. Principe de la logique floue :

La logique floue permet de faciliter la représentation et la manipulation de la notion de "degré de vérité" plutôt que de se limiter à la logique binaire traditionnelle (vrai/faux). Cela signifie que les variables en logique floue peuvent avoir des valeurs qui ne sont pas seulement vraies ou fausses, mais qui se situent sur une échelle de gradation entre les deux, ainsi elle permet de représenter des valeurs qui peuvent se situer entre deux extrêmes. Grâce à elle, on peut modéliser des concepts qui sont difficiles à décrire avec précision, tels que les nuances de langage naturel ou les situations complexes et ambiguës. La logique floue utilise des fonctions d'appartenance pour décrire la façon dont une valeur particulière d'une variable est associée à une

certaine classe ou catégorie. Ces fonctions peuvent ensuite être combinées pour déterminer le degré de vérité d'une proposition ou d'une décision [18].

III.2.2. Ensemble floue :

Dans la théorie des ensembles conventionnels la nuance n'existe pas, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble donné, sans possibilité de nuances. Cependant, dans la réalité, il est rare de rencontrer des éléments dont le statut d'appartenance est précisément défini, il n'y a pas que du noir et du blanc. C'est pourquoi la théorie des ensembles flous permet d'établir un degré d'appartenance, c'est-à-dire une valeur entre 0 et 1 qui exprime le degré de similarité ou de ressemblance entre l'élément considéré et l'ensemble en question. Dans les ensembles flous, une fonction d'appartenance μ définit le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble donné, ce qui permet de prendre en compte la complexité et les nuances des situations réelles. En revanche, dans les ensembles conventionnels, le degré d'appartenance est limité à 0 ou 1, ce qui ne permet pas de prendre en compte les nuances [17].

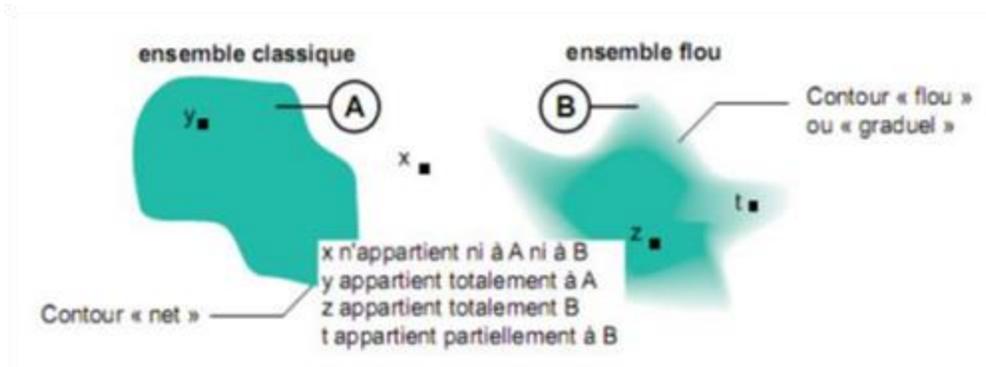


Figure III-1 Comparaison entre un ensemble classique et un ensemble flou.

III.2.3. Variable linguistique :

La variable linguistique est un concept permettant de représenter des connaissances imprécises ou vagues sur une variable dont la valeur exacte est inconnue. Elle est caractérisée par des ensembles flous qui correspondent à des termes du langage naturel, et qui peuvent prendre plusieurs valeurs simultanément. Ces termes et variables sont définis dans un domaine spécifique, appelé univers du discours. En somme, la variable floue est un outil de modélisation qui permet de représenter des informations incertaines ou imprécises dans un cadre mathématique [20].

La variable linguistique peut être représentée par un triplé $(x, T(x), U)$ dans lequel x est le nom de la variable linguistique, $T(x)$ l'ensemble des valeurs linguistiques de x et U l'univers de discours. La figure (III-2) illustre un exemple de variable linguistique 'Vitesse', ses valeurs linguistiques sont définies comme suit : $T(V) = \{\text{Petite Moyenne Grande}\}$.

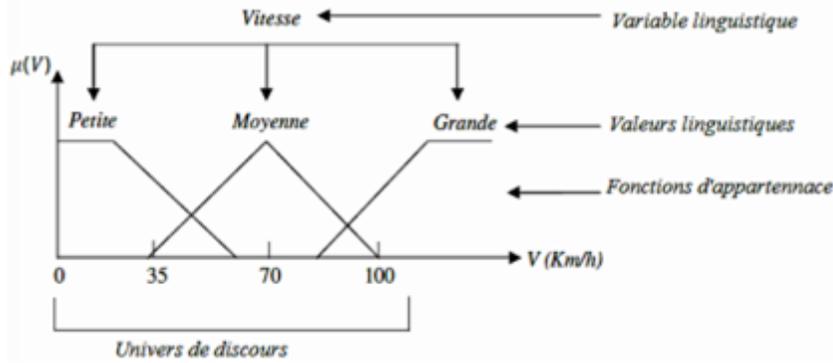


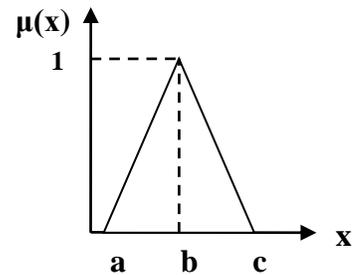
Figure III-2 Représentation graphique d'une variable linguistique [20].

III.2.4. Fonction d'appartenance :

Les fonctions d'appartenance sont des définitions mathématiques qui permettent de caractériser les variables linguistiques en attribuant à chaque valeur floue un degré d'appartenance à un sous-ensemble flou donné. Ces fonctions établissent une relation entre les valeurs floues et les sous-ensembles flous, en indiquant le degré de vérification de chaque valeur floue par rapport à ces sous-ensembles. Les fonctions d'appartenance sont donc des outils essentiels pour la manipulation et le traitement numérique des variables linguistiques. Les Fonctions d'appartenances peuvent prendre plusieurs formes, les plus utilisées sont :

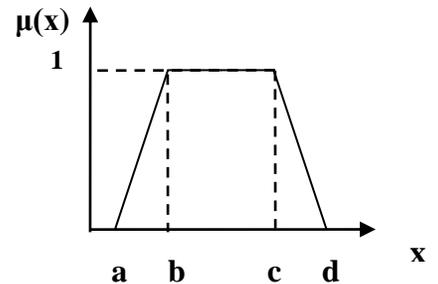
➤ **Fonction triangulaire :** Elle est définie par trois paramètres {a,b,c} :

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & \text{si } a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{si } b \leq x \leq c \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad \text{(III-1)}$$



➤ **Fonction trapézoïdale :** Elle est définie par quatre paramètres {a,b,c,d} :

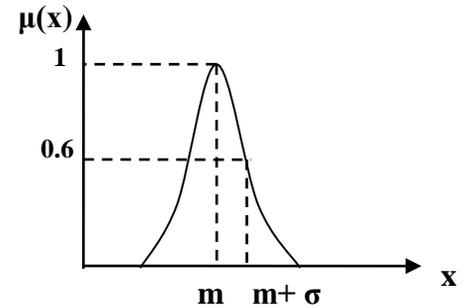
$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & \text{si } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{si } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{si } c \leq x \leq d \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases} \quad \text{(III-2)}$$



- **Fonction gaussienne** : Elle est définie par deux paramètres $\{m, \sigma\}$:

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right)$$

(III-3)

Avec $m, \sigma \in \mathbf{R}$ 

III.2.5. Opérations sur les ensembles flous [21] :

III.2.5.1 L'union (Opérateur OU) :

Correspond à l'union de deux ensemble A et B, c'est l'ensemble flou constitué des éléments de X affectés du plus grand des degrés avec lesquels ils appartiennent à A et B. Souvent appliquée aux fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$ des ensembles A et B avec la fonction maximum qui est donné par :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \text{(III-4)}$$

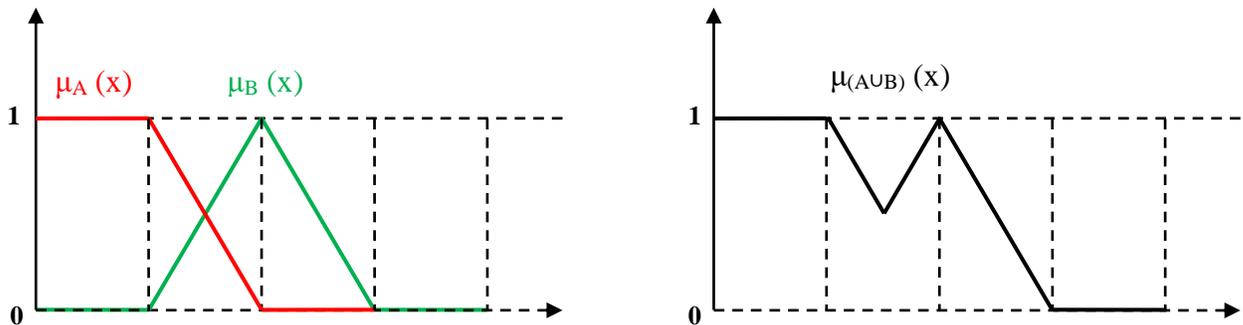


Figure III-3 Courbes illustratives de l'union des sous-ensembles flous.

III.2.5.2 L'intersection (Opérateur ET) :

Correspond à l'intersection de deux ensemble A et B, c'est l'ensemble flou constitué des éléments de X affectés du plus petit degré avec lesquels ils appartiennent à A et B. Appliquée avec la fonction minimum donnée par :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad \text{(III-5)}$$

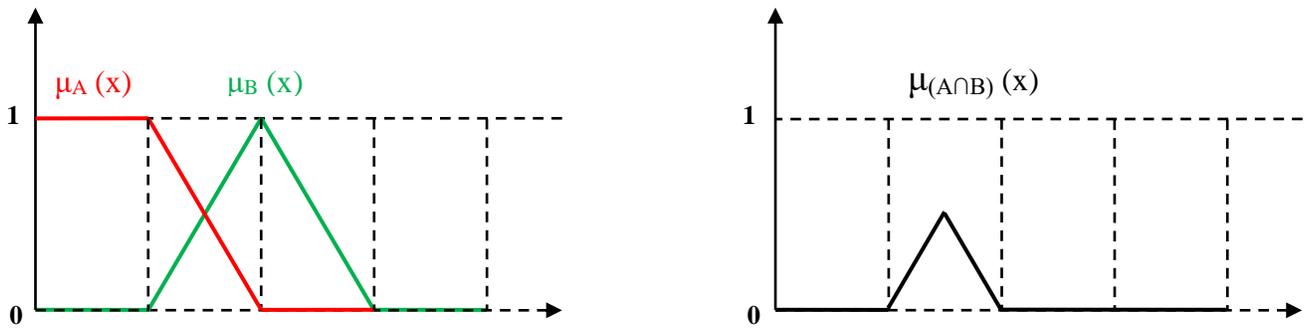


Figure III-4 Courbe illustrative de l'intersection des sous-ensembles flous.

III.2.5.3 Le complément (Opérateur NON) :

Le complément d'un ensemble flou A de X est défini par les éléments de x qui n'appartiennent pas à l'ensemble A. sa fonction est donnée par :

$$\overline{\mu}_A(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{III-6})$$

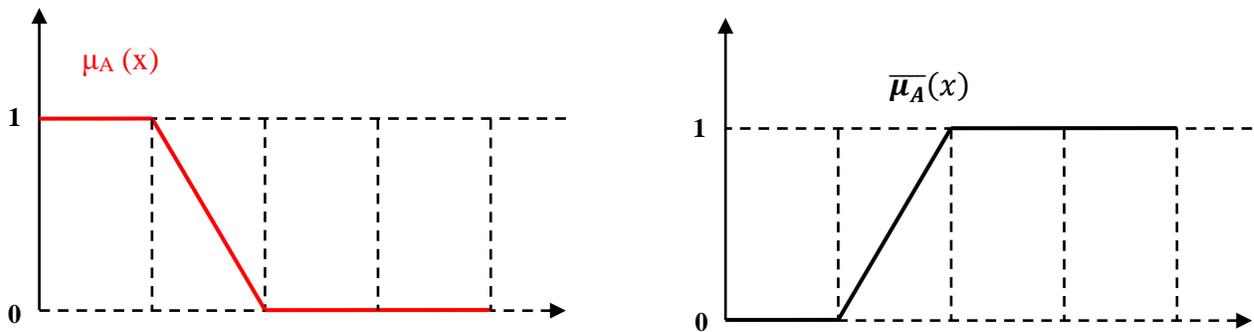


Figure III-5 Courbe illustrative de le l'operateur NON.

III.2.6. Raisonnement flou :

La logique standard a permis de formaliser les méthodes de déduction, qui sont des outils de raisonnement permettant de déduire de nouvelles certitudes à partir de connaissances certaines. Toutefois, dans le cadre de la logique floue, il est possible de généraliser ces méthodes de raisonnement lorsque les connaissances disponibles sont incertaines ou imprécises [16].

