

**UNIVERSITÉ DE KASDI MERBAH – OUARGLA**

**Faculté des Hydrocarbures, des Énergies Renouvelables, et des Sciences de la Terre et  
de l'Univers**

**Département des énergies renouvelables**



**Mémoire**

Présenté pour l'obtention d'un diplôme de

**Master Academique**

**Filière : Electrotechnique**

**Spécialité : Energies Renouvelables en Electrotechnique**

**Présenté par :**

Nour El-houda HADJI

Intissar KRIKER

**Thème**

**Étude et simulation d'un système hybride  
solaire/éolien par logique floue**

**Soutenue publiquement, le 15 /06/2024, devant le jury compose de :**

Dr. Zhour ABADA	MCB, Université de Ouargla	Président
Dr. Mhamed DERNOUNI	MCB, Université de Ouargla	Rapporteur
Dr. Chouaib AMMARI	MCA, Université de Ouargla	Examinateur

**Année universitaire : 2024/2025**

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# ***Remerciements***

**Avant tout, je rends grâce à Allah, le Tout-Puissant, pour Ses innombrables bienfaits.**

**Nous Le remercions sincèrement de nous avoir accordé la force, la persévérance, la patience et la santé tout au long de ces années d'études.**

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à **Monsieur Dernouni Mhamed**, enseignant-chercheur à l'Université Kasdi Merbah, pour ses précieux conseils, sa patience, sa gentillesse et ses encouragements constants tout au long de ce travail.

Nous exprimons également notre sincère reconnaissance au **Dr Zhour Abada** et au **Dr Chouaib Ammari** pour avoir accepté de faire partie du jury et d'évaluer ce modeste travail.

Nos remerciements vont également à l'**Université Kasdi Merbah – Ouargla**, à l'ensemble de nos professeurs, ainsi qu'à toutes les personnes qui nous ont aidés, de près ou de loin, à mener à bien cette étude tout au long de notre parcours académique.

***Merci.***

*Nour El-houda HADJI*

*Intissar KRIKER*

# ***Dédicace***

**Je dédie ce travail à :**

**Ma mère,** Celle qui m'a donné la vie, le symbole de tendresse, qui s'est sacrifiée pour mon bonheur et ma réussite.

**Mon père,** pilier de ma vie, source inépuisable de soutien et d'encouragement .

**Mon frère Mohamed el amine,** qui a veillé au long de ma vie à m'encourager, à me donner l'aide et à me protéger.

**Ma sœur Amira,** qui ont été présent pour m'aider et m'encourager.

Tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

**A ma belle famille**

**A ma grande famille**

**A mes amis**

**Nour....**

# إهداء

(وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا)

[سورة طه، الآية 114]

الحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات، الحمد لله الذي علم بالقلم، علم الإنسان ما لم يعلم، الحمد لله الذي وفقني ويسر لي هذا الإنجاز رغم كل عجز وتقصير.

أهدي هذا العمل المتواضع خالصًا لوجه الله تعالى، راجيًا أن يكون فيه نفع، وأن يُحتسب في ميزان حسناتي يوم ألقاه.

إلى أبي إسماعيل، رجل الصبر والمواقف، قدوتي في الحكمة والثبات والالتزام،  
وإلى أمي، تاج رأسي، دعاؤها سر توفيقِي، ورضاها نوري في دربي،  
إلى إخوتي إدريس، وفارس، وعبد النافع، رفاق الدرب والداعمين الأوفياء،  
وإلى أختي الباتول، لمسة الدفء في أيامي.

كما أهديه إلى أساتذتي الفضلاء، من غرسوا فيّ العلم، وأوقدوا في قلبي نور الفهم، فجزاهم الله عني خير الجزاء.

إلى أصدقائي الصادقين، وكل من أحبني بصدق، ورافقتني بدعائه، وواساني بكلمة، أو بوقفته في لحظات ضعفي قبل قوتي.

وإلى كل من كان له أثر في طريقي، دون أن يدري، هذا العمل ثمرة دعائكم ومحبتكم، أسأل الله أن يجمعني بكم دائمًا على طاعته وفي رضاه.

اللهم اجعل هذا العمل خالصًا لوجهك الكريم، وبارك لي فيه، وانفع به عبادك، واجعله لي نورًا في الدنيا وذخرًا في الآخرة، ولا تجعل فيه رياءً ولا سمعةً.

آمين

## Liste des figures

<b>Chapitre I : Synthèse bibliographique</b>	
<b>Fig I.1:</b> Schéma synoptique du système d'énergie hybrid	4
<b>Fig I.2:</b> configuration du système hybride à bus continu	6
<b>Fig I.3:</b> configuration du système hybride à bus alternatif	6
<b>Fig I.4:</b> Composantes d'un champ de modules photovoltaïques	7
<b>Fig I.5 :</b> Représentation schématique d'une cellule PV	8
<b>Fig I.6 :</b> Cellule photovoltaïque monocristalline	9
<b>Fig I.7 :</b> Cellules photovoltaïques polycristallines	9
<b>Fig I.8 :</b> Cellules photovoltaïques amorphes	10
<b>Fig I.9 :</b> Conversion de l'énergie cinétique du vent	10
<b>Fig I.10:</b> Composantes d'une éolienne	11
<b>Fig I.11:</b> Photographie d'une éolienne à axe horizontal et d'un moulin à vent. et éolienne de Darrieus	12
<b>Fig I.12:</b> Charge et décharge de la batterie lithium ion	13
<b>Chapitre II : Modélisation du système hybride</b>	
<b>Fig II.1:</b> Système hybride PV/Éolien/Pile à combustible/Électrolyseur	16
<b>Fig II.2:</b> Configuration du système	17
<b>Fig II.3:</b> Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	18
<b>Fig II.4:</b> Configuration du système SEH global	18
<b>Fig II.5 :</b> Schéma bloc général du système global étudié en Simulink	19
<b>Fig II.6:</b> Architecture du système énergétique hybride	20
<b>Fig II.7:</b> Topologies d'hybridation ; (a) MPPT individuel, (b) MPPT commun	20
<b>Fig II.8:</b> Le système hybride éolien-photovoltaïque proposé	21
<b>Fig II.9:</b> Cellule solaire idéale	22
<b>Fig II.10:</b> Schéma électrique équivalent d'une cellule PV	22
<b>Fig II.11:</b> Influence de la température sur la caractéristique P(V)	24
<b>Fig II.12:</b> Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V)	24
<b>Fig II.13:</b> Tube de courant autour d'une éolienne	24
<b>Fig II.14:</b> Limite de Betz	25
<b>Fig II.15:</b> Génération d'une vitesse de référence à partir du modèle de l'éolienne	26
<b>Fig II.16 :</b> Caractéristique de décharge de la batterie	27
<b>Fig II.17:</b> Ccaractéristiques comparées Li-ion et Plomb-Acide	27
<b>Fig II.18:</b> Schéma de principe d'un convertisseur Boost	29
<b>Fig II.19:</b> Schéma de principe du convertisseur Buck-Boost	29
<b>Fig II.20:</b> Schéma de principe du convertisseur non-inverseur Buck/Boost	30
<b>Fig II.21:</b> Schéma d'un onduleur avec filtre LCL sou Matlab Simulink	30
<b>Fig II.22:</b> Tension à la sortie d'un onduleur non filtrée et filtrée	31
<b>Fig II.23:</b> Le modèle Simulink d'un système de conversion d'énergie éolienne	31
<b>Fig II.24:</b> Le modèle Simulink d'un système photovoltaïque (PV)	32
<b>Fig II.25:</b> Le modèle Simulink d'un circuit de charge/décharge de batterie	32

<b>Chapitre III : Conception du système de contrôle MPPT</b>	
<i>Fig III.1: Courbe representee la strategie P&amp;O</i>	35
<i>Fig III.2: Organigramme de l'algorithme P&amp;O</i>	35
<i>Fig III.3: Courbe representee la strategie IncCond</i>	36
<i>Fig III.4: Courbe representee la strategie PSF</i>	36
<i>Fig III.5: Courbe representee la strategie Hill Climbing</i>	37
<i>Fig III.6 : Schéma bloc de la commande MPPT P&amp;O</i>	37
<i>Fig III.7: Comparaison entre un ensemble classique et un ensemble flou</i>	39
<i>Fig III.8: Représentation graphique d'une variable linguistique</i>	39
<i>Fig III.9: Différentes formes des fonctions d'appartenance</i>	40
<i>Fig III.10: Schéma synoptique général d'un contrôleur flou</i>	41
<i>Fig III.11: Structure d'un contrôleur MPPT flou</i>	43
<i>Fig III.12: Organigramme d'un contrôleur flou pour l'optimisation du rapport cyclique</i>	44
<i>Fig III.13: Fonctions d'appartenance des variables d'entrée E et CE</i>	45
<i>Fig III.14: Fonction d'appartenance de la variable de sortie D</i>	45
<i>Fig III.15: Structure du contrôleur MPPT basé sur la logique floue de type Mamdani</i>	46
<b>Chapitre IV : Simulation et résultats</b>	
<i>Fig IV.1: Structure du système hybride raccordé au réseau</i>	48
<i>Fig IV.2: Schéma bloc d'un système hybride connecté au réseaux</i>	48
<i>Fig IV.3: Paramétrage du profil d'irradiation solaire dans Simulink</i>	49
<i>Fig IV.4: Performance des modules solaires sous une irradianance variable</i>	50
<i>Fig IV.5: Vitesse de vent</i>	51
<i>Fig IV.6: Caractéristique de la puissance générée par la turbine pour un angle de calage <math>\beta=0</math></i>	51
<i>Fig IV.7: Caractéristique de décharge de la batterie pour différentes valeurs du courant.</i>	52
<i>Fig IV.8: Résultats de simulation de sortie du système PV avec commande P&amp;O</i>	52
<i>Fig IV.9: Résultats de simulation de sortie du système PV commandé par une logique floue</i>	53
<i>Fig IV.10: Résultats de simulation générateur éolienne (P&amp;O)</i>	54
<i>Fig IV.11: Image agrandie du résultats de générateur éolienne (P&amp;O)</i>	54
<i>Fig IV.12: Résultats de simulation générateur éolienne (logique floue)</i>	54
<i>Fig IV.13: Image agrandie du résultats de générateur éolienne (logique floue)</i>	55
<i>Fig IV.14: Résultats de simulation de sortie du système éolienne avec commande P&amp;O</i>	55
<i>Fig IV.15: Résultats de simulation de sortie du système éolienne commandé par une logique floue</i>	56
<i>Fig IV.16: Résultats de simulation de Batterie (P&amp;O)</i>	56
<i>Fig IV.17: Résultats de simulation de Batterie (logique floue)</i>	57
<i>Fig IV.18: Résultats de simulation de réseau électrique et de charge AC (P&amp;O)</i>	57
<i>Fig IV.19: Résultats de simulation de réseau électrique et de charge AC (logique floue)</i>	58