III.3. Domaine d'application :

La logique floue se distingue de l'approche scientifique classique par son caractère pragmatique plutôt que déterministe. En effet, elle prend en compte l'incertitude et l'imprécision dans la prise de décision en s'appuyant sur l'expertise de spécialistes du domaine pour quantifier le flou à partir de connaissances antérieures ou à priori. La décision en logique floue est donc basée

sur la connaissance et l'expérience plutôt que sur des modèles mathématiques rigoureux. Cette approche pragmatique permet de prendre en compte des données incomplètes, imprécises ou incertaines et de trouver des solutions adaptées à des situations complexes [17].

Les domaines d'application de la logique floue dans un processus de prise de décision s'imposent dans les cas suivants :

- Pour les systèmes complexes dans lesquels la modélisation est difficile ou impossible.
- Pour les systèmes contrôlés par des experts humains.
- Quand l'observation humaine est à l'origine d'entrées ou des règles de contrôle.

III.4. Structure générale d'un régulateur floue :

La logique floue trouve son application la plus importante dans le domaine de la régulation et de la commande des processus industriels. Elle permet de concevoir une loi de commande efficace sans nécessiter des études théoriques approfondies. La commande floue prend en compte l'expertise de l'opérateur du processus et la traduit en un ensemble de règles d'inférence. Cela permet d'exploiter les connaissances et l'expérience de l'opérateur pour optimiser la commande du processus industriel [16].

Quel que soit le type d'application, on distingue clairement trois étapes pour le traitement par la logique floue :

- **La fuzzification** : Conversion des variables d'entrées numériques en variables floues, variables linguistiques.
- **L'inférence floue** : Etablit la liaison entre les entrées et les sorties à l'aide de règles linguistiques.
- **La défuzzification** : Conversion des variables linguistiques en variables réelles pour la sortie.

Le régulateur flou comporte essentiellement quatre parties comme illustré dans la figure (III-6) une interface de fuzzification, une base des règles, une interface d'inférence et une interface de défuzzification [23] :

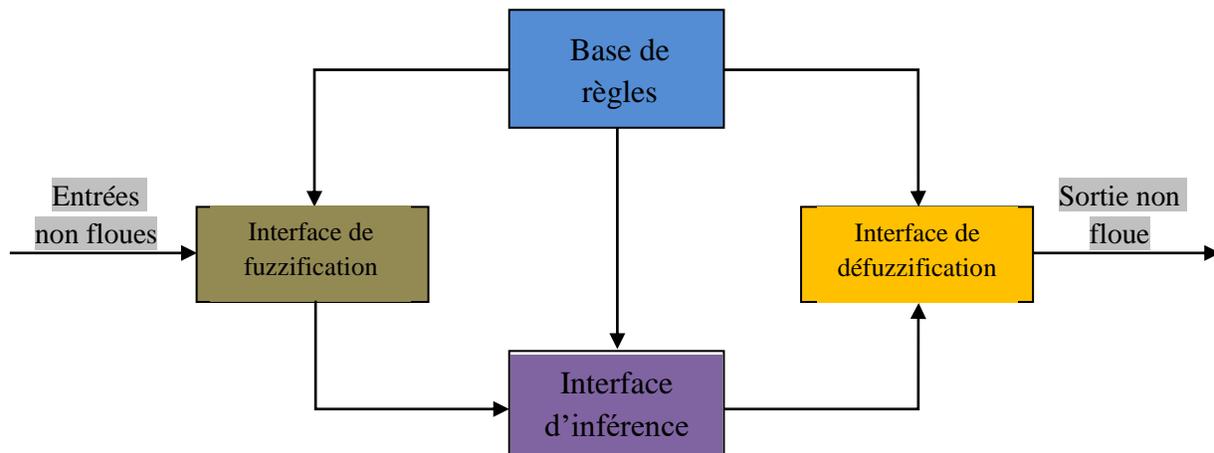


Figure III-6 Schéma synoptique général d'un contrôleur flou.

III.4.1. Interface de fuzzification :

L'interface de fuzzification est l'élément qui traduit les valeurs d'entrées numériques précises en des variables linguistique floues, en utilisant les fonctions d'appartenance pour la transformation qui se fait dans un domaine normalisé [15].

III.4.2. Base de règles :

La base de règles de la logique floue est un ensemble de règles qui permettent de déterminer les valeurs de sortie d'un système d'inférence floue en fonction des valeurs d'entrée floues. Chaque règle de la base est constituée de prémisses et d'une conclusion, qui sont exprimées en termes de variables linguistique floues. Les prémisses décrivent les conditions sous lesquelles la règle s'applique, tandis que la conclusion décrit la valeur de sortie correspondante si les prémisses sont satisfaites [16].

III.4.3. L'inférence :

Le système d'inférence représente le centre de commande d'un régulateur flou car il relie les variables numériques préalablement traduite en variables linguistique par l'étape de fuzzification aux variables linguistique de sortie du régulateur en appliquant des opérations flous aux fonctions d'appartenances[18]. Il existe différentes méthodes d'inférence pour un régulateur flou et le choix de la méthode dépend des caractéristiques du problème à résoudre et des données disponibles pour l'apprentissage mais trois méthodes sont fréquemment utilisées [20] :

III.4.3.1 Méthode Inférence de Mamdani (max-min) :

Méthode la plus couramment utilisée en logique floue de par sa simplicité et sa faciliter d'implémentation, les valeurs de vérité des prémisses et de la conclusion de chaque règle sont

représentées par des ensembles flous. Les ensembles flous sont définis par des fonctions d'appartenance qui associent à chaque valeur d'entrée un degré d'appartenance à l'ensemble.

Pour chaque règle, la valeur de vérité de la prémisse est calculée en utilisant l'opérateur "minimum" sur les degrés d'appartenance de chaque variable. La valeur de vérité de la conclusion est également calculée en utilisant l'opérateur "minimum" sur les degrés d'appartenance de chaque variable.

Une fois que les valeurs de vérité des prémisses et de la conclusion ont été calculées pour chaque règle, l'opérateur "maximum" est utilisé pour agréger les valeurs de vérité de toutes les règles. La valeur agrégée représente la valeur de sortie globale du système.

III.4.3.2 Méthode d'inférence Max-Produit :

Comme la méthode précédente, la méthode max-produit est utilisée pour agréger les valeurs de vérité des règles et produire une valeur de sortie globale, la différence se trouve au niveau de la réalisation de la conclusion, la fonction « produit » est utilisée au lieu de la fonction « max », également désignée par « l'implication de Larsen ».

III.4.3.3 Méthode de Sugeno :

La méthode de Sugeno utilise des fonctions numériques comme conclusion de chaque règle floue et une somme pondérée des sorties pour produire la valeur de sortie globale.

III.4.4. Interface de défuzzification :

Cette étape sert à convertir la conclusion résultante du mécanisme d'inférence en une variable physique applicable sur le système à commander et pour se faire plusieurs méthodes de défuzzification ont été proposées [19]. Parmi les plus utilisées, on cite :

III.4.4.1 Méthode du centre de gravité :

La méthode de défuzzification du centre de gravité est la méthode la plus utilisée pour transformer une distribution de valeurs floues en une valeur numérique précise.

Dans cette méthode, chaque valeur de l'ensemble flou est pondérée par son degré d'appartenance et multipliée par sa position sur l'axe de la variable de sortie. Les produits pondérés sont ensuite sommés et divisés par la somme des degrés d'appartenance pour produire une valeur numérique précise qui représente la sortie du système.

III.4.4.2 Méthode du maxima :

C'est une méthode de défuzzification qui consiste à sélectionner la valeur maximale de l'ensemble flou pour produire une valeur numérique précise qui représente la sortie du système. Simple à implémenter et peut être utilisée lorsque la valeur de sortie la plus probable est la valeur

maximale de l'ensemble flou mais elle ne prend pas en compte l'ensemble de la distribution de l'ensemble flou donc peut être moins précise dans certains cas.

III.4.4.3 Méthode de la moyenne des maximas :

C'est une méthode qui consiste à identifier les valeurs maximales de l'ensemble flou et à prendre la moyenne de ces valeurs pour produire une valeur numérique précise qui représente la sortie du système. Contrairement à la méthode précédente celle-ci permet de prendre en compte plusieurs valeurs maximales de l'ensemble.

III.4.4.4 Méthode des hauteurs pondérées :

Cette méthode de défuzzification qui consiste à pondérer les valeurs maximales de l'ensemble flou par leur hauteur respective et à prendre la moyenne pondérée de ces valeurs pour produire une valeur numérique précise qui représente la sortie du système. Elle correspond à la méthode de centre de gravité quand les fonctions d'appartenances ne sont pas uniformément réparties dans l'ensemble flou.

III.5. Application de la commande mppt par la logique floue :

L'optimisation du point de puissance maximale (MPPT) est un problème important dans les systèmes photovoltaïques qui vise à maximiser l'efficacité des cellules solaires en ajustant en temps réel la tension et le courant de sortie afin de maintenir la puissance de sortie au niveau maximal. L'approche floue est une de méthode efficace pour résoudre ce problème. On présente notre régulateur flou afin de pallier ces importantes pertes de puissance et améliorer le temps de réponse du système.

Le système est composé de deux entrées qui sont l'erreur (E) et le changement d'erreur (CE), tout instant d'échantillonnage k, l'erreur et le changement d'erreur sont calculés selon les relations suivantes [22] :

$$E(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{pv}(k) - V_{pv}(k-1)} \quad (\text{III-7})$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (\text{III-8})$$

Avec :

P_{pv} : Puissance du générateur photovoltaïque [W].

V_{pv} : Tension du générateur photovoltaïque [V].

Le rapport cyclique du convertisseur DC/DC est la variable de sortie de notre régulateur flou qui peut être trouvé avec la méthode du centre de gravité.

Lors de la fuzzification, les variables d'entrée numériques sont transformées en variables linguistiques dans les cinq sous-ensembles flous à l'aide des fonctions d'appartenance.

Elles sont données comme suit :

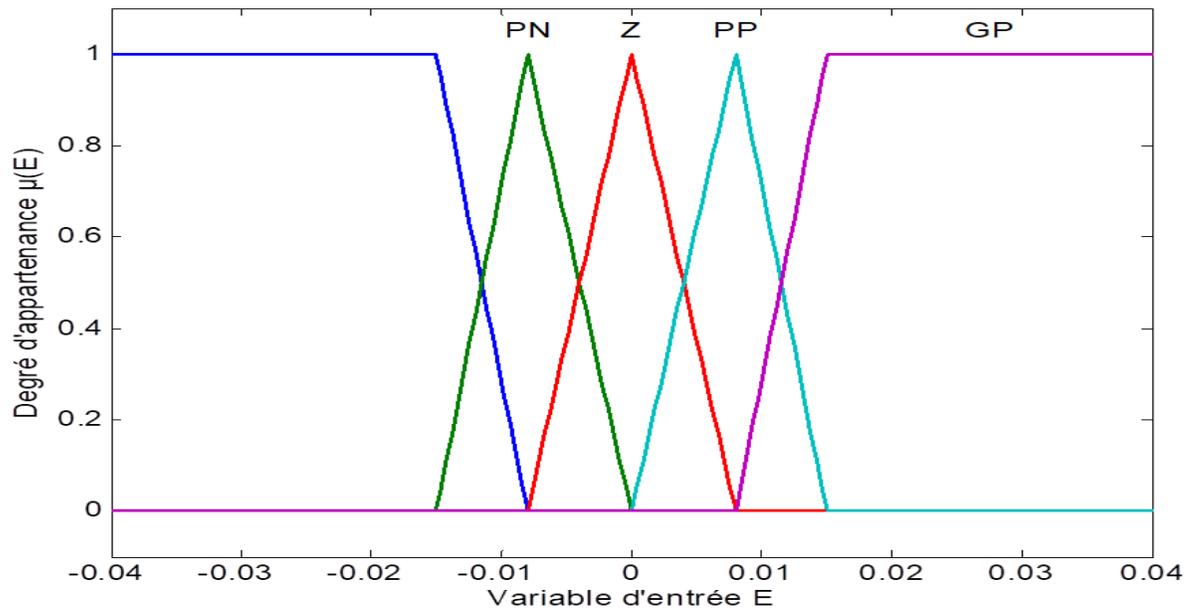


Figure III-7 Fonction d'appartenance de la variable d'entrée E.

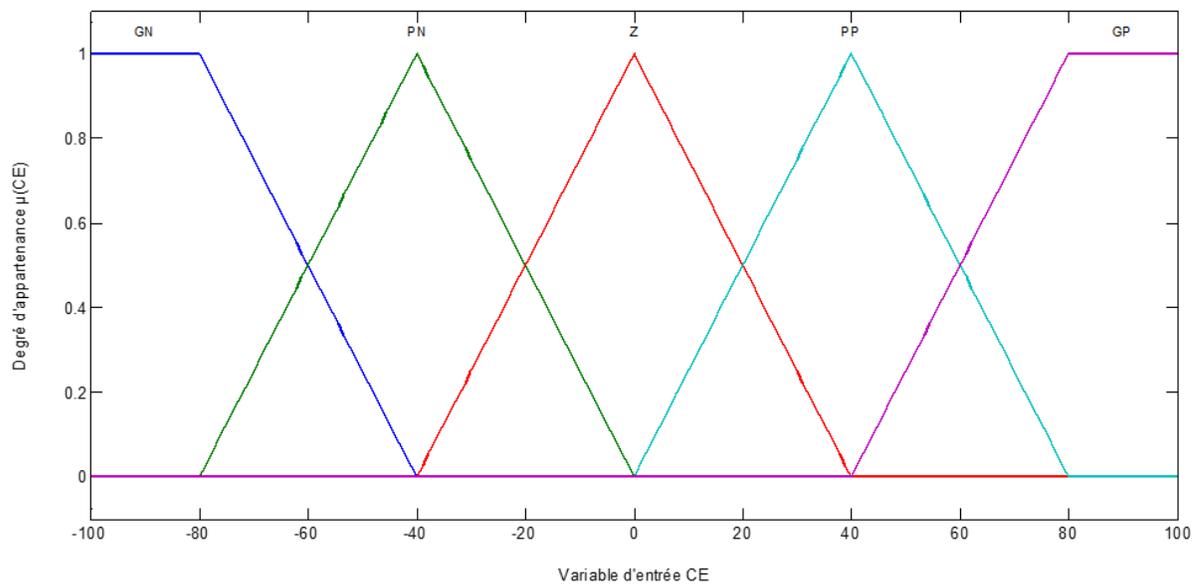


Figure III-8 Fonction d'appartenance de la variable d'entrée CE.

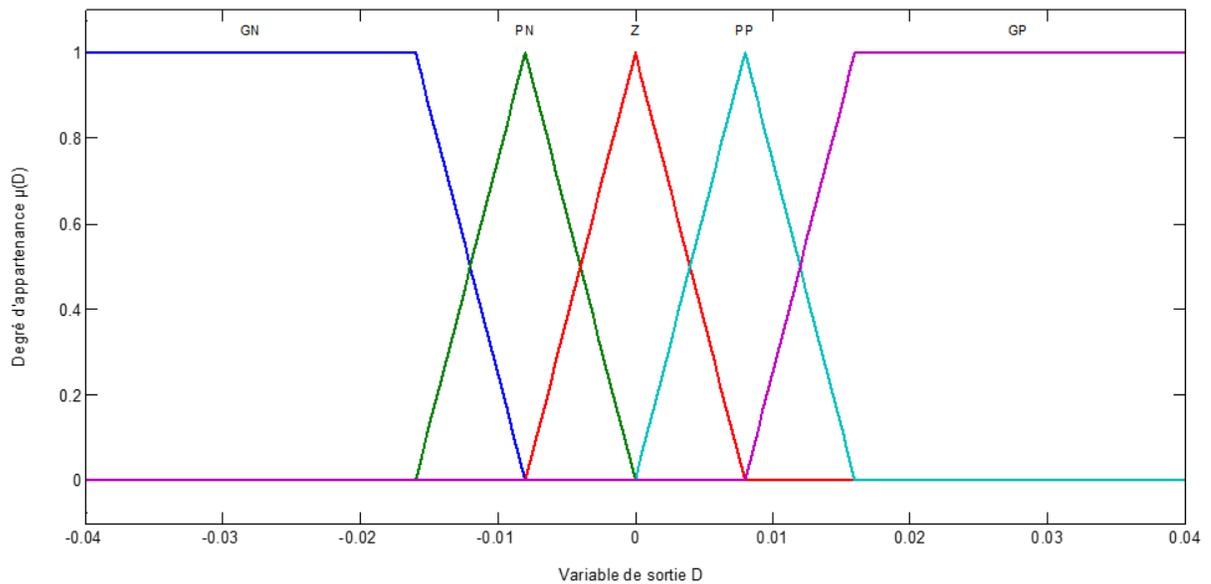


Figure III-9 Fonction d'appartenance de la variable de sortie D.

Avec comme sous-ensemble flou :

GN : Grand Négatif.

PN : Petit Négatif.

Z : Zéro.

PP : Petit Positif.

GP : Grand Positif.

L'obtention du signal de sortie du régulateur flou passe par l'étape d'inférence, à l'aide des règles floues qui relient les variables d'entrées au signal de sortie par des conditions linguistiques simples présentés dans le tableau (III-1). La méthode d'inférence de Mamdani (max-min) est utilisée pour réaliser cette transition :

E \ CE	GN	PN	Z	PP	GP
GN	Z	Z	GP	GP	GP
PN	Z	Z	PP	PP	PP
Z	PP	Z	Z	Z	PN
PP	PN	PN	PN	Z	Z
GP	GN	GN	GN	Z	Z

Tableau III-1 Table des règles du CLF.

Après défuzzification par la méthode de centre de gravité, on présente les résultats de simulation de notre MPPT floue pour un panneau de 80W dans les conditions STC ($E_s=1000W/m^2$ et $T=25^\circ C$) :

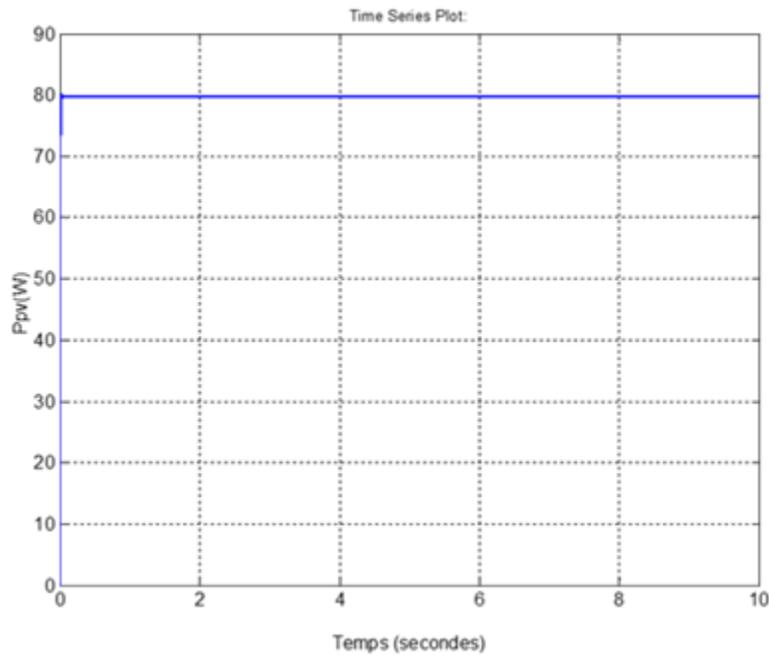


Figure III-10 Allure de la puissance photovoltaïque avec la commande floue.

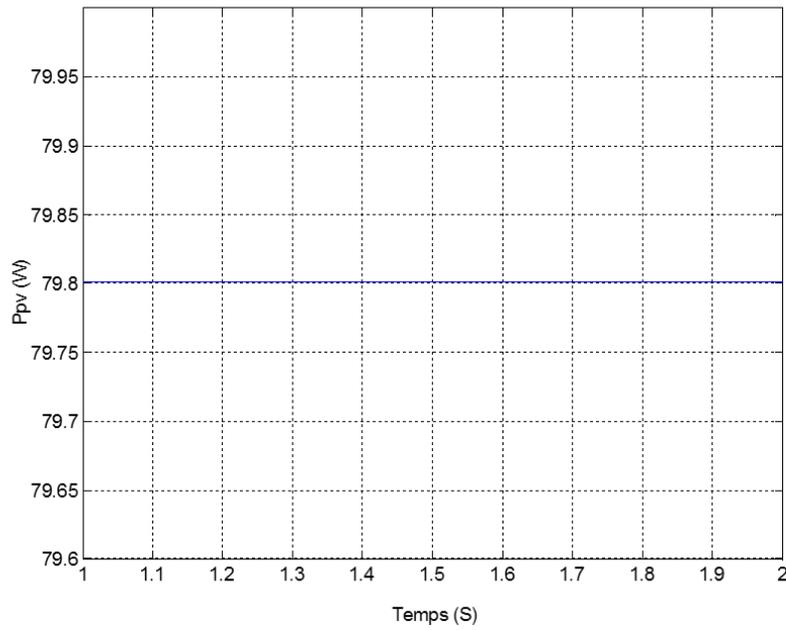


Figure III-11 Zoom sur l'allure de la puissance photovoltaïque avec la commande floue.

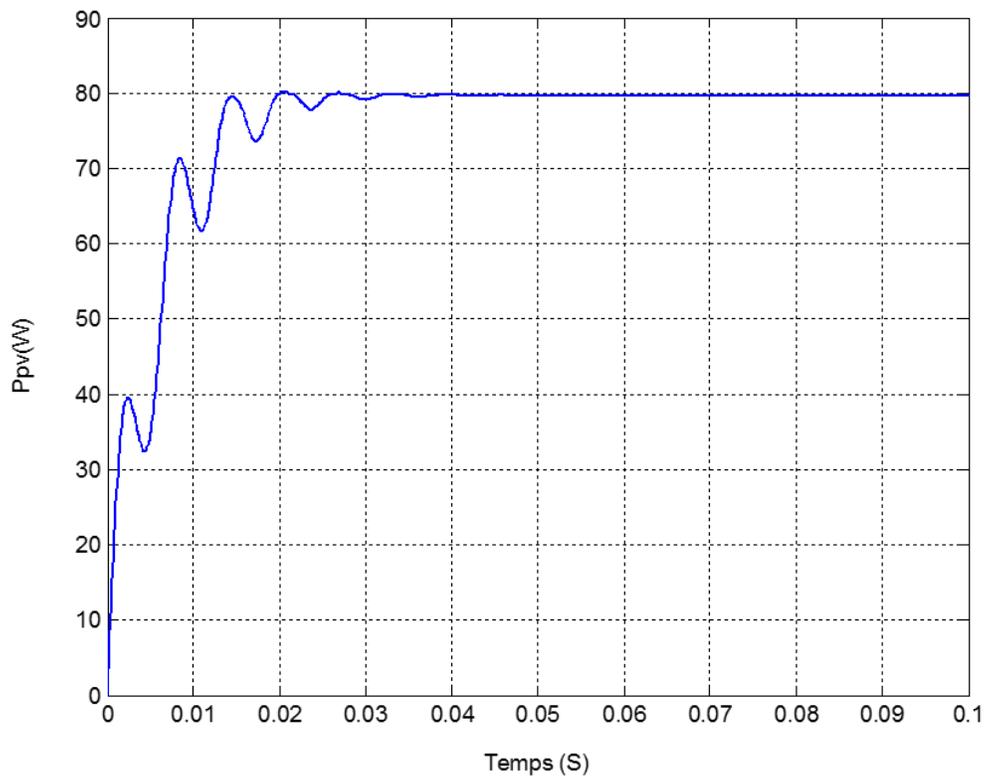


Figure III-12 Temps de réponse par commande floue.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé la logique floue en présentant quelques notions relatives nécessaires pour comprendre le principe de fonctionnement d'un régulateur flou. Nous avons ensuite présenté les étapes de base nécessaires à l'élaboration de notre régulateur flou, puis on est passé à la simulation de cette commande MPPT floue.

Nous aborderons dans le chapitre qui suit une étude comparative entre les deux méthodes MPPT (P&O et flou) vu, ainsi que la gestion de notre système.

Chapitre IV.

Gestion d'énergie du système hybride

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons réaliser le dimensionnement des composants de notre système hybride en suite, on présentera un algorithme de gestion de l'énergie pour notre SEH constitué d'une source d'énergie photovoltaïque avec stockage par batteries puis la simulation du système étudié. Nous allons voir les résultats des interprétations d'un profil qui correspondent à une simulation de 24 h puis on fera une comparaison entre la commande par P&O et la commande par logique floue.

IV.2. Gestion d'énergie

Pour notre étude, nous proposons pour notre système hybride constitué de panneaux photovoltaïque et de batteries une gestion d'énergie qui surveille et contrôle l'état de charge des batteries SOC et l'ensemble du système, afin de maximiser l'utilisation de l'énergie stockée et de minimiser les pertes d'énergie. La gestion qu'on propose consiste à alimenter la charge et charger les batteries lorsqu'il y a un surplus de puissance fournie par le générateur PV et le mode de compensation entre les batteries et le GPV.