## Liste des tableaux

<b>Chapitre III : Conception du système de contrôle MPPT</b>	
<b>Tableau III.1: Les règles du régulateur FLC</b>	46
<b>Chapitre IV : Simulation et résultats</b>	
<b>Tableau IV.1:Caractéristiques électriques de Module</b>	49
<b>Tableau IV.2:Caractéristiques Techniques de l'éolienne</b>	50
<b>Tableau IV.3:Caractéristiques de la batterie</b>	52

### Liste des symboles

<b>Grandeur</b>	<b>Signification</b>	<b>Unité</b>
$I$	Courant du module PV	(A)
$I_{cc}$	Courant de court-circuit	(A)
$I_o$	Courant de saturation inverse de la diode	(A)
$I_G$	Courant du générateur PV	(A)
$I_{ph}$	Photo-courant du module	(A)
$I_M$	Courant au point de MPPT	(A)
$K$	Constante de Boltzmann, $1,38 * 10^{-23}$	(J/K)
$q$	Charge de l'électron, $(1,6 * 10^{-19})$	[C]
$T$	Température du module	(K)
$V$	Tension aux bornes du module	(V)
$V_{co}$	Tension de circuit ouvert	(V)
$V_T$	Tension thermique	(V)
$V_M$	Tension au point de MPPT	(V)
$n$	Facteur d'idéalité de la diode	Sans unité
$R_s$	Résistance série	( $\Omega$ )
$R_{sh}$	Résistance parallèle	( $\Omega$ )
$\Omega_{mec}$	Vitesse de rotation mécanique du rotor	[rad/s]
$R$	Résistance statorique	[ $\Omega$ ]
$V$	Vitesses du vent	[m/s]
$C_{aer}$	Couple aérodynamique	[N.m]
$R$	Rayon de la pale	[m]
$\rho$	Masse volumique de l'air en température ambiante	(15°C)
$C_p$	Coefficient de puissance de la turbine	Sans unité
$P_m$	Puissance extraite par le rotor éolien	W
$\lambda$	Vitesse spécifique ou ration de vitesse, Tip-Speed-Ratio	Sans unité
$\Omega$	Vitesse de rotation de la génératrice	[rad/s]
$\rho$	Densité de l'air	1,225 kg.m <sup>-3</sup>
$S$	Surface balayée par le rotor de l'éolienne	[m <sup>2</sup> ]
$V_{in}$	Tension d'entrée	(V)
$V_{out}$	Tension de sortie	(V)
$D$	Rapport cyclique	Sans unité
$g$	Commande de l'interrupteur	G
$E$	Energie incidente	(W - 2 .m)
$E$	L'Erreur	Sans unité
CE	Variation de l'erreur	Sans unité

***Liste des abréviations***

<i>SHER</i>	les systèmes hybrides d'énergies renouvelables
<i>MPP</i>	Maximum power point (point de puissance maximale)
<i>MPPT</i>	<i>Suivi du Point de Puissance Maximale (Maximum Power Point Tracking)</i>
<i>PSO</i>	<i>Optimisation par Essaim de Particules (Particle Swarm Optimization)</i>
<i>AFLC</i>	<i>Contrôleur flou adaptatif</i>
<i>P&amp;O</i>	<i>Perturbation et observation.</i>
<i>IncCond</i>	<i>Incrémental Conductance (Conductance Incrémentale)</i>
<i>PSF</i>	<i>Power signal feedback</i>
<i>SMC</i>	<i>le contrôle à mode glissant</i>
<i>FLC</i>	<i>contrôle par logique floue (Fuzzy logic control)</i>
<i>HCS</i>	<i>escalade de colline (Hill Climbing Search)</i>
<i>GPV</i>	<i>Générateur photovoltaïque</i>
<i>DC</i>	<i>Direct Current (courant continu)</i>
<i>AC</i>	<i>Alternative Current (courant alternative)</i>
<i>BT</i>	<i>Basse Tension</i>
<i>SOC</i>	<i>État de charge (State of charge)</i>
<i>MLI</i>	<i>Modulation de Largeur d'Impulsion</i>

## Table des matières

Remerciements	I
Dédicace	II
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	V
Liste des symboles	VII
Liste des abréviations	VIII
Table des matières	IX
Introduction générale	1
<b>Chapitre I : Synthèse bibliographique</b>	
1.Introduction	4
2.Les systèmes hybrides d'énergies renouvelable	4
2.1. Définition et concepts des système hybride	4
2.2. Classification	5
2.2.1. Le régime du fonctionnement	5
2.2.2. La structure du système hybride	5
2.3. Configuration du bus dans les systèmes hybrides	5
2.3.1. Architecture à bus continu CC	5
2.3.2. Architecture à bus alternatif AC	6
3.Composants d'un Système hybride	7
3.1. Système photovoltaïque	7
3.1.1. Définition les systèmes photovoltaïques	7
3.1.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	7
3.1.3. Les différents types de cellules photovoltaïques	8
3.1.3.1. La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin	8
3.1.3.2. La cellule photovoltaïque en silicium Poly cristallin	9
3.1.3.3. La cellule au silicium Amorphe	9
3.2. Système de l'énergie éolienne	10
3.2.1. Définition de l'énergie éolienne	10
3.2.2. Principaux composants d'une éolienne	10
3.2.3. Caractéristiques des éoliennes	12
3.3.Systèmes de conversions	12
3.3.1. Les hacheurs	12
3.3.2. Les onduleurs	13
3.4. Système Stockage	13
3.4.1. Batterie lithium	13
4. Avantages et inconvénients d'un système hybride	14
6.Conclusion	14
<b>Chapitre II : Modélisation du système hybride</b>	
1.Introduction	16
2.Travaux similaires et recherches antérieures	16
3. Modélisation d'une cellule solaire	21
3.1. Caractéristique d'un module solaire I-V, P-V	23
4.Modélisation de la conversion d'énergie éolienne	24
4.1 Loi de Betz	24
4.2. Modèle de la turbine éolienne	25
5.Modélisation des batteries Lithium	26

6. Modélisation de Convertisseur	28
6.1. Les hacheurs	28
6.2. Bidirectional DC DC (buck-boost converter)	29
6.3. Modélisation de l'onduleur	30
7. Analyse et simulation de systèmes de conversion d'énergie à l'aide de Simulink	31
8. Conclusion	32
<b>Chapitre III : Conception du système de contrôle MPPT</b>	
1. Introduction	34
2. Commande MPPT	34
2.1. Techniques MPPT classiques	34
2.1.1. P&O (Perturb and Observe)	34
2.1.2. Incremental Conductance (IncCond)	35
2.1.3. La méthode (Power Signal Feedback control)	36
2.1.4. Hill Climbing	36
3. Application de la commande mppt P&O	37
4. Techniques avancées	37
4.1. Introduction à la logique floue	38
4.2. Eléments de base de la logique floue	38
4.2.1. Ensembles flous	38
4.2.2. Variables linguistiques	39
4.2.3. Fonctions d'appartenance	39
4.3. Structure générale d'un régulateur floue	40
4.3.1. Interface de La fuzzification	41
4.3.2. Base de règles	41
4.3.3. L'inférence floue	41
4.3.4. Interface de défuzzification	42
4.4. Les avantages et inconvénients de la commande par la logique floue	43
4.5. Application de la commande mppt par la logique floue	43
5. Conclusion	46
<b>Chapitre IV : Simulation et résultats</b>	
1. Introduction	48
2. Simulation d'un Système Hybride raccordé au réseau	48
2.1. Caractéristique du système hybride simulé	49
2.1.1. Système Photovoltaïque	49
2.1.2. Système Eolien	50
2.1.3. Système de stockage	51
3. Résultats de la Simulation	52
3.1. Panneau photovoltaïque (PV)	52
3.2. Turbine éolienne (WT)	53
3.3. Batterie	56
3.4. Réseau électrique et charge AC	57
4. Résumé comparatif	58
5. Conclusion	59
Conclusion générale	60
Références	62
Résumé	

**I**ntroduction

**Générale**

## **Introduction générale**

L'énergie est aujourd'hui au cœur des préoccupations mondiales, en raison de l'augmentation rapide de la demande énergétique, des enjeux environnementaux et du changement climatique. Dans ce contexte, la transition vers des sources d'énergie renouvelables est devenue une nécessité pour réduire la dépendance aux combustibles fossiles et limiter les impacts négatifs sur l'environnement.

Les technologies d'énergie renouvelable (ER), telles que l'éolien et le photovoltaïque, ont atteint une maturité technologique et offrent une compétitivité économique de plus en plus prometteuse. Cependant, ces sources souffrent d'un inconvénient majeur : leur dépendance aux conditions météorologiques, ce qui engendre une production d'énergie intermittente. En cela, l'utilisation de systèmes hybrides combinant plusieurs sources d'énergie (énergies renouvelables, réseau électrique national ou générateurs classiques) associées à des systèmes de stockage, apparaît comme une solution d'avenir, à la fois fiable et performante. [1]

Dans ce contexte, les systèmes hybrides solaires/éoliens se présentent comme une solution prometteuse pour répondre aux besoins énergétiques de manière durable et fiable. Ces systèmes combinent deux sources d'énergie renouvelable complémentaires : l'énergie solaire et l'énergie éolienne.

L'objectif de ce travail est de concevoir, modéliser et simuler un système hybride combinant des sources photovoltaïques et éoliennes, connecté au réseau électrique. Ce système vise à améliorer l'efficacité énergétique grâce à l'intégration de techniques de commande MPPT classiques (telles que Perturb & Observe) et intelligentes (basées sur la logique floue), afin d'optimiser l'extraction de puissance et renforcer la robustesse face aux variations climatiques.

À cette fin, ce mémoire s'articule autour des étapes suivantes :

- Présentation des notions de base sur les systèmes hybrides solaires/éoliens, leurs composants, les méthodes MPPT classiques et la logique floue.
- Modélisation du système hybride complet sous Simulink/MATLAB.
- Conception et implémentation de deux commandes MPPT P&O et logique floue.
- Analyse comparative des résultats de simulation pour évaluer les performances énergétiques et la stabilité du système.