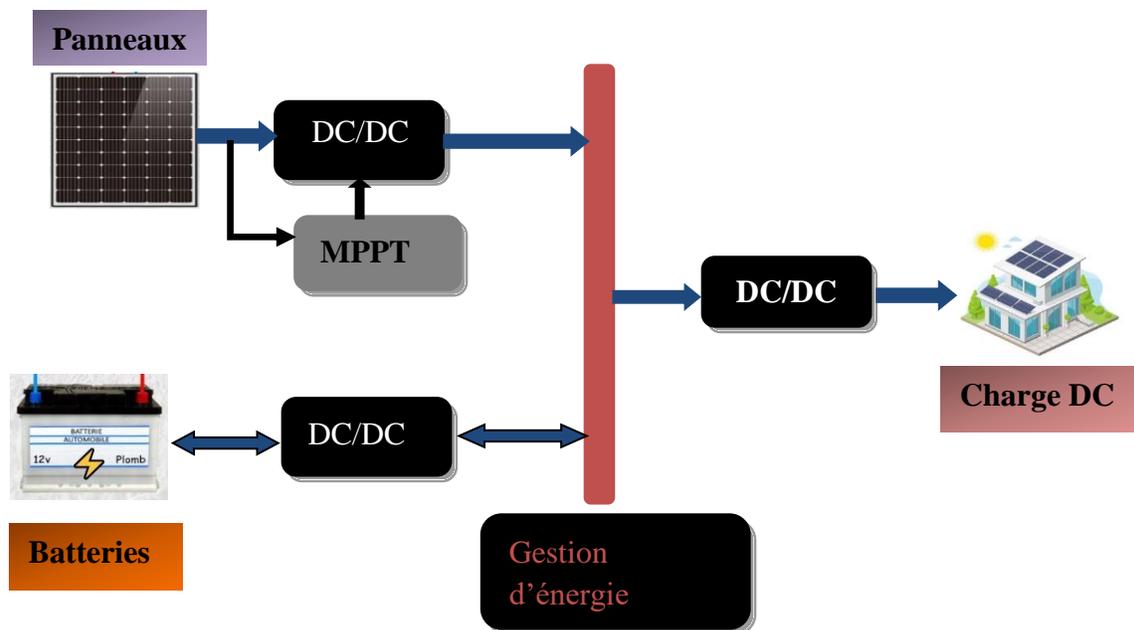


Figure IV-1 Configuration du système SEH global.

IV.3. But de la gestion d'énergie utilisée

Nous proposons pour notre système hybride autonome une gestion d'énergie qui a pour objectif [24] :

- Protéger les batteries en empêchant les décharges profondes et les surcharges des batteries.

- Satisfaire le besoin énergétique en assurant un approvisionnement électrique stable et fiable.

IV.4. Les différents modes de gestion d'énergie

La stratégie de gestion repose principalement sur deux facteurs de décision : le taux de puissance fourni par le générateur photovoltaïque P_{pv} et l'état de charge des batteries SOC [14]. Selon les différents cas possibles, le système fonctionnera dans l'un des modes suivants :

Mode 1 : Dans ce mode $P_{pv} \geq P_{ch}$ ($P_{disponible} \geq 0$), la puissance disponible par le générateur PV est suffisante pour alimenter la charge et la batterie n'est pas complètement chargée ($SOC \leq SOC_{max}$) donc le GPV charge la batterie.

Mode 2 : Dans ce mode $P_{pv} > P_{ch}$, la puissance fournie par GPV est suffisante et les batteries sont déconnectées pour les protéger car elles sont déjà chargées ($SOC = SOC_{max}$).

Mode 3 : Dans ce mode $P_{pv} < P_{ch}$ ($P_{disponible} < 0$), la puissance disponible par le PV est insuffisante pour satisfaire la charge donc la puissance des batteries est ajoutée pour alimenter la charge ($P_{ch} = P_{pv} + P_{bat}$). C'est le mode de compensation.

Mode 4 : Dans ce mode $P_{ch} = 0$, la charge est déconnectée car le GPV fournit pas de puissance et les batteries sont déchargées.

IV.5. Organigramme de la gestion d'énergie

Pour assurer le fonctionnement autonome et optimal du système SEH, il est essentiel de gérer efficacement le flux d'énergie entre les différents composants et de contrôler l'état de charge et de décharge du stockage [25]. D'où l'utilité d'un algorithme de gestion pour contrôler les échanges d'énergie comme décrit dans la figure (IV-2) :

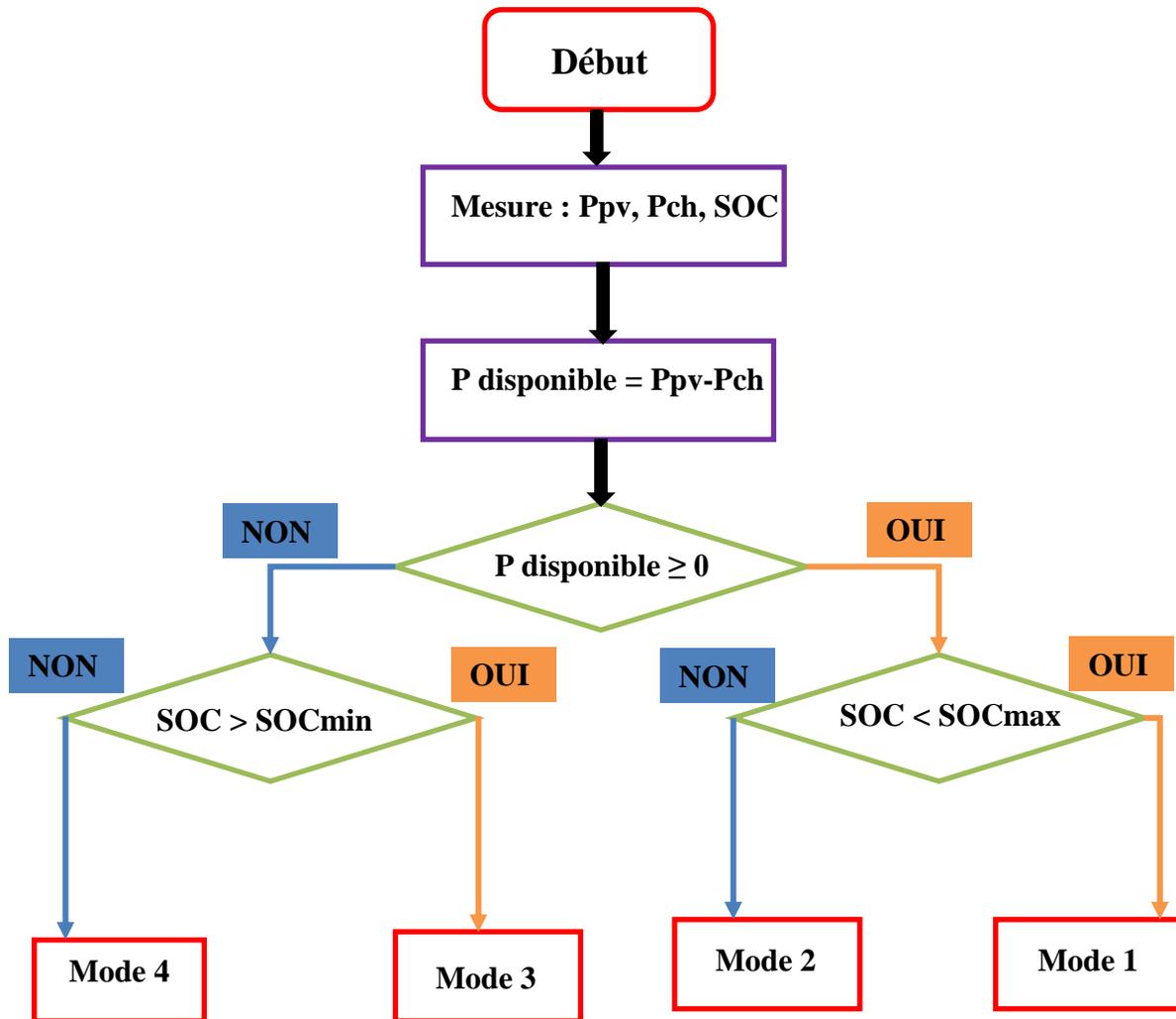


Figure IV-2 Organigramme de la gestion d'énergie proposée.

IV.6. Dimensionnement du système hybride

Notre système hybride est destiné à l'électrification d'une maison autonome dans la ville de Béjaia. Le dimensionnement sera établi d'après la consommation quotidienne moyenne d'une famille dans le but de déterminer le nombre de panneaux et de batteries nécessaire pour l'alimentation d'une maison autonome.

Le tableau décrit la consommation journalière en énergie d'une famille de 4 personnes :

<i>Appareils</i>	<i>Nombre</i>	<i>Puissance unitaire (W)</i>	<i>Durée d'utilisation (h/j)</i>	<i>Energie (Wh/j)</i>
<i>Réfrigérateur</i>	1	200	12	2400
<i>Four micro-onde</i>	1	500	0.25	125
<i>Mixeur</i>	1	600	0.25	150
<i>Machine à laver</i>	1	300	1	300
<i>Chargeur téléphone portable</i>	3	5	2	30
<i>Téléviseur</i>	1	200	7	1400
<i>Ordinateur portable</i>	1	30	8	240
<i>Modem wifi</i>	1	5	12	60
<i>Radio</i>	1	6	4	24
<i>Pompe centrifuge</i>	1	200	1	200
<i>Lampes basse consommation</i>	3	25	1	75
	2	25	3	150
	3	30	3	270
	2	30	4	240
<i>Le besoin journalier totale (Wh/j)</i>	5664 (Wh/j)			

Tableau IV-1 Consommation journalière d'un foyer autonome.

IV.6.1. Dimensionnement des panneaux photovoltaïque

Pour réaliser le dimensionnement de notre système hybride nous optons pour la méthode du mois le plus défavorable, qui dépend de l'estimation de l'énergie consommée pour une période critique d'un mois, appelé le mois le plus défavorable. Ce mois correspond au mois pendant lequel la valeur de l'irradiation moyenne mensuelle est la plus faible de l'année.

Concernant cette application, le mois de décembre est considéré comme le mois le plus défavorable à Bejaia (Algérie).

Dans notre étude nous avons utilisé des panneaux de type **80W**, pour effectuer le dimensionnement des panneaux nous procédons comme suit :

Déterminer le besoin journalier :

$$B_j = \sum p_{ch} \times \Delta_t \quad (\text{IV-1})$$

B_j : Le besoin journalier [Wh/j].

P_{ch} : La puissance unitaire de l'appareil [W].

Δ_t : La durée d'utilisation de l'appareil [h/j].

Calculer l'énergie photovoltaïque journalière et réelle :

$$E_{PV/j} = P_c \times N_e \quad (\text{IV-2})$$

$E_{PV/j}$: Puissance journalière du panneau [Wh/j].

P_c : Puissance crête du panneau [Wc].

$N_e = 2.3 \text{ Wh/j.m}^2$: Nombre d'heures équivalentes [Wh/j.m²].

$$N_e = \frac{E_s}{E_{sref}} \quad (\text{IV-3})$$

Avec :

E_s : La valeur de l'ensoleillement moyen mensuel du mois le plus défavorable pour le site de Bejaia le mois de décembre ($E_s = 2.3 \text{ Kwh/m}^2 \cdot \text{j}$)

$E_{sref} = 1000 \text{ W/m}^2$: Valeur de l'ensoleillement dans les conditions STC.

$$E_{PV/j, \text{réelle}} = E_{PV/j} \times (1 - \sum \text{pertes}) \quad (\text{IV-4})$$

Les pertes aux conditions réelles d'une installation électrique photovoltaïque sont estimées à 20%.

Calculer le nombre de panneaux :

$$N_{PV} = \text{ent} \left[\frac{B_j}{E_{PV/j, \text{réelle}}} \right] \quad (\text{IV-5})$$

Choix de la tension de fonctionnement :

La tension de fonctionnement est choisie en fonction de la puissance crête du champ photovoltaïque tel que :

Puissance du champ	0 – 500 Wc	500 Wc – 2 KWc	2 KWc – 10 KWc	> 10 KWc
Tension recommandée (DC)	12 V	24V	48V	> 48V

Tableau IV-2 Choix de la tension de fonctionnement V_{DC} .

Calculer nombre de panneaux en série :

$$N_{PV,série} = \text{ent} \left[\frac{V_{DC}}{V_{MPP}} \right] \quad (\text{IV-6})$$

Calculer nombre de panneaux en parallèle :

$$N_{PV,parallèle} = \text{ent} \left[\frac{N_{PV,Total}}{N_{PV,série}} \right] \quad (\text{IV-7})$$

V_{DC} : La tension du générateur PV.

V_{MPP} : La tension au point de puissance max.

$N_{PV,série}$: Nombre de panneaux en série.

$N_{PV,parallèle}$: Nombre de panneaux en parallèle.

IV.6.2. Dimensionnement des batteries

Lors de notre étude nous avons utilisés des batteries Plomb-acide de type **CIEMAT 12V/100Ah**, pour effectuer le dimensionnement des batteries nous procédons comme suit [26] :

Déterminer la capacité des batteries :

$$C_{Batt} = \frac{B_j \times J_{aut}}{PDP \times U_{Batt} \times K_T} \quad (\text{IV-8})$$

J_{aut} : Autonomie [Jour].

PDP : La profondeur de décharge profonde [%].

U_{Batt} : Tension de la batterie [V].

K_T : Coefficient de température de la capacité.

Déterminer le nombre de batteries :

$$N_{Batt} = \text{ent} \left[\frac{C_{Batt,Total}}{C_{Batt,unitaire}} \right] \quad (\text{IV-9})$$

$C_{Batt,unitaire}$: Capacité de la batterie choisie unitaire [Ah].

Déterminer le nombre de batteries en série :

$$N_{Batt,série} = \text{ent} \left[\frac{V_{DC}}{V_{Batt}} \right] \quad (\text{IV-10})$$

Déterminer le nombre de batteries en parallèle :

$$N_{Batt,parallèle} = \text{ent} \left[\frac{N_{Batt}}{N_{Batt,série}} \right] \quad (\text{IV-11})$$

Résultats du dimensionnement :

Puissance journalière du panneau	$E_{PV/j} = P_c \times N_e$	$E_{PV/j} = 80 \times 2.3$	$E_{PV/j} = 184 \text{ Wh/j}$
l'énergie photovoltaïque journalière et réelle	$E_{PV/j,réelle} = E_{PV/j} \times (1 - \sum \text{pertes})$	$E_{PV/j,réelle} = 184 \times (1 - 20\%)$	$E_{PV/j,réelle} = 147.2 \text{ Wh/j}$
Nombre de panneaux	$N_{PV} = \text{ent} \left[\frac{B_j}{E_{PV/j,réelle}} \right]$	$N_{PV} = \text{ent} \left[\frac{5664}{147.2} \right]$	$N_{PV} = 39 \text{ panneaux}$
Nombre de panneaux en série	$N_{PV,série} = \text{ent} \left[\frac{V_{DC}}{V_{MPP}} \right]$	$N_{PV,série} = \text{ent} \left[\frac{48}{18.3} \right]$	$N_{PV,série} = 3 \text{ panneaux}$
Nombre de panneaux en parallèle	$N_{PV,parallèle} = \text{ent} \left[\frac{N_{PV,Total}}{N_{PV,série}} \right]$	$N_{PV,parallèle} = \text{ent} \left[\frac{39}{3} \right]$	$N_{PV,parallèle} = 13 \text{ panneaux}$

Tableau IV-3 Dimensionnement des panneaux photovoltaïques.

<i>La capacité des batteries</i>	$C_{Batt} = \frac{B_J \times J_{aut}}{PDP \times U_{Batt} \times K_T}$	$C_{Batt} = \frac{5664 \times 1}{0.6 \times 12 \times 0.85}$	$C_{Batt} = 925.49 \text{ Ah}$
<i>Nombre de batteries</i>	$N_{Batt} = \text{ent} \left[\frac{C_{Batt,Total}}{C_{Batt,unitaire}} \right]$	$N_{Batt} = \text{ent} \left[\frac{925.49}{100} \right]$	$N_{Batt} = 10 \text{ batteries}$
<i>Nombre de batteries en série</i>	$N_{Batt,série} = \text{ent} \left[\frac{V_{DC}}{V_{Batt}} \right]$	$N_{Batt,série} = \text{ent} \left[\frac{48}{12} \right]$	$N_{Batt,série} = 4 \text{ batteries.}$
<i>Nombre de batteries en parallèle</i>	$N_{Batt,parallèle} = \text{ent} \left[\frac{N_{Batt}}{N_{Batt,série}} \right]$	$N_{Batt,parallèle} = \text{ent} \left[\frac{10}{4} \right]$	$N_{Batt,parallèle} = 3 \text{ batteries.}$

Tableau IV-4 Dimensionnement des batteries.

IV.7. Simulation du système hybride étudié

Nous allons voir les résultats des interprétations d'un profil qui correspondent à une simulation de 24 h puis on fera une comparaison entre la commande par P&O et la commande par logique floue. Puis les résultats de simulation des différents composants du système SEH et de la charge.

IV.7.1. Profil de l'ensoleillement et la température

La simulation a été réalisée avec des conditions variables pour évaluer la capacité de la commande P&O et la commande par logique floue à résister aux changements de l'éclairement et de la température. Le test a été effectué pour une journée complète de 24h en utilisant le profil représenté dans les figures suivantes (IV-3) (IV-4) :

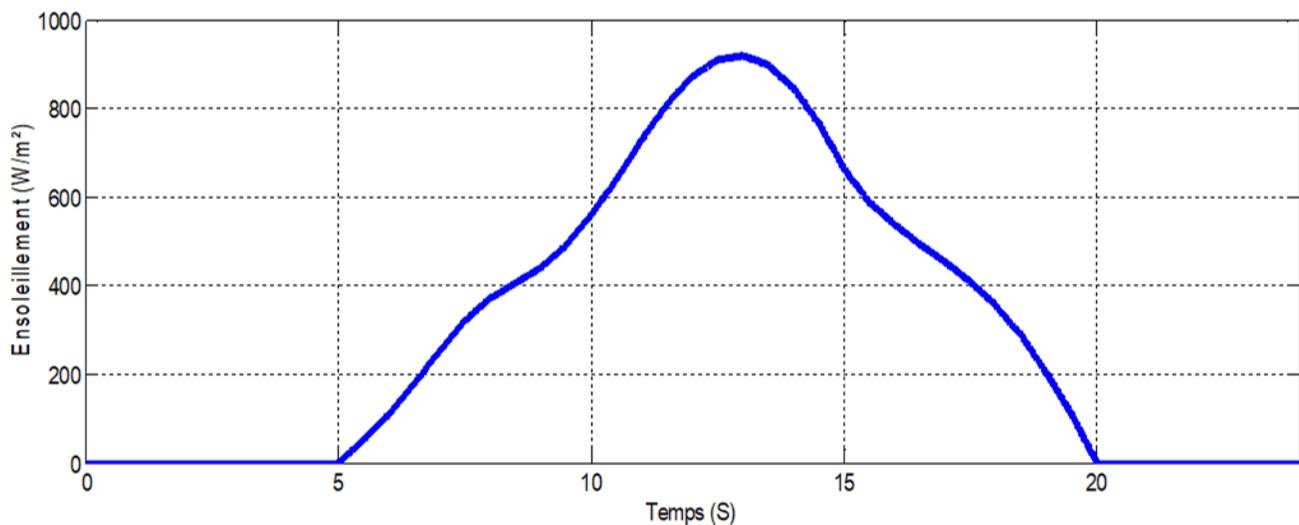


Figure IV-3 Profil de l'ensoleillement.

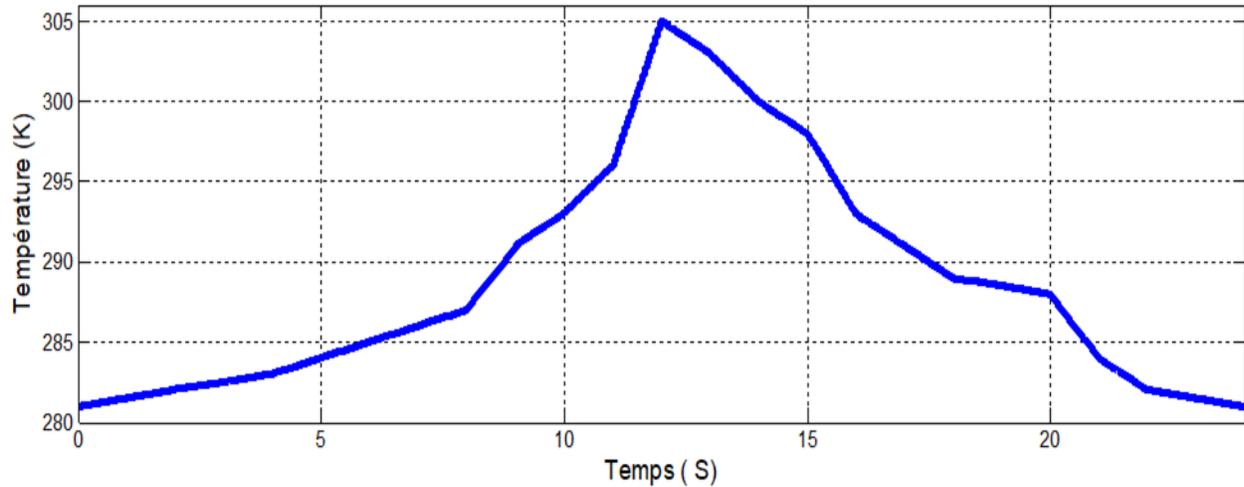


Figure IV-4 Profil de la température.

IV.7.2. Comparaison des résultats et simulation des deux commandes

Parmi les multiples commandes MPPT existantes, nous avons opté pour deux commandes. La commande Perturbation & Observation (P&O) et la commande par logique floue afin de faire une comparaison entre les deux méthodes.

IV.7.2.1 Résultats sous conditions STC

Les commandes ont été effectuées sous des conditions de fonctionnement STC avec un éclairage et température fixe ($E_s = 1000\text{W/m}^2$, $T = 25^\circ\text{C}$) :

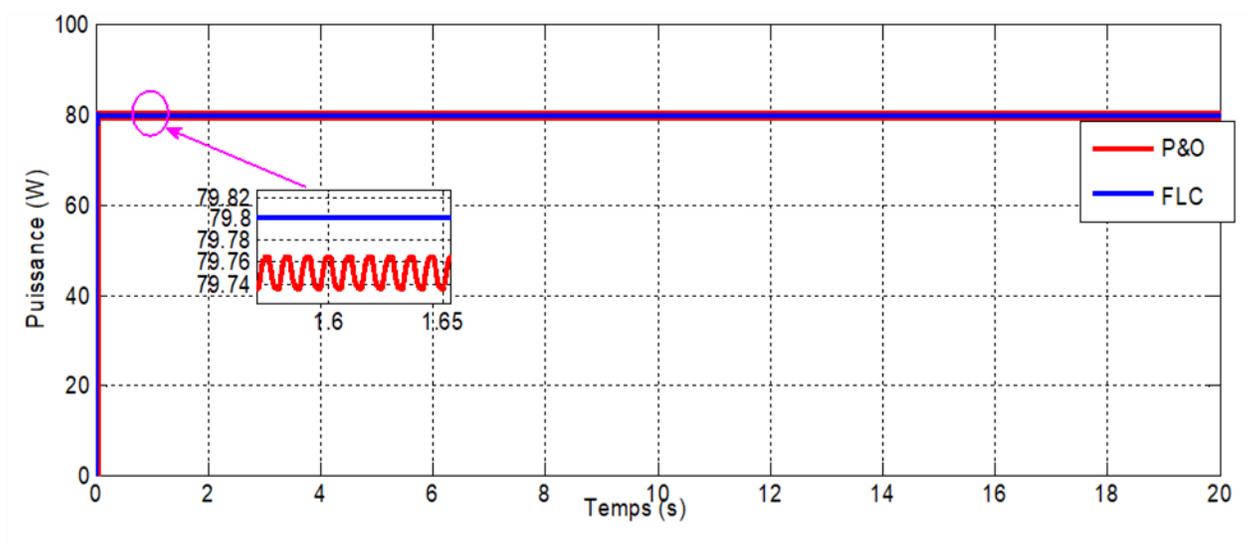


Figure IV-5 Allure des puissances avec les commandes P&O et FLC sous conditions STC.

Les résultats de simulation montrent que la réponse par FLC est plus rapide et précise que la P&O qui présente des oscillations.

IV.7.2.2 Résultats sous conditions variables

Les simulations ont été effectuées dans des conditions atmosphériques variables afin de voir les réponses des commandes P&O et FLC face aux variations de la température et ensoleillement :

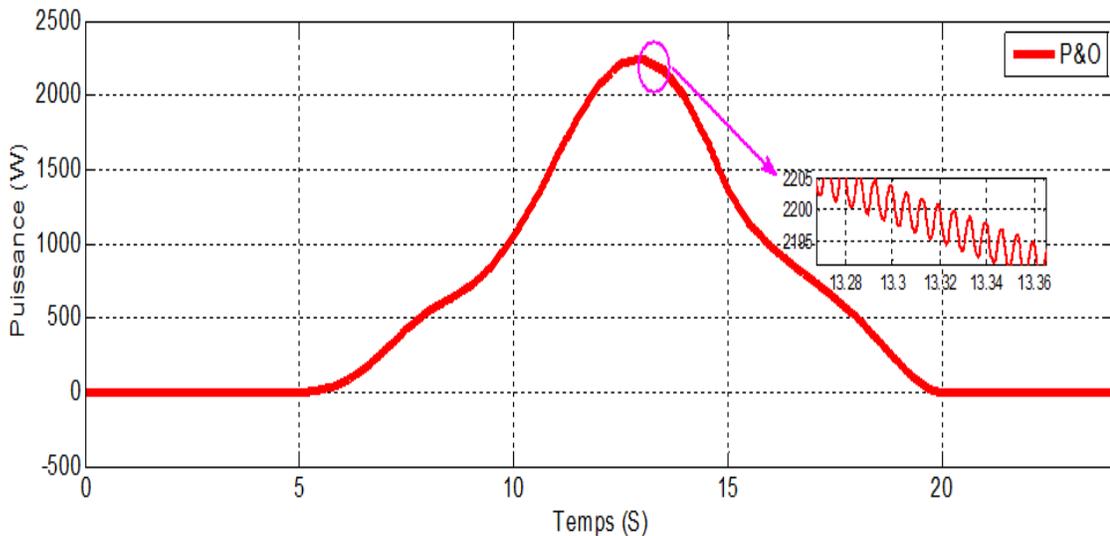


Figure IV-6 Allure de la puissance avec la commande P&O aux conditions variables.