# **C**hapitre I

## **Synthèse bibliographique**

## 1.Introduction :

Face à la croissance de la demande énergétique et aux enjeux environnementaux, les systèmes hybrides d'énergies renouvelables (SHER) combinant énergie solaire (PV), éolienne, systèmes de conversion et stockage par batteries Li-ion apparaissent comme une solution prometteuse pour assurer une production électrique fiable et durable.

Ce chapitre propose une revue des principales composantes de ces systèmes (sources, conversions, stockage) et présente les travaux de recherche antérieurs dans le domaine. L'objectif est de mieux comprendre les architectures existantes, les approches de gestion de l'énergie, ainsi que les défis techniques liés à l'intégration de ces technologies.

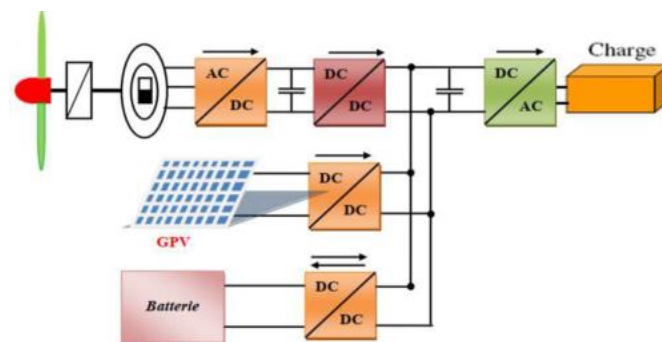
## 2.Les systèmes hybrides d'énergies renouvelables :

### 2.1. Définition et concepts des système hybride à ER:

Un système de production d'énergie hybride combine plusieurs sources d'énergie facilement accessibles afin de générer de l'électricité. L'association de ces sources avec des dispositifs de stockage d'énergie offre plusieurs avantages :

- Le système fonctionne sans interruption ;
- La possibilité de conserver l'énergie résiduelle générée par le système ;
- Sécurité d'approvisionnement, quelles que soient les conditions météorologiques.

Dans notre étude, nous nous intéressons plus particulièrement à un système hybride combinant deux sources d'énergie renouvelable (le photovoltaïque et l'éolien) couplées à une batterie de stockage.[2]



*Fig I.1: Schéma synoptique du système d'énergie hybrid[2].*

## **2.2. Classification :**

Plusieurs classifications des systèmes hybrides sont établies selon le critère choisi. Les classifications les plus répandues sont présentées ci-dessous.

### **2.2.1. Le régime de fonctionnement :**

Les systèmes hybrides se divisent en deux catégories :

- Connectés au réseau, ils assistent le réseau national en alimentant les charges.
- Autonomes ou isolés, ils couvrent les besoins en énergie dans des zones non raccordées, comme les villages reculés ou les refuges.[3]

### **2.2.2. La structure du système hybride :**

Trois critères peuvent être pris en compte dans conception d'un système hybride. Le premier consiste à déterminer si une source d'énergie traditionnelle est présente (turbine à gaz, générateur diesel ou réseau électrique). Le deuxième concerne la présence d'un dispositif de stockage (batteries, électrolyseurs avec réservoirs d'hydrogène, volants d'inertie), utile pour répondre à la demande en cas d'absence du fournisseur principal. La troisième repose sur le type de sources d'énergie renouvelable (éoliennes, photovoltaïque, hydraulique ou combinaison), choisi selon le potentiel énergétique local.[3]

## **2.3. Configuration du bus dans les systèmes hybrides :**

Les générateurs électriques des systèmes hybrides peuvent être connectés de différentes manières, qu'ils soient issus de sources renouvelables pures, non renouvelables ou mixtes. Deux configurations principales sont possibles pour les systèmes d'énergie hybride composés de sources d'énergie renouvelables, avec ou sans dispositif de stockage.[4]

### **2.3.1. Architecture à bus continu CC :**

Dans le système hybride de la figure, l'énergie de chaque source est centralisée sur un bus DC. Les systèmes AC utilisent un redresseur pour convertir leur énergie en DC. Les générateurs sont connectés en série avec un onduleur qui alimente les charges AC à partir du bus DC.[4]

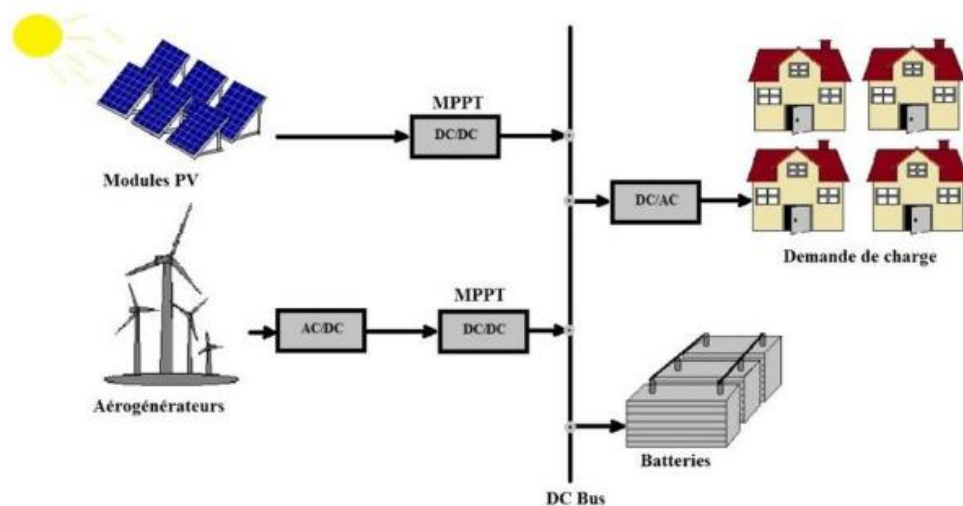


Fig I.2: Configuration du système hybride à bus continu [5]

### 2.3.2. Architecture à bus alternatif AC :

Dans cette topologie, tous les composants du système hybride sont connectés à la charge AC, comme montré dans la figure. Cette configuration offre de meilleures performances, car chaque adaptateur peut être synchronisé avec son générateur pour alimenter la charge indépendamment et simultanément. Cela donne une grande flexibilité aux sources d'énergie. Toutefois, la mise en œuvre est complexe à cause du fonctionnement en parallèle et de la nécessité de synchroniser la tension de sortie avec celle de la charge.[4]

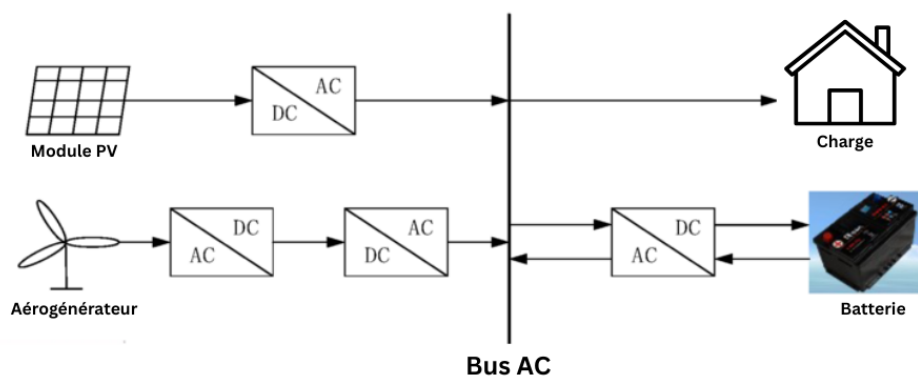


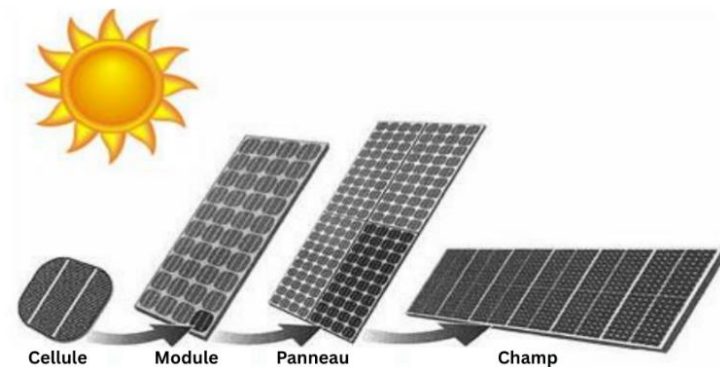
Fig I.3: Configuration du système hybride à bus alternatif.

### 3. Composants d'un Système hybride :

#### 3.1. Système photovoltaïque :

##### 3.1.1. Définition des systèmes photovoltaïques :

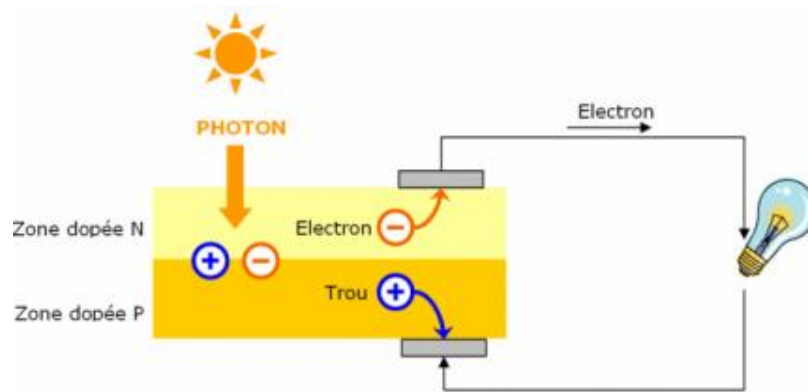
La cellule photovoltaïque est un composant électronique qui produit de l'électricité par effet photovoltaïque. Toutefois, elles génèrent peu d'électricité et sont très fragiles et sensibles aux facteurs externes. Pour une utilisation généralisée, les cellules sont connectées en série pour augmenter la tension, et en parallèle pour accroître le courant. La combinaison de nombreuses cellules en série et en parallèle forme un module photovoltaïque.[6]



*Fig I.4: Composantes d'un champ de modules photovoltaïques.[7]*

##### 3.1.2. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque :

Le fonctionnement des cellules photovoltaïques repose sur l'effet photovoltaïque, qui convertit directement l'énergie solaire en électricité. Sous la lumière, des charges positives et négatives sont générées dans un semi-conducteur. Les cellules, fabriquées à partir de tranches de silicium dopées au phosphore (type N) ou au bore (type P), forment une jonction PN. Un champ électrique s'y crée, séparant les charges. Des contacts métalliques, en grille à l'avant et contact plein à l'arrière, collectent ensuite le courant électrique.[9]



*Fig I.5 : Représentation schématique d'une cellule PV.[8]*

Une cellule photovoltaïque est un dispositif qui permet de convertir l'énergie solaire en énergie électrique. Cette transformation repose sur trois mécanismes principaux :

- **L'absorption des photons** par le matériau constituant le dispositif ;
- **La conversion de l'énergie des photons en énergie électrique**, via la création de paires électron/trou dans le matériau semi-conducteur ;
- **La collecte des particules générées** dans le dispositif.