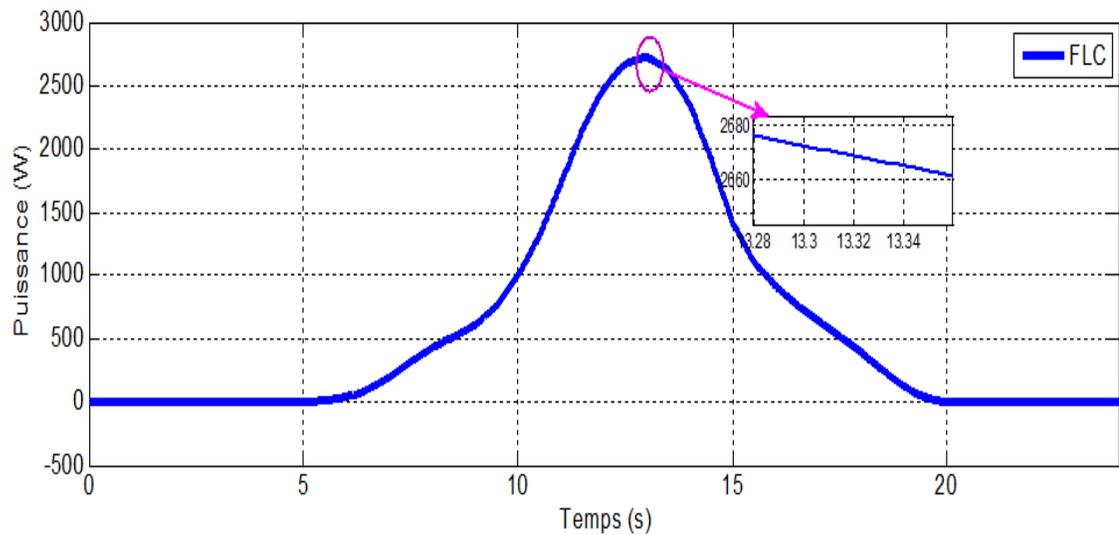


Figure IV-7 Allure de la puissance avec la commande FLC aux conditions variables.

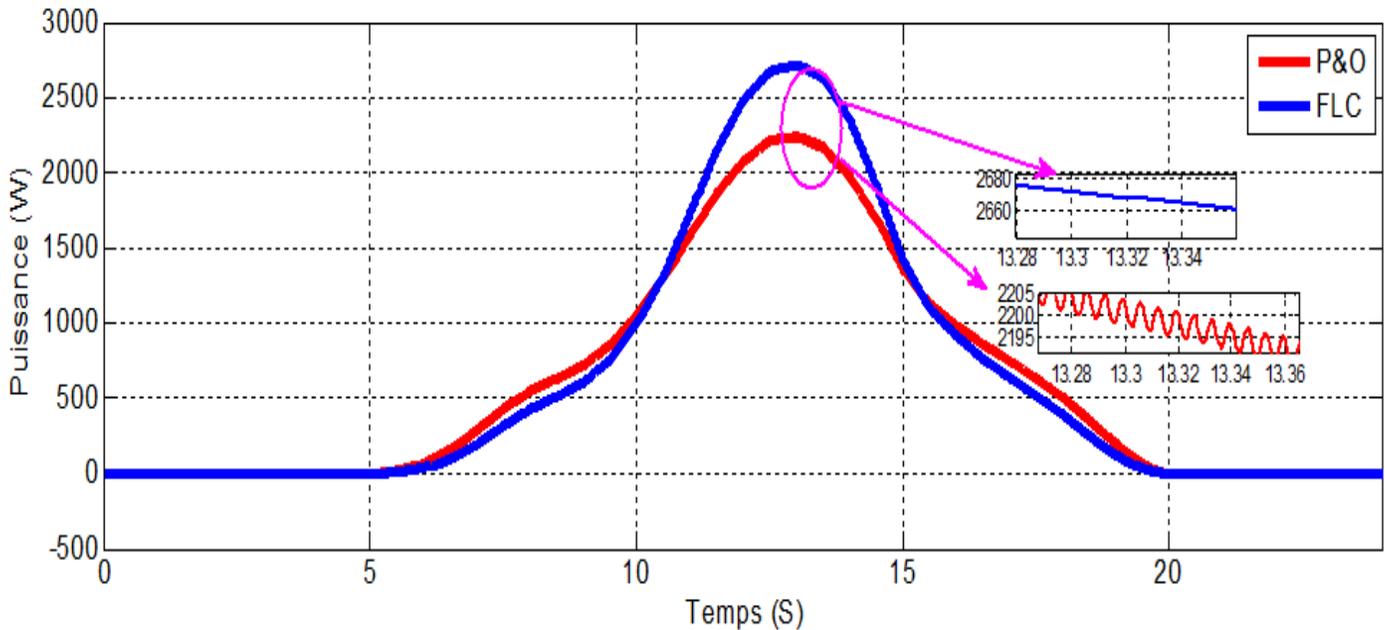


Figure IV-8 Allure des puissances avec la commande P&O et FLC aux conditions variables.

A partir des courbes obtenues on remarque que :

- La méthode itérative P&O présente des oscillations autour du PPM ce qui montre qu'elle ne répond pas correctement dans des conditions atmosphériques variables.
- La méthode intelligente par contrôleur flou représente de meilleures performances sous conditions atmosphériques variables.

En conclusion la réponse de la commande par logique floue est plus rapide, précise et appropriée pour le suivi du PPM par rapport aux contrôleurs conventionnels car elle produit de meilleures performances dans les conditions atmosphériques variables.

IV.7.3. Application de la gestion proposée au système hybride

Pour la simulation du SEH et de la gestion proposée on applique les mêmes profils d'ensoleillement et de température que pour les deux commandes. Afin de montrer l'efficacité de l'algorithme de gestion dans les différents modes pour un profil de charge que nous avons réalisé depuis une image d'une consommation journalière d'un foyer autonome. Ce profil est proposé à la figure (IV-9) suivante :

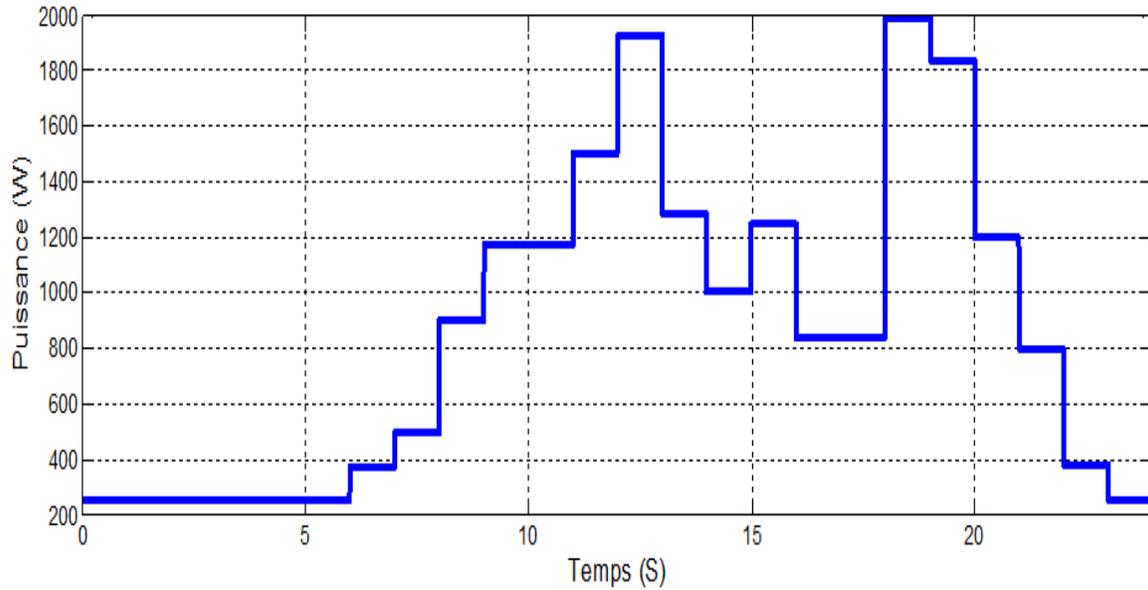


Figure IV-9 Allure de la charge.

IV.7.3.1 Simulation du GPV

Pour satisfaire notre charge, le système est composé de de 3 panneaux photovoltaïque en série et 13 en parallèle. La figure (IV-10) montre l'allure de la puissance du GPV :

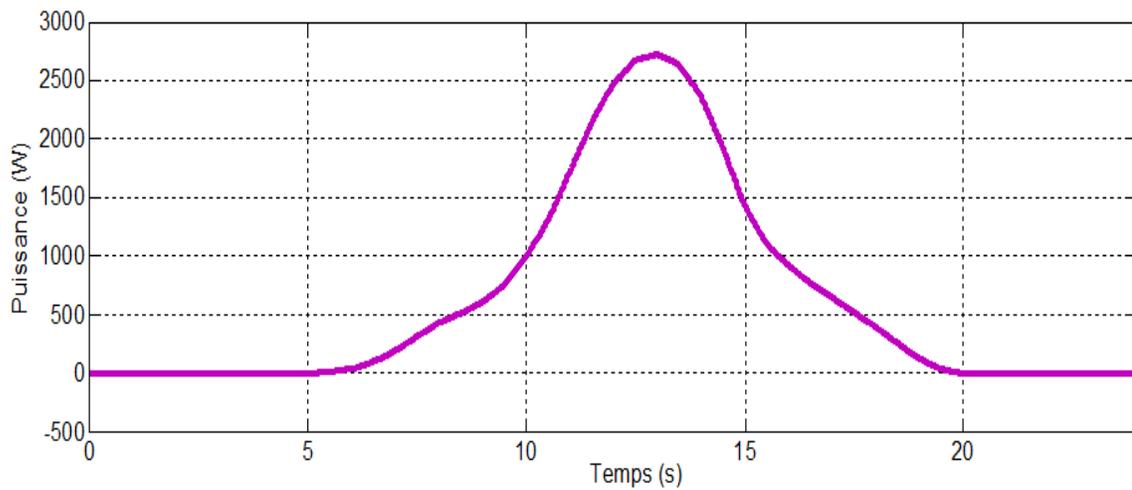


Figure IV-10 Allure de la puissance du GPV.

IV.7.3.2 Simulation de la batterie

Le système est composé de 4 batteries en série et 3 en parallèle. Les figures (IV-11), (IV-12), (IV-13) montrent les allures du courant, de la tension et puissance de la batterie :

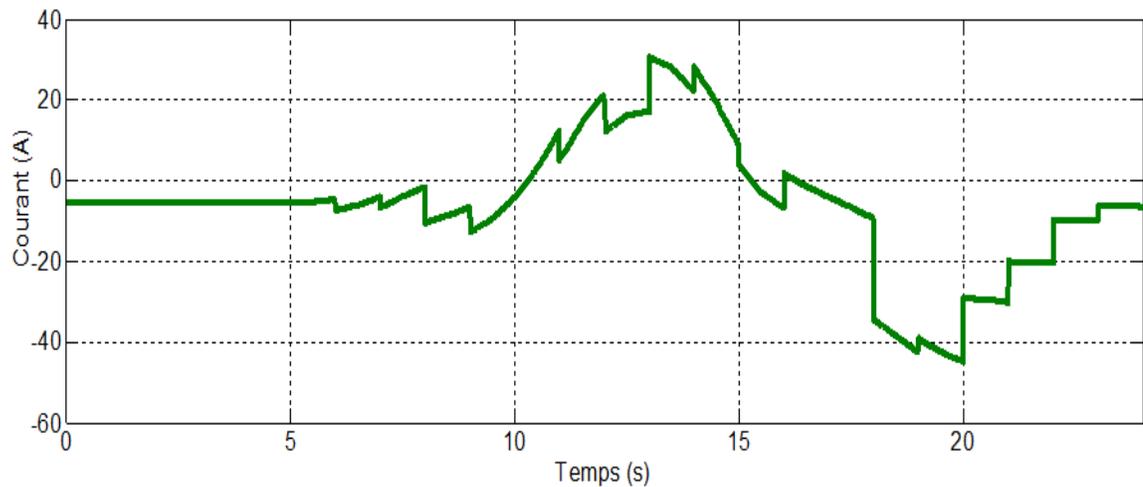


Figure IV-11 Allure du courant de la batterie.

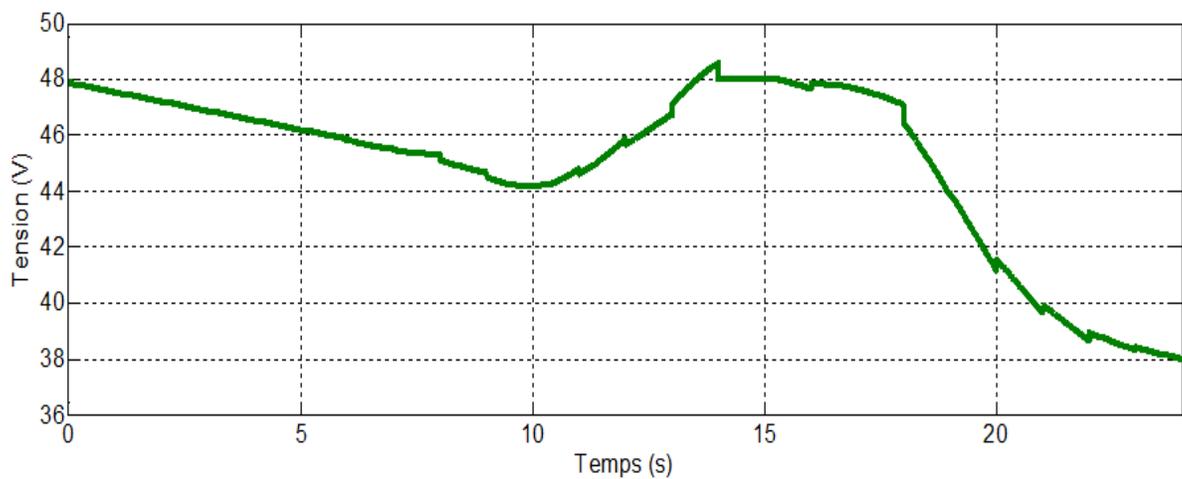


Figure IV-12 Allure de la tension de la batterie.

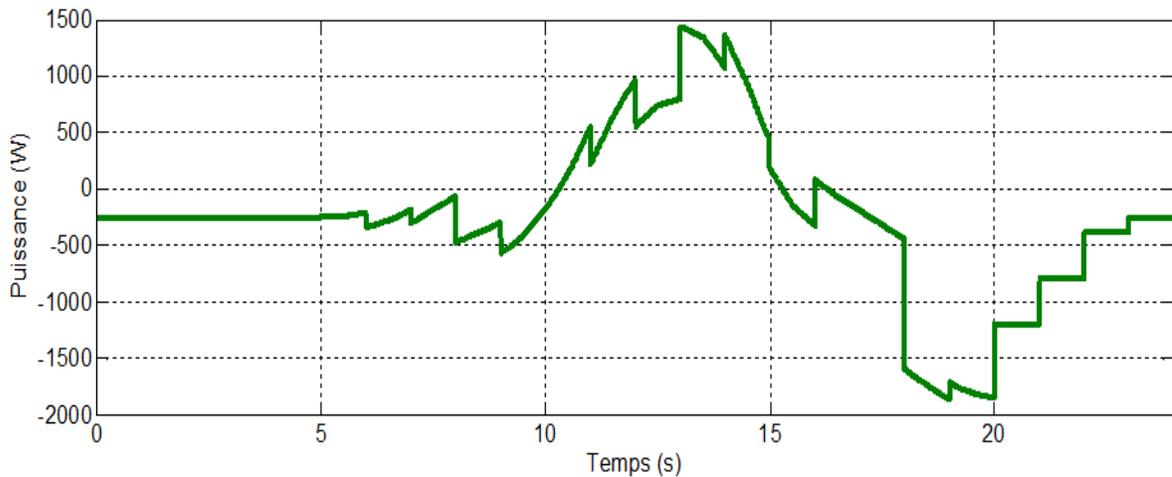


Figure IV-13 Allure de la puissance de la batterie.

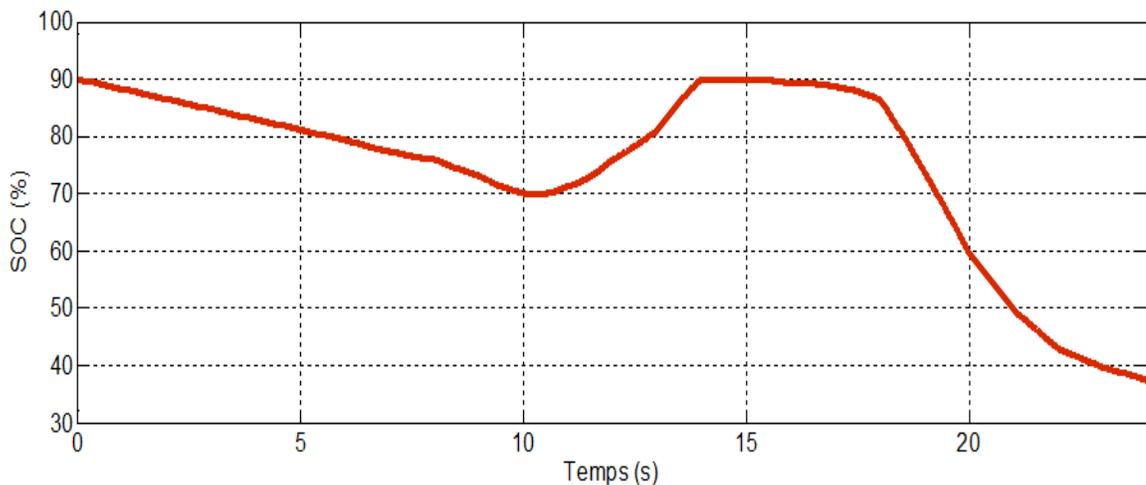


Figure IV-14 Etat de charge de la batterie.

La figure (IV-14), représente l'état de charge de la batterie, pour prolonger la durée de vie des batteries on limite la charge et la décharge des batteries entre 30% et 90%. On remarque bien que le SOC des batteries initialement chargées à 90% diminue lorsque les batteries se déchargent et augmente lorsque les batteries se chargent.

IV.7.3.3 Simulation du système global

La figure (IV-15) représente la puissance totale fournie par le système hybride et de l'application de la gestion précédente (P_{PV} , P_{ch} , P_{bat}) :

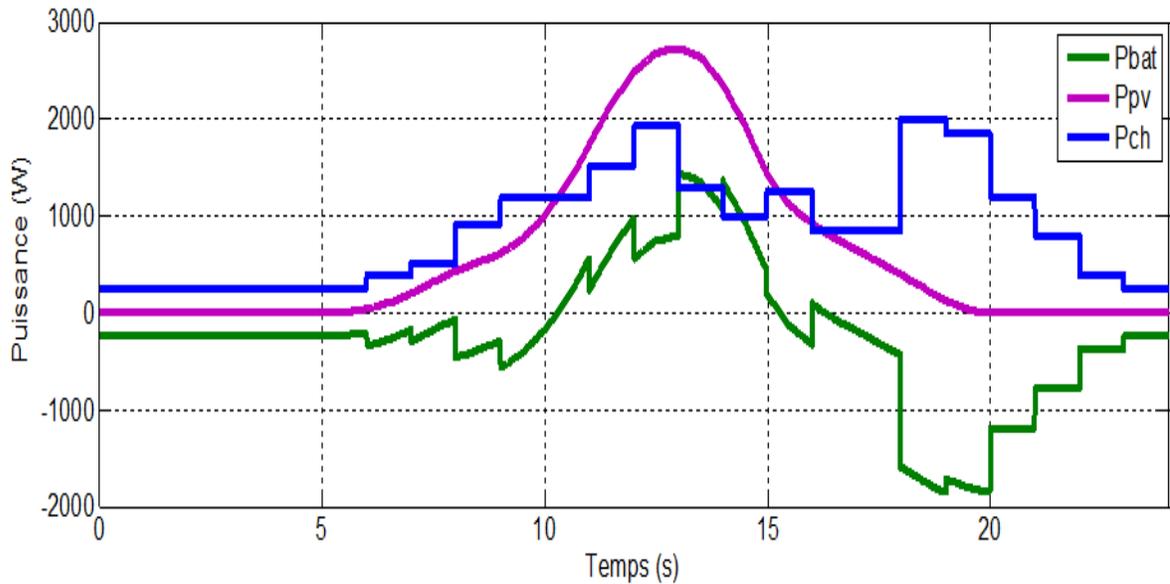


Figure IV-15 Allure des puissances du système globale.

D'après ces résultats, on peut déduire les modes de fonctionnement du système hybride avec l'algorithme de gestion. Les différents modes sont les suivants :

Mode 1 : De $t=10h30$ à $t=14h30$ et de $t=16h$ à $t=16h30$, durant ces intervalles de temps la puissance du générateur photovoltaïque fournie est supérieure à la demande de la charge et le $SOC < SOC_{max}$, l'excédent de puissance est alors utilisé pour recharger les batteries.

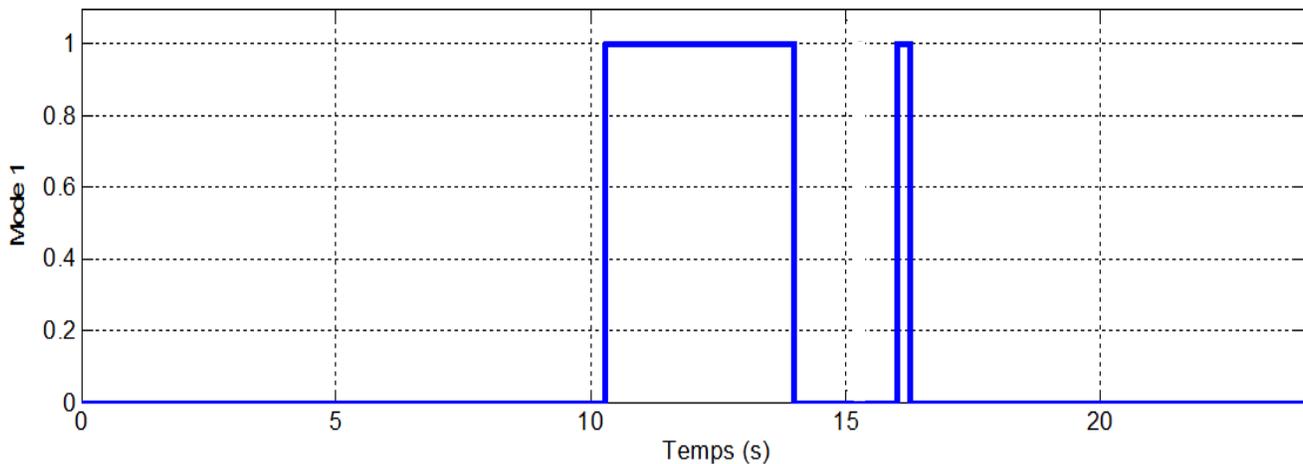


Figure IV-16 Mode 1.

Mode 2 : de $t=14h$ à $t=15h30$, il arrive qu'il y ait un excédent de puissance, en effet lorsque que la demande de la charge est satisfaite par la puissance du panneau ($P_{pv} > P_{ch}$) et que les batteries sont chargées ($SOC = SOC_{max}$), comme c'est le cas durant cet intervalle, on se retrouve avec un surplus de puissance qui est dû à un fort ensoleillement et une faible consommation.

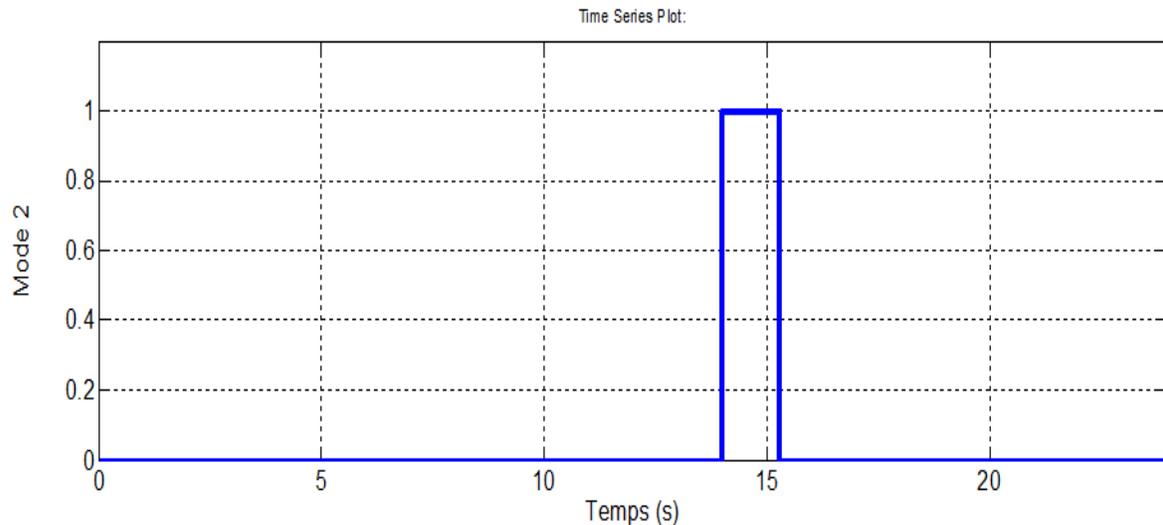


Figure IV-17 Mode 2.