Le matériau utilisé dans une cellule photovoltaïque doit donc posséder des niveaux d'énergie appropriés et une conductivité suffisante pour permettre le passage du courant électrique. C'est pourquoi l'industrie photovoltaïque s'intéresse particulièrement aux matériaux semi-conducteurs.

Pour collecter efficacement les porteurs de charge générés (électrons et trous), un champ électrique est nécessaire afin de séparer les paires créées. Pour cela, on utilise le plus souvent une jonction P-N.[9]

### **3.1.3. Les différents types de cellules photovoltaïques :**

Actuellement, il existe trois principaux types de cellules :

#### **3.1.3.1. La cellule photovoltaïque en silicium monocristallin :**

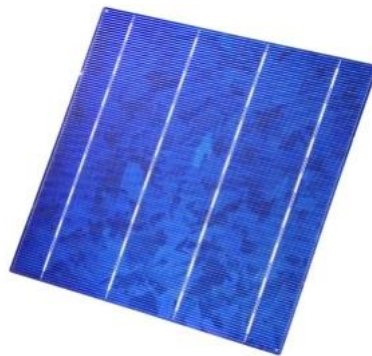
Le silicium monocristallin est obtenu par refroidissement contrôlé de la fonte de silicium. Une fois solidifié, il forme un cristal unique et homogène, découpé en tranches pour la fabrication des cellules photovoltaïques. Ce matériau se caractérise par une couleur bleue uniforme, sans traces visibles de cristaux.[10]



*Fig I.6 : Cellule photovoltaïque monocristallin .[11]*

### **3.1.3.2. La cellule photovoltaïque en silicium Poly cristallin :**

Facilement reconnaissable par sa couleur bleue uniforme, la cellule en silicium monocristallin est constituée d'une seule tranche de silicium pur, généralement carrée aux coins arrondis, et utilisée dans les installations industrielles, domestiques ou agricoles.[12]



*Fig I.7 : Cellules photovoltaïques polycristallines.[13]*

### **3.1.3.3. La cellule au silicium Amorphe :**

La cellule photovoltaïque en silicium amorphe est composée d'une fine couche de silicium, plus mince que celles des cellules monocristallines ou polycristallines. Elle est utilisée pour alimenter des appareils à faible puissance, comme les montres solaires, les lampes de jardin ou les calculatrices solaires. [12]

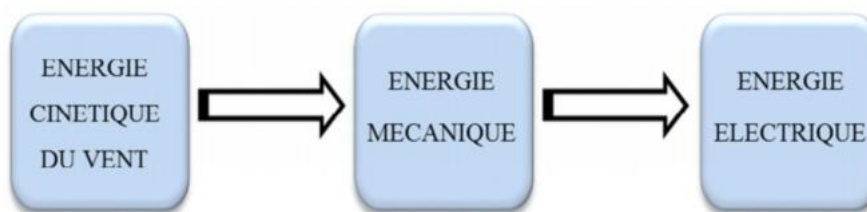


*Fig I.8 : Cellules photovoltaïques amorphes [14]*

### 3.2. Système de l'énergie éolienne :

#### 3.2.1. Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est l'énergie du vent, captée par un dispositif éolien comme une éolienne ou un moulin à vent. C'est une énergie renouvelable, inépuisable et non polluante, produisant ni rejets atmosphériques ni déchets radioactifs. Un aérogénérateur, ou éolienne, convertit l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.[15]

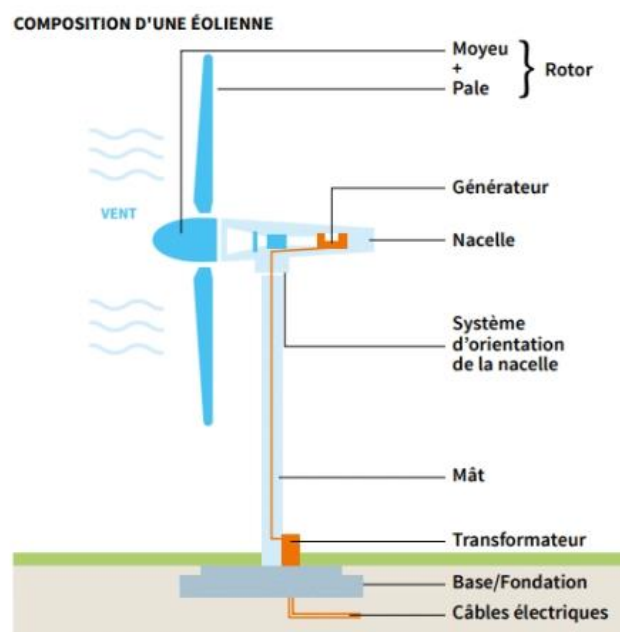


*Fig I.9 : Conversion de l'énergie cinétique du vent. [16]*

#### 3.2.2. Principaux composants d'une éolienne :

Il existe de nombreuses configurations d'éoliennes, qui peuvent présenter des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement composée de trois éléments principaux :

1. **Le mât** : Il s'agit généralement d'un tube en acier ou d'une structure en treillis métallique, appelée tour, qui supporte l'éolienne et abrite les câbles de transport de l'énergie électrique. Le mât doit être haut, car le vent souffle plus fort à plusieurs dizaines de mètres du sol, où il est moins perturbé. Pour les éoliennes de grande puissance, la hauteur de la tour peut atteindre jusqu'à 80 mètres.[17]
2. **La nacelle** : Installée au sommet du mât, elle contient les composants mécaniques et électriques nécessaires au fonctionnement de l'éolienne (multiplicateur, générateur, système de refroidissement, etc.).[17]
3. **Le rotor** : C'est le composant qui capte l'énergie du vent et la transforme en énergie mécanique. Il est constitué de pales fixées à un arbre principal (arbre lent) qui transmet le mouvement au reste du système. Dans certaines éoliennes, cet arbre intègre un système hydraulique pour réguler le fonctionnement, comme le pas variable des pales ou le freinage du rotor.[17]



*Fig I.10: Composantes d'une éolienne. [18]*

### 3.2.3. Caractéristiques des éoliennes :

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux types de turbines éoliennes :éolienne à axe vertical et à axe horizontal [19]



*Fig I.11: Photographie d'une éolienne à axe horizontal et d'un moulin à vent. [20] et éolienne de Darrieus.[21]*

### 3.3. Systèmes de conversions :

Un convertisseur d'énergie est un dispositif placé entre la source et la charge. Il distingue deux types principaux de convertisseurs :

- **Les convertisseurs continu–continu** : appelés hacheurs,
- **Les convertisseurs continu–alternatif** : appelés onduleurs. [22]

#### 3.3.1. Les hacheurs :

L'utilisation de ces hacheurs permet un contrôle flexible et efficace de la puissance électrique dans les circuits en courant continu (DC), tout en assurant un rendement élevé. Il existe plusieurs types de hacheurs ; parmi les plus courants, on peut citer :

- **Le hacheur boost** (ou hacheur d'élévation),
- **Le hacheur buck** (ou hacheur abaisseur),
- **Le hacheur buck-boost** (qui peut élever ou abaisser la tension).[22]

### 3.3.2. Les onduleurs :

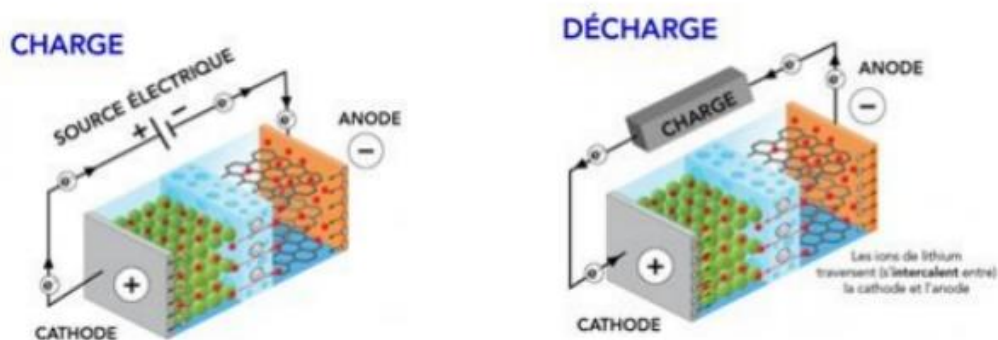
Un onduleur est un dispositif électronique qui permet de convertir une source de courant continu (DC) en courant alternatif (AC). Grâce à sa structure réversible, il peut également permettre l'échange de puissance dans l'autre sens si nécessaire. Il est souvent utilisé pour alimenter des charges AC à partir de sources DC comme les batteries ou les panneaux solaires. [22]

### 3.4. Système Stockage :

Pour des raisons de sécurité, de qualité de service et de coût, de nombreux domaines d'application souhaitent ou doivent se protéger contre toute panne de courant en disposant d'une source d'alimentation indépendante et fiable (énergie de secours). Parmi les options possibles, la batterie d'accumulateurs au lithium représente une solution de stockage particulièrement attrayante.[22]

#### 3.4.1. Batterie lithium:

Une batterie lithium-ion (Li-ion) est une technologie avancée utilisant les ions lithium comme composant clé de son électrochimie. Lors de la décharge, les atomes de lithium de l'anode sont ionisés, les ions traversent l'électrolyte vers la cathode, où ils se recombinaient avec leurs électrons. Les ions lithium, assez petits, passent à travers un séparateur micro-perméable entre anode et cathode. Grâce à leur petite taille, les batteries Li-ion offrent une haute tension et un bon stockage de charge par unité de masse et de volume. Elles peuvent utiliser divers matériaux d'électrodes, la combinaison la plus courante étant oxyde de cobalt et lithium (cathode) et graphite (anode), utilisée dans les appareils portables. D'autres cathodes incluent l'oxyde de manganèse et lithium (voitures hybrides/électriques) ou le phosphate de fer et lithium. L'électrolyte est généralement un éther. [23]



*Fig I.12: Charge et décharge de la batterie lithium ion [23]*

#### **4. Avantages et inconvénients d'un système hybride :**

##### **A. Avantages:**

- ❖ Assurer la continuité de l'énergie.
- ❖ Ne dépend pas d'une seule source d'énergie.
- ❖ Flexible, évolutif et capable de s'adapter à des charges évolutives.