Mode 3 : Dans le cas où la puissance fournie par le panneau serait insuffisante pour satisfaire la demande de la charge ($P_{pv} < P_{ch}$), la puissance des batteries vient alors s'ajouter à P_{pv} afin d'alimenter la charge sous condition que $SOC > SOC_{min}$. On retrouve deux variantes de ce mode, le cas où les batteries alimentent seules la charge ($P_{pv} = 0$) car l'ensoleillement est nul entre $[0h-6h]$ et $[20h-23h]$, et lorsque $P_{pv} \neq 0$ alors la charge est alimentée par les deux puissances ($P_{ch} = P_{pv} + P_{bat}$) qui se produisent aux intervalles ; $[6h-10h30]$, $[15h30-16h]$ et $[16h30-20h]$.

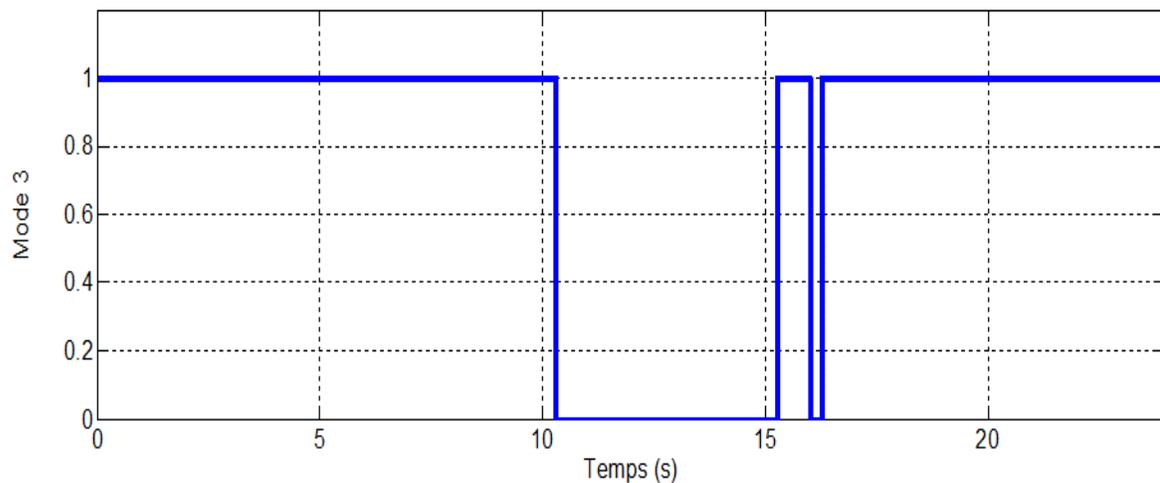


Figure IV-18 Mode 3.

Mode 4 : Si jamais la demande de la charge est supérieure à P_{pv} ($P_{ch} > P_{pv}$) et que les batteries ne sont pas chargées ($SOC = SOC_{min}$), la demande ne peut être satisfaite et donc le système doit être déconnecté. Dans notre cas, ce mode n'est pas réalisé car $SOC < SOC_{min}$ à tout instant.

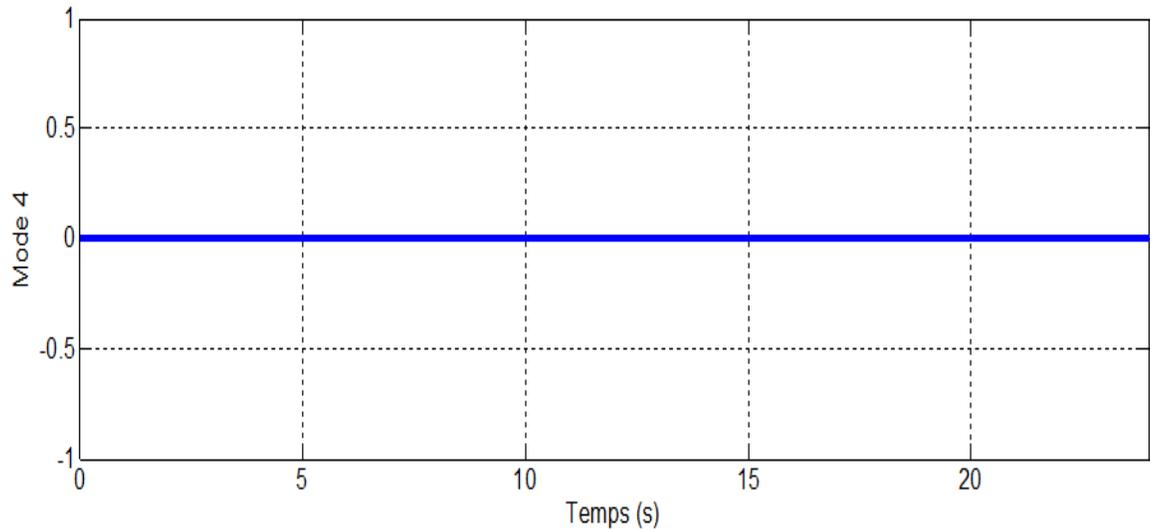


Figure IV-19 Mode 4.

IV.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une comparaison entre les deux méthodes MPPT modélisées, c'est-à-dire la méthode classique par la P&O et la méthode intelligente de contrôle par la logique floue, on s'est aperçu que la MPPT floue prend nettement les devants en termes de rendement et en temps de réponse.

Par la suite, nous avons procédé au dimensionnement des panneaux et des batteries en fonction de la charge demandée, nous sommes ensuite passés à la gestion de puissance de notre système en établissant un algorithme de gestion qui définit les différents modes de fonctionnement pour chaque période afin de maximiser le rendement de notre système et d'éviter les pertes de puissances.

Conclusion générale

Dans ce mémoire on a présenté une étude détaillée sur la gestion d'un système hybride PV/batterie avec une MPPT floue. Nous avons entamé le mémoire par une présentation des différents types d'énergies renouvelables et systèmes hybrides, puis on a décrit les différents systèmes hybrides ainsi que leurs différentes structures et architectures pour quelques combinaisons possibles.

Nous avons par la suite procédé à la modélisation de notre système hybride qui combine l'utilisation de panneaux photovoltaïques et batteries de stockage. On a introduit la technique de commande MPPT perturbation et observation (P&O) et nous avons expliqué son fonctionnement puis on a procédé à la présentation des résultats de simulations obtenus sous Matlab-Simulink sous différentes conditions atmosphériques. Puis nous avons modélisé et présenté les caractéristiques du modèle de la batterie à introduire dans notre système hybride.

Par la suite, nous nous sommes intéressés à la logique floue en expliquant en détails ce qu'était la logique floue et la différence entre elle et la logique booléenne, ainsi que la description du procédé de réalisation d'un régulateur flou étape par étape. Cette stratégie a été intégrée dans l'algorithme MPPT implémenté dans un convertisseur photovoltaïque pour extraire un maximum de puissance sous différentes irradiations

Nous avons dimensionné et mis en œuvre notre système hybride PV/batterie avec une MPPT floue, en utilisant une approche de simulation et une étude comparative entre les deux méthodes de MPPT étudiées, pour évaluer les performances du système. Les résultats ont montré que l'utilisation d'une MPPT floue fournit un contrôle optimal en s'adaptant aux différentes conditions de fonctionnement [27] et améliore considérablement les performances du système hybride contrairement à la P&O. Enfin, pour assurer le bon fonctionnement de notre système nous avons proposé une gestion d'énergie afin de contrôler le flux d'énergie entre les différents éléments et de surveiller l'état de charge et de décharge du stockage.

Perspectives

En vue de ces résultats, il serait pertinent de considérer :

- La poursuite de travaux sur les méthodes d'optimisation des contrôleurs MPPT flous notamment le PI-flou et en particulier le neuro-flou avec les avancées majeures du secteur de l'intelligence artificielle.
- Le système étudié dans le cadre de ce mémoire est un système fonctionnant au "fil du soleil", ce qui nous permet d'utiliser uniquement l'énergie solaire disponible. Il serait intéressant d'améliorer notre système en rajoutant une autre source d'énergie.

Références bibliographiques

- [1] M.Rabah Rouas, «Etude d'un système hybride éolien-photovoltaïque», thèse doctorat spécialité électrotechnique à l'université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2018.
- [2] D. Rekioua, S. Bensmail, C. Serir, T. Rekioua, «Power supervision of an autonomous photovoltaic/wind turbine/battery system with MPPT using adaptative fuzzy logic controller», International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE), 2023.
- [3] A. Azizi, «Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride», thèse de doctorat en énergies renouvelables soutenue à l'université de Badji-Mokhtar Annaba, 2019.
- [4] A. Mohammedi, « Contrôle par MPPT des systèmes de pompage photovoltaïque », thèse de doctorat en génie électrique à l'université de Bejaïa, 2015.
- [5] Extrait du site :
https://public.iutenligne.net/etudes-et-realisations/sivert/panneaux-photovoltaiques/2_principe_du_ne_cellule_photovoltaique.html , dernière consultation 25/04/2023.
- [6] S. Mezzai et K. Tadjine, «Etude d'un système hybride éolien-photovoltaïque», mémoire de master option énergies renouvelables à l'université de Béjaïa, Juin 2015.
- [7] M. Saidi, «Contribution à l'optimisation des systèmes hybrides de production énergétique à base de sources renouvelables», thèse de doctorat en automatique soutenue à Aix-Marseille Université, 2021.
- [8] Abdoul Karim Traoré, «Gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque éolien pour applications agricoles», mémoire de maîtrise en génie électrique à l'université du Québec à Trois-Rivières, Juillet 2016.
- [9] F. Zaouche, «Maximisation de puissance des systèmes photovoltaïque», thèse doctorat à l'université de Béjaïa, 2018.
- [10] L. Stoyanov, «Etude de différentes structures de systèmes hybrides a sources d'énergie renouvelables», thèse doctorat à l'université technique de Sofia, 28 octobre 2011.
- [11] H. Mehibel, «Dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque-diesel-batterie», mémoire de master en électrotechnique à l'école nationale polytechnique, Juin 2017.
- [12] A. Bounab et I. Arar, «Contribution à l'optimisation et la gestion d'une source d'énergie hybride photovoltaïque-éolien», mémoire de master à l'université de Béjaïa, 2020.
- [13] Extrait du site :
https://www.researchgate.net/publication/352262436_Enhancement_of_Extracted_Photovoltaic_Power_Using_Artificial_Neural_Networks_MPPT_Controller , dernière consultation 03/05/2023.

- [14] Faika Zaouche, Djamila Rekioua, Jean-Paul Gaubert , Zahra Mokrani, «Supervision and control strategy for photovoltaic generators with battery storage », International Journal of Hydrogen Energy, 4 Juillet 2017.
- [15] Y. Yahiaoui, "Commande MPPT à base la logique floue et les algorithmes génétiques", mémoire master université de Bejaia, 2013.
- [16] Y. Berkani et L. Afia, « Commande floue adaptative de la machine asynchrone », mémoire de master option automatisme industrielle à l'université de Béjaia, 2016.
- [17] A. Bellili et Y. Yagouni, « Optimisation d'un système photovoltaïque par la logique floue », mémoire de master option électrotechnique industrielle à l'université de Bejaia, 2020.
- [18] D. Yousfi, « Commande par logique floue d'une génératrice asynchrone double étoile en fonctionnement autonome», mémoire de master option électrotechnique industrielle à l'université de Bejaia, 2021.
- [19] Y. Elbia, « Commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux orienté », mémoire de Magister, Université Batna, 2009.
- [20] L.Baghli, « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et algorithmes génétiques » Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France ; 1999.
- [21] B. Bouchon-Meunier, C. Marsala, « Logique floue, principes, aide à la décision, Hermès Science Publications, Paris, 2003
- [22] F. Yahiaoui, F. Chabour, O. Guenounou, M. Bajaj, Syed Sabir Hussain Bukhari, M. Shahzad Nazir , M. Pushkarna, D. Wapet, «An Experimental Testing of Optimized Fuzzy Logic-Based MPPT for a Standalone PV System Using Genetic Algorithm» Article dans Mathematical Problems in Engineering,2023.
- [23] S. Aissou, S. Jacques, Z. Mokrani, D. Rekioua, T. Rekioua, A.Ouahabi,«Relevance of the P & O MPPT Technique in an Original PV-Powered Water Pumping Application», Journal of Energy and Power Engineering , 2015.
- [24] S. Taraft, D. Rekioua, D. Aouzellag, S. Bacha, « A proposed strategy for power optimization of a wind energy conversion system connected to the grid », Energy Convers Manag,2015.
- [25] F. Zaouche, D. Rekioua, J-P. Gaubert, Z. Mokrani, "Supervision and control strategy for photovoltaic generators with battery storage", International Journal of Hydrogen Energy, 4 Juillet 2017.

[26] D. Rekioua, T. Rekioua , A. Elsanabary, S. Mekhilef , «Power Management Control of an Autonomous Photovoltaic/Wind Turbine/Battery System», Article dans Energies, 2023.

[27] Housseem Chaouali, Hichem Othmani, Dhafer Mezghani, and Abdelkader Mami, « Improving the control strategy of a standalone pv pumping system by fuzzy logic technique», International Journal of Advanced Computer Science and Applications ,2017.