##### **B. Inconvénients:**

- ❖ Plus complexes que les systèmes mono-source et nécessitent un stockage.
- ❖ Coût capital élevé.[24]

#### **6.Conclusion :**

Ce chapitre a posé les bases essentielles à la compréhension des systèmes hybrides d'énergies renouvelables, notamment ceux combinant l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne. En abordant leurs composants, principes de conversion et différentes configurations possibles, nous avons mis en lumière les atouts et les enjeux liés à leur intégration. Ce cadre théorique constitue ainsi un fondement solide pour aborder les étapes de modélisation, de commande et d'optimisation du système proposé dans ce travail.

# **C**hapitre II

## **Modélisation du système hybride**

## 1.Introduction :

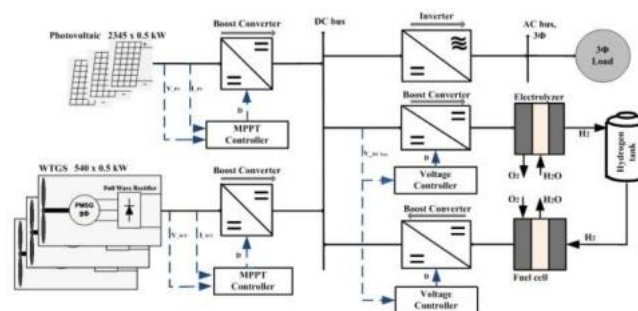
Ce chapitre présente la modélisation des principales composantes d'un système hybride : panneaux photovoltaïques, éolienne, convertisseurs et batteries Li-ion. L'objectif est de représenter leur comportement pour permettre une simulation réaliste du système, en vue d'optimiser sa performance et sa gestion énergétique.

## 2.Travaux similaires et recherches antérieures:

Pour commencer, il est important d'examiner les travaux portant sur les systèmes hybrides qui emploient les méthodes MPPT classiques :

Y Kebbati et L Baghli (2022) ont mené une étude visant à concevoir, modéliser et contrôler un système hybride photovoltaïque-éolien raccordé au réseau pour la région d'Adrar, en Algérie, afin de diversifier le mix énergétique et améliorer la fiabilité du réseau. Une méthode de contrôle utilisant des contrôleurs PI optimisés par un algorithme PSO amélioré a été développée pour maximiser la production. L'évaluation, montre que le système est techniquement viable, rentable économiquement et permet une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre. [25]

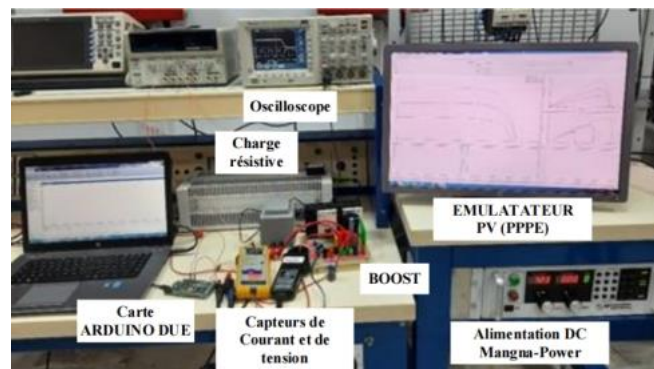
S Soediby et al, (2019) proposent la conception d'un système hybride autonome. Les sources sont intégrées via un bus en courant continu (DC) et gérées par des convertisseurs DC-DC avec deux contrôleurs principaux : un MPPT basé sur la conductance incrémentale pour maximiser la production solaire et éolienne, et un contrôle de tension constant pour stabiliser le bus en cas de fluctuations. Les résultats montrent une amélioration de la stabilité de la tension, une production efficace d'énergie renouvelable et une alimentation continue avec une bonne qualité d'électricité. [26]



**Fig II.1:** Système hybride PV/Éolien/Pile à combustible/Électrolyseur [26]

Ensuite, certaines recherches se sont orientées vers l'intégration de la logique floue pour la gestion globale des systèmes hybrides :

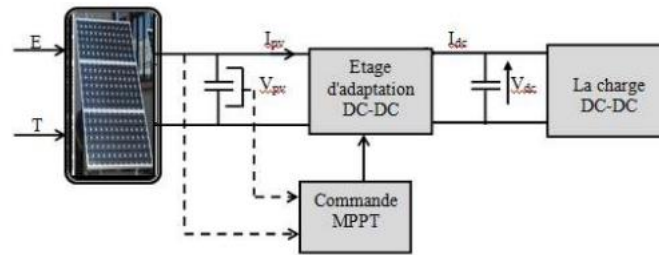
Adil Atoui (2023) a présenté une thèse visant à développer un système de gestion d'énergie performant basé sur la commande à logique floue pour un système hybride PV-Diesel-Batteries alimentant une charge isolée. Le système est modélisé avec un réglage optimisé des paramètres FLC à l'aide de l'algorithme PSO. Les résultats montrent une efficacité du générateur PV jusqu'à 99,5 %, une réduction de l'overshoot du bus DC à 2 %, et une performance supérieure par rapport aux systèmes classiques, notamment dans la gestion des transitions entre MPPT et LPP. [27]



*Fig II.2: Configuration du système. [27]*

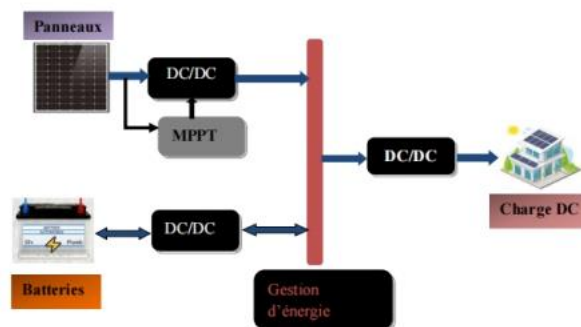
Par ailleurs, plusieurs études ont appliqué la logique floue uniquement dans le contrôle du MPPT, soit pour les systèmes photovoltaïques, soit pour les éoliennes :

A Bellili et Y Yagouni (2020), fait un travail vise à optimiser un système photovoltaïque en utilisant une commande MPPT basée sur la logique floue améliorée par un régulateur PI, afin de maximiser la puissance extraite malgré les variations rapides d'ensoleillement et de température. Les résultats démontrent que la commande floue PI offre une meilleure stabilité, réduit les oscillations caractéristiques de la méthode P&O et les pertes de puissance, assurant ainsi une performance supérieure dans la recherche du point de puissance maximale, même sous conditions climatiques instables. [28]



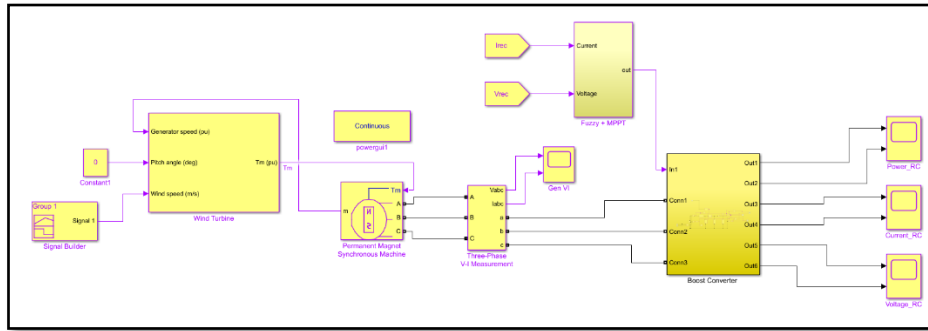
**Fig II.3:** Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque [28]

Le mémoire de S Belmellat et C Bedjguelel (2023) se sont focalisé sur la gestion énergétique d'un système hybride composé de panneaux photovoltaïques et de batteries. La méthodologie comprend la modélisation du système, la mise en œuvre de la commande floue, et une comparaison par simulation avec la méthode classique (P&O). Les résultats démontrent que la commande par logique floue assure un contrôle plus efficace, améliore significativement les performances du système, et permet une gestion énergétique optimale, notamment en adaptant le contrôle aux variations climatiques. [29]



**Fig II.4:** Configuration du système SEH global. [29]

A Boubkerki et Berraha,(2024) se sont intéressés à la conception d'un système MPPT pour éoliennes basé sur la logique floue, visant à améliorer l'efficacité énergétique, l'adaptabilité aux variations rapides du vent, ainsi que la stabilité du système dans des conditions environnementales changeantes. Les résultats obtenus démontrent une amélioration significative de l'extraction d'énergie par rapport aux approches classiques, couplée à une adaptabilité accrue face aux variations imprévisibles du vent. [30]



**Fig II.5:** Schéma bloc général du système global étudié en Simulink [30]

A. M. Ismaiel, et al. (2024) ont proposé une approche visant à maximiser la puissance extraite d'une éolienne DFIG en utilisant un contrôleur flou adaptatif (AFLC) pour le MPPT. La méthodologie consiste à comparer les performances de l'AFLC avec celles d'un contrôleur PI classique face à un profil de vent variable. Les résultats montrent que l'AFLC améliore le temps de réponse de 40 % et la précision du suivi de puissance de 32,21 %, offrant une meilleure dynamique, moins de dépassement et une erreur en régime permanent réduite, ce qui confirme son efficacité pour l'optimisation et l'intégration fiable des éoliennes au réseau. [31]

Enfin, quelques travaux récents ont exploré des systèmes hybrides combinant des sources renouvelables, gérés par un MPPT basé sur la logique floue :

O Zebraoui et M Bouzi, (2020) proposent la modélisation, l'optimisation et le contrôle d'un système hybride autonome combinant des sources photovoltaïque et éolienne. L'objectif principal est d'optimiser la performance énergétique du système en développant des contrôleurs MPPT innovants, basés sur une approche hybride combinant différentes méthodes pour les parties photovoltaïque et éolienne. Les résultats mettent en évidence une nette amélioration des performances avec une efficacité atteignant 99,75%, des oscillations minimales autour du point de puissance maximale, confirmant ainsi l'efficacité et la robustesse des approches proposées pour garantir une production stable en sites isolés. [32]

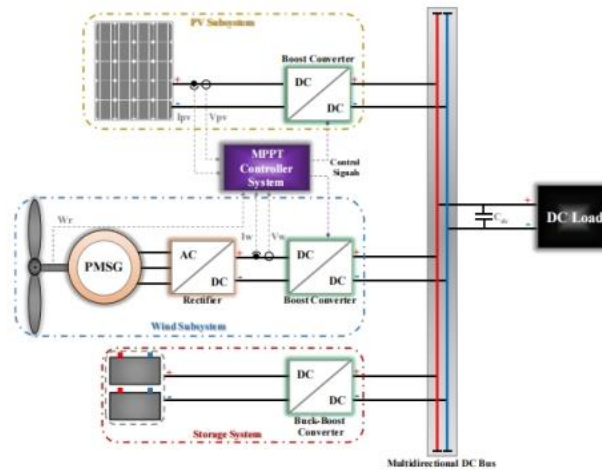


Fig II.6: Architecture du système énergétique hybride [32]

Z Bouguerra (2025), réalise une étude comparative entre deux topologies de contrôle MPPT pour un système hybride photovoltaïque/éolien : une avec contrôleurs MPPT individuels pour chaque source, et une autre avec un MPPT commun, en utilisant la logique floue. Les résultats montrent que le MPPT commun fournit une puissance totale légèrement supérieure du fait de la réduction des convertisseurs, mais provoquant des oscillations et une dégradation possible de la performance mécanique du système éolien. En revanche, le MPPT individuel assure une meilleure stabilité et fiabilité malgré un nombre plus élevé de convertisseurs. [33]

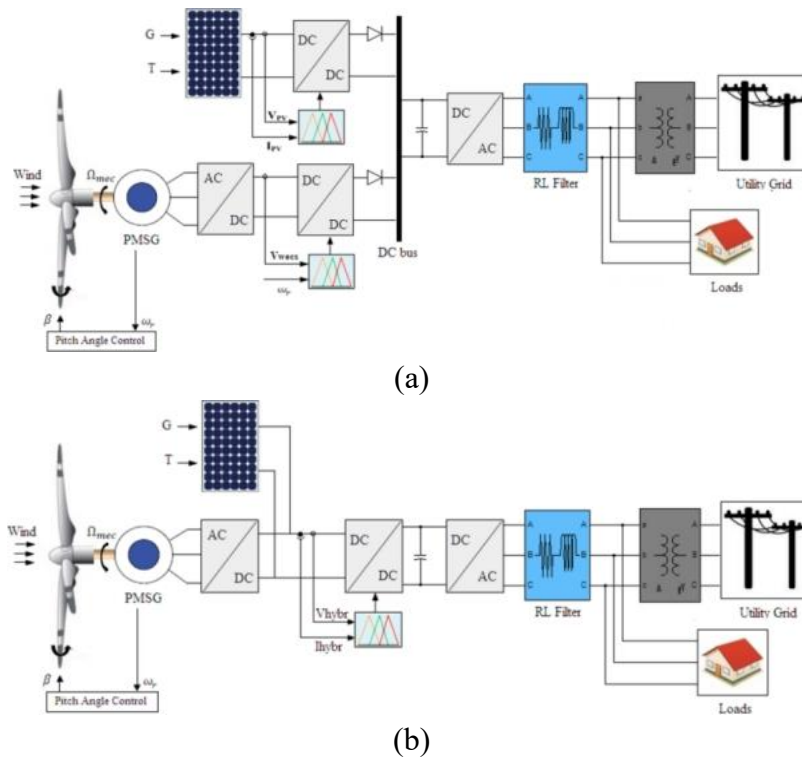


Fig II.7: Topologies d'hybridation ; (a) MPPT individuel, (b) MPPT commun [33]

Pham Duy An (2025) a proposé une approche innovante de commande floue pour un système combinant une éolienne, un panneau photovoltaïque et une batterie au lithium-ion. Un contrôleur flou à une entrée est utilisé pour le PV, et un autre contrôleur flou à deux entrées est appliqué à l'éolienne, tous deux associés à un régulateur PI pour maintenir la stabilité de la tension du bus continu. Un superviseur flou protège la batterie contre la surcharge et la décharge profonde. Les simulations montrent que ce système assure une production d'énergie optimale et une stabilité efficace, tout en simplifiant la complexité du contrôle par rapport aux méthodes classiques [34].

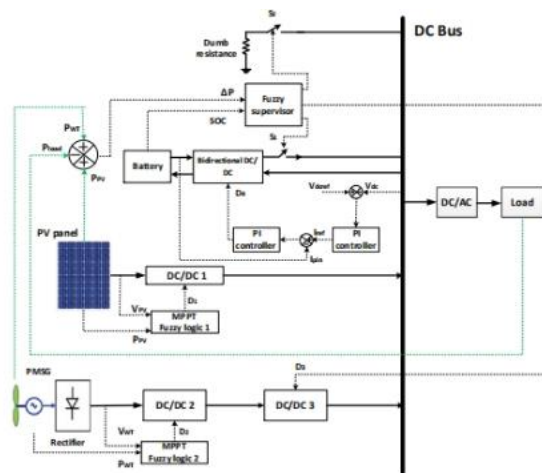


Fig II.8: Le système hybride éolien-photovoltaïque proposé [34]

### 3. Modélisation d'une cellule solaire:

#### A- Cas idéal :

L'équation caractéristique d'une cellule solaire idéale est de la forme suivante :

$$I = I_{CC} - I_D = I_{CC} - I_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \tag{II.1}$$

Le circuit électrique équivalent d'une cellule solaire est le suivant :[35]

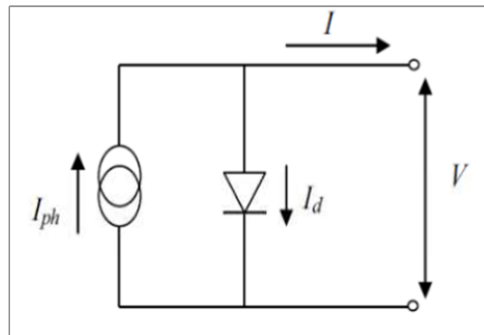


Fig II.9 : Cellule solaire idéale. .[35]

**I, V** : Courant et tension fournis par la cellule.

**I<sub>D</sub>** : Courant de diode donnée par :

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) \tag{II.2}$$

**B- Cas réel :**

Le modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle prend en compte les effets résistifs indésirables liés au processus de fabrication, comme illustré dans la figure (II.2). Ce modèle analogique se compose d'une diode (D) représentant la jonction, d'une source de courant (I<sub>ph</sub>) représentant le photocourant, d'une résistance série (R<sub>s</sub>) illustrant les pertes dues à l'effet Joule, et d'une résistance de shunt (R<sub>sh</sub>) représentant le courant de fuite entre la grille supérieure et le contact arrière. En général, R<sub>sh</sub> est beaucoup plus élevée que R<sub>s</sub>. [35]

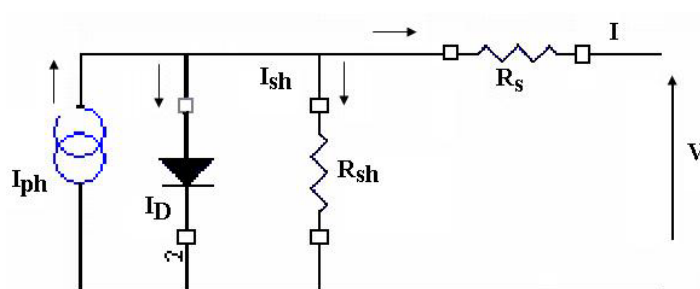


Fig II.10 : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV. [35]

En notent :

$$I = I_{ph} - I_D - I_P \tag{II.3}$$

Avec :

$$I_D = I_0 \left( e^{\frac{v+IR_S}{nV_T}} - 1 \right) \quad (\text{II.4})$$

$$I_P = \frac{v+IR_S}{R_P} \quad (\text{II.5})$$

$$I_0 = I_{CC} / \left( e^{\frac{vC_0}{nV_T}} - 1 \right) \quad (\text{II.6})$$

$$I_{CC} = I_{CCr} \left( \frac{G}{1000} \right) \quad (\text{II.7})$$

$$V_T = \frac{kT}{q} \quad (\text{II.8})$$

$$I = I_{Ph} - I_0 \left[ e^{\frac{v+IR_S}{nV_T}} - 1 \right] - \frac{v+IR_S}{R_P} \quad (\text{II.9})$$

Dans les modèles de panneaux solaires, on tend à considérer que  $I_{ph}$  est égal à  $I_{cc}$ , car dans une cellule photovoltaïque réelle, la résistance série est faible et la résistance parallèle est élevée. Ainsi, l'équation devient : [36]

$$I = I_{Ph} - I_0 \left[ e^{\frac{v+IR_S}{nV_T}} - 1 \right] \quad (\text{II.10})$$

### 3.1. Caractéristique d'un module solaire I-V, P-V :

La puissance délivrée par le module photovoltaïque dépend de son point de fonctionnement ; elle correspond au produit de l'intensité du courant par la tension à ses bornes. L'augmentation de la luminosité entraîne un déplacement de la courbe I-V le long de l'axe des courants. L'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus significatif que celui de la tension. Sous un soleil éclatant, le module, lorsqu'il n'est relié à aucun circuit (fonctionnement à vide), présente une tension d'environ 27,5 V à 25 °C. En cas de diminution de l'éclairement de 10 %, la tension générée diminue d'environ 0,47 V, soit environ 2,18 % de sa valeur initiale. En revanche, le rendement varie très peu avec l'éclairement. Ces courbes sont établies à température constant [37] .

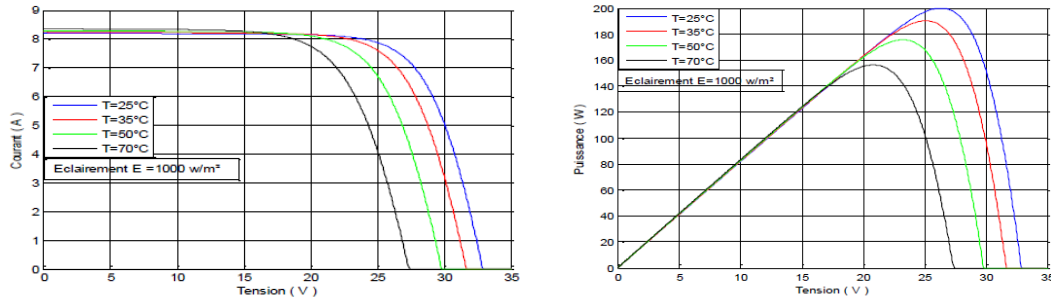


Fig II.11: Influence de la température sur la caractéristique P(V) [38]

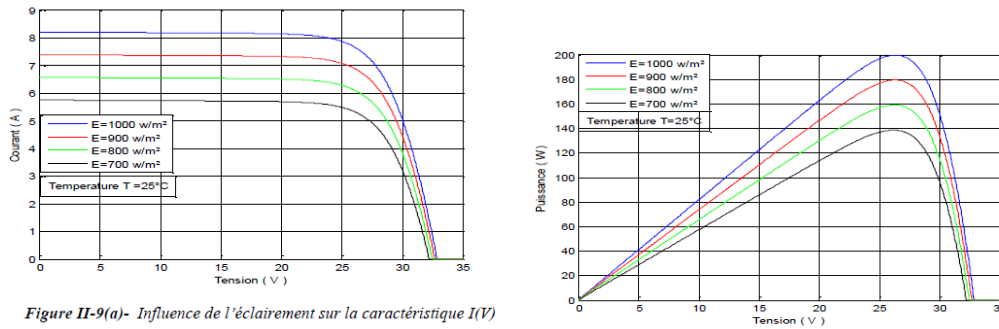


Figure II-9(a)- Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V)

Fig II.12: Influence de l'éclairement sur la caractéristique P(V). [38]

#### 4.Modélisation de la conversion d'énergie éolienne:

##### 4.1. Loi de Betz:

Prenons en compte le système éolien à axe horizontal illustré à la figure II 5, où la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur est notée  $V_1$ , et celle en aval est notée  $V_2$ . En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne des vitesses  $V_1$  et  $V_2$ , on a.[39]

$$v = \frac{(v_1+v_2)}{2} \tag{II.11}$$

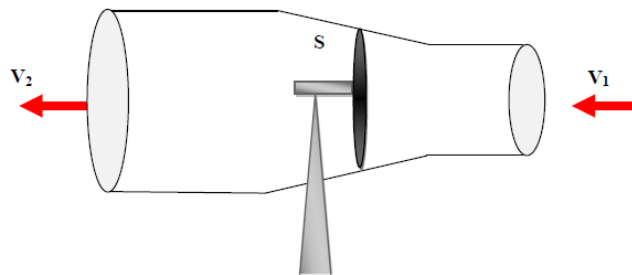


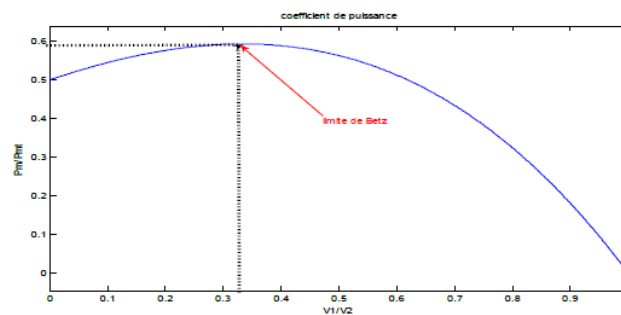
Fig II.13: Tube de courant autour d'une éolienne.[39]

En utilisant la théorie du mouvement et le théorème de Bernoulli, il est possible de calculer la puissance incidente, c'est-à-dire la puissance théorique contenue dans le vent. Ainsi, selon la théorie de Betz, la puissance éolienne — ou puissance du vent — est définie comme suit :[39]

$$P_{vent} = \frac{\rho s v^3}{2} \quad (II.12)$$

Avec S représentant la surface parcourue par l'éolienne,  $\rho$  symbolisant la masse volumique de l'air à 1,25 kg/m<sup>3</sup> et v indiquant la vitesse du vent. L'éolienne n'est capable de capter qu'une portion de la puissance éolienne. La force du vent et la puissance captée par l'éolienne P éolienne peuvent être formulées en termes du coefficient de puissance Cp. .[39]

$$P_{éolienne} = C_p \times P_{vent} \quad (II.13)$$



**Fig II.14:** Limite de Betz.[39]

#### 4.2. Modèle de la turbine éolienne :

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la transforme en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois éléments influencent la relation entre l'énergie éolienne disponible et l'énergie mécanique captée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor, et la vitesse du vent. La densité de l'air ainsi que la vitesse du vent sont des facteurs climatiques qui varient en fonction de l'emplacement géographique.[40]

$$P_{éolienne} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) * \rho * \pi * R^2 * V_{vent}^3 \quad (II.14)$$

On définit la vitesse relative comme le quotient de la vitesse linéaire des pales et de la vitesse du vent :[41]

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v_{vent}} \quad (II.15)$$

On peut déduire l'expression du couple aérodynamique à partir de celle de la puissance et de la vitesse :[41]

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega_{turbine}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot v_{vent}^3}{\Omega_{turbine}} \quad (II.16)$$

La machine synchrone perçoit le couple mécanique différemment du couple éolien, car elle doit tenir compte de l'inertie de l'éolienne et des frottements visqueux spécifiques à la structure de cette dernière. Cela peut être formulé en mathématiques par l'équation suivante :[42]

$$C_{eol} = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega + C_{mec} \quad (II.17)$$

$$\Omega = \frac{1}{(f+p)} (C_{eol} - C_{mec}) \quad (II.18)$$

Où  $\rho$  est la densité de l'air égale à 1,225 kg.m<sup>-3</sup>. Le couple  $\Gamma_T$  produit par cette éolienne est alors déduit :[43]

$$\Gamma_T = \frac{P_m}{\Omega} = \frac{1}{2\Omega} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V^3 \quad (II.19)$$

Appelé coefficient de couple :[43]

$$C_T(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} \quad (II.20)$$

On obtient la relation suivante :[43]

$$\Gamma_T = \frac{1}{2} C_T(\lambda) \rho \pi R^3 V^2 \quad (II.21)$$

$\lambda$  : Vitesse relative de l'éolienne

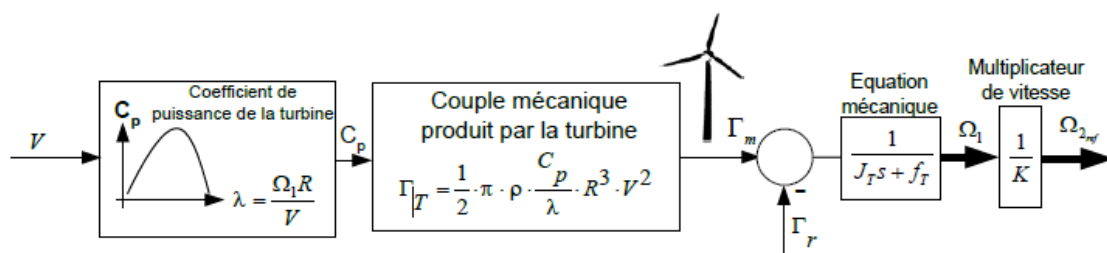


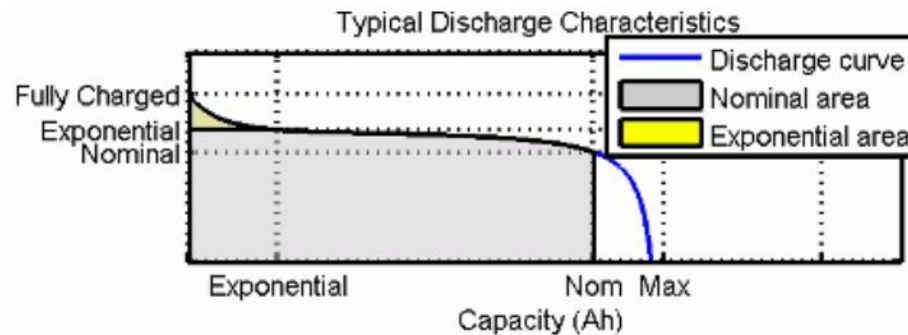
Fig II.15 : Génération d'une vitesse de référence à partir du modèle de l'éolienne. [43]

### 5. Modélisation des batteries Lithium:

La modélisation des batteries, en particulier les batteries lithium-ion, est un aspect essentiel de la conception et de l'analyse des systèmes électriques. Les approches de modélisation varient, allant des modèles électrochimiques complexes aux modèles de circuits équivalents plus

simples, en fonction de l'application visée et du niveau de précision requis. L'objectif est de représenter avec précision le comportement de la batterie, d'estimer son état et d'optimiser ses performances dans diverses conditions. [44]

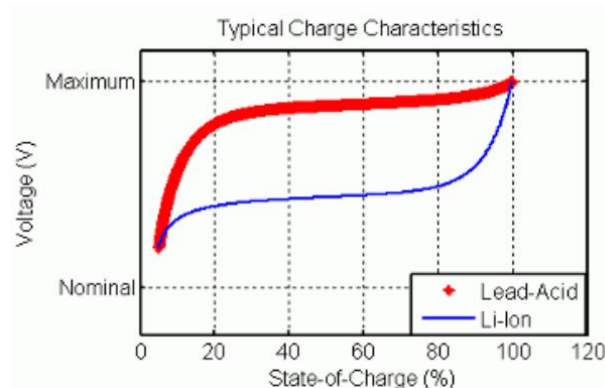
Ces modèles reposent sur la compréhension des caractéristiques de charge et de décharge de la batterie, qui dépendent du type de batterie. La figure (II.16) illustre une courbe de décharge typique :



**Fig II.16 :** Caractéristique de décharge de la batterie [45]

La première section représente la chute exponentielle de la tension lors de la charge de la batterie. La largeur de cette chute dépend du type de batterie. La deuxième section représente la charge qui peut être extraite de la batterie jusqu'à ce que la tension chute en dessous de la tension nominale de la batterie. Enfin, la troisième section représente la décharge totale de la batterie, lorsque la tension chute rapidement.

Lorsque le courant de la batterie est négatif, la batterie se recharge, suivant une caractéristique de charge.[45]



**Fig II.17:** Ccaractéristiques comparées Li-ion et Plomb-Acide

## 6. Modélisation de Convertisseur :

### 6.1. Les hacheurs :

Les convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques, régulent la tension et le courant pour optimiser le transfert d'énergie vers la charge ou les batteries. Leur modélisation dépend de la topologie choisie (buck, boost, buck-boost) et de la méthode de commande. Pour un convertisseur buck-boost en conduction continue, des équations spécifiques relient tension d'entrée, tension de sortie et rapport cyclique. [46]

$$V_0 = \frac{D}{1-D} V_S \quad (\text{II.22})$$

Où :

$V_0$  = Tension de sortie

$V_S$  = Tension d'entrée

$D$  = Cycle de fonctionnement du commutateur (rapport entre le temps d'allumage et la période totale)

On peut ajuster le cycle de travail  $D$  en fonction de la tension ou du courant de sortie requis, afin de contrôler l'alimentation délivrée par le module photovoltaïque. Le modèle global du système fusionne le modèle du module PV avec celui du circuit de hachage, afin d'anticiper le comportement du système photovoltaïque dans diverses conditions de fonctionnement. Ce modèle peut être utilisé pour la modélisation et l'optimisation de la conception des systèmes photovoltaïques.

Lors de la mise en place d'un système photovoltaïque intégrant un circuit chopper, il est essentiel de prendre en compte des éléments tels que le rendement, la stratégie de contrôle, le choix des composants et les conditions environnementales, afin de garantir des performances optimales. [46]

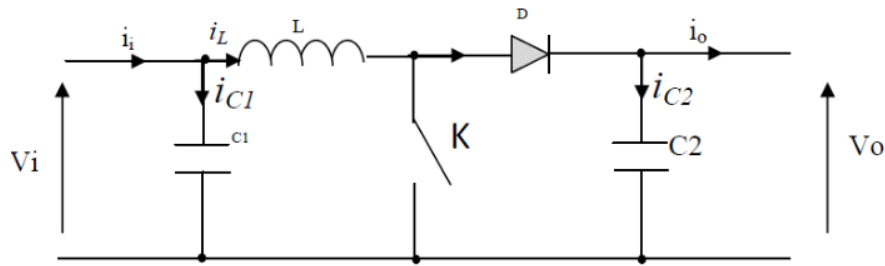


Fig II.18: Schéma de principe d'un convertisseur Boost [47]

### 6.2. Bidirectional DC DC (buck-boost converter):

En mode Buck-Boost, les positions 1 et 0 du commutateur correspondent respectivement aux phases de charge et de décharge de l'inductance. Une commande appropriée de la séquence de commutation permet d'obtenir une tension de sortie soit supérieure, soit inférieure à celle de la source continues .Puisque l'inductance ne peut pas inverser le sens du courant, la tension de sortie est de polarité opposée à celle de la source. [48]

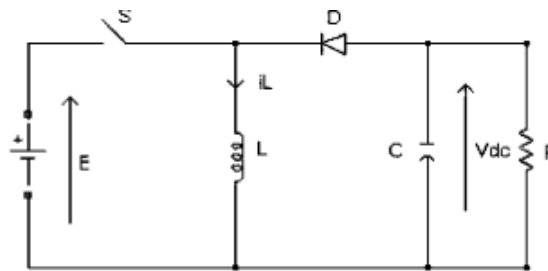


Fig II.19: Schéma de principe du convertisseur Buck-Boost. [48]

la relation de tension entre entrée et sortie peut être résumée par la relation suivante:

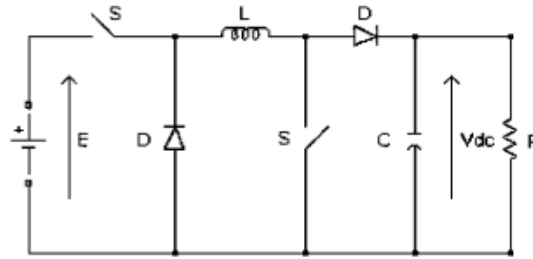
$$\begin{cases} (V_{in})DT = (-V_{in})(1 - D)T \\ V_{out} = -\frac{D}{1-D} V_{in} \end{cases} \quad (II.23)$$

L'équation (4.23) ci-dessus est résumée conformément à D comme suit :

Si  $D = 0.5$ , alors  $|V_{out}| = V_{in}$  ; Si  $D < 0.5$ ,  $|V_{out}| < V_{in}$  et Si  $D > 0.5$ , alors  $|V_{out}| > V_{in}$

Les équations du convertisseur non-inverseur Buck/Boost sont données par :

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = gE - V_{dc}(1 - g) \\ C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_L(1 - g) - \frac{V_{dc}}{R} \end{cases} \quad (II.24)$$

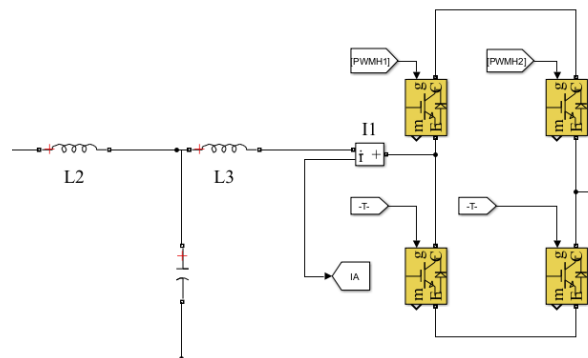


**Fig II.20:** Schéma de principe du convertisseur non-inverseur Buck/Boost. [48]

E : la tension de sortie du panneau solaire / génératrice éolienne après redressement.

### 6.3. Modélisation de l'onduleur :

Un convertisseur DC/AC (onduleur de tension) est principalement utilisé pour fournir une tension ou un courant alternatif, afin d'alimenter des charges critiques (comme un micro-ordinateur, une station de télécommunication, etc.) lors d'une coupure du réseau électrique, ou pour assurer une alimentation permanente dans les systèmes autonomes. Un onduleur est généralement composé de trois éléments principaux: Source de tension continue (par exemple : batterie); Convertisseur DC/AC; Filtre (LC ou L) pour lisser la forme d'onde de sortie. [49]



**Fig II.21:** Schéma d'un onduleur avec filtre LCL sous Matlab Simulink

L'onduleur de tension impose à sa sortie un système de tensions sous forme de créneaux modulés en largeur d'impulsions (MLI ou PWM en anglais). Ces créneaux ne posent aucun problème pour l'alimentation d'un moteur, mais sont incompatibles avec les tensions sinusoïdales du réseau. On place alors entre chaque sortie de l'onduleur et chaque phase du réseau (onduleur monophasé ou triphasé) une inductance qui joue le rôle de filtre et permet à l'onduleur de fournir au réseau des courants quasi sinusoïdaux [49]



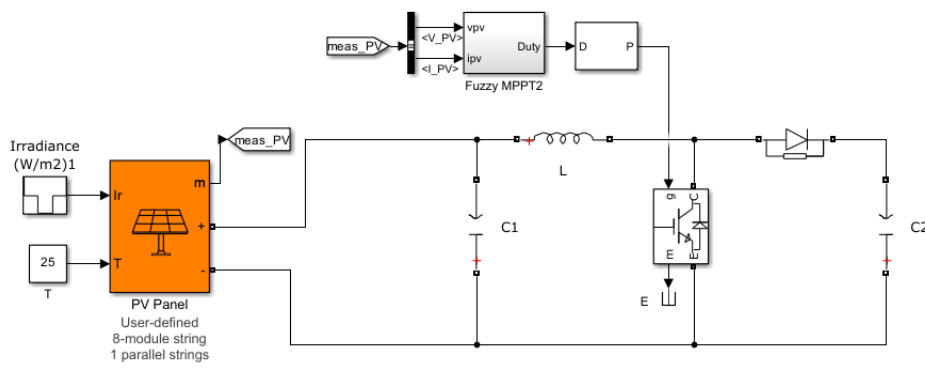


Fig II.24: Le modèle Simulink d'un système photovoltaïque (PV)

La figure (II.24) représente un système photovoltaïque avec un convertisseur boost. Le panneau photovoltaïque génère une puissance en courant continu en fonction de l'irradiance et de la température. Le convertisseur boost élève la tension continue à un niveau souhaité.

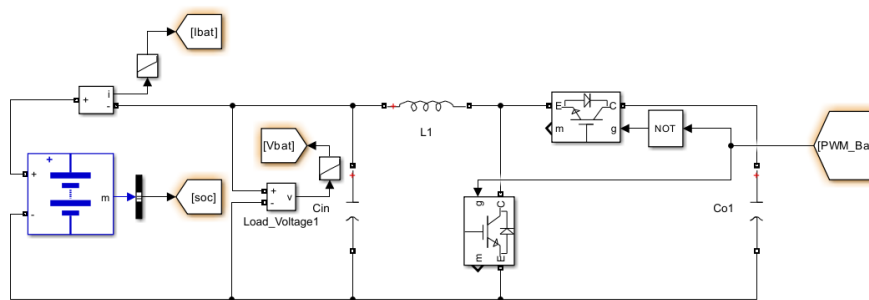


Fig II.25: Le modèle Simulink d'un circuit de charge/décharge de batterie

La figure (II.25) représente un système de stockage d'énergie basé sur une batterie au lithium, contrôlé par un convertisseur buck-boost bidirectionnel. Ce convertisseur permet de charger et de décharger la batterie tout en maintenant une tension souhaitée au niveau de la charge.

### 6.Conclusion :

Ce chapitre a permis de modéliser les principales composantes du système hybride photovoltaïque-éolien, à savoir le générateur photovoltaïque, la turbine éolienne, les convertisseurs et la batterie de stockage. Ces modèles sont développés dans l'environnement Simulink/MATLAB afin de reproduire le plus fidèlement possible le comportement réel du système dans différentes conditions de fonctionnement. La modélisation constitue une étape essentielle, car elle sert de base à la mise en œuvre des algorithmes de commande et à l'analyse des performances du système dans les chapitres suivants.

# **C**hapitre III

## **Conception du système de contrôle MPPT**

## 1.Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons aborder la conception du système de contrôle dans un système hybride photovoltaïque-éolien. L'accent sera mis sur les techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT), essentielles pour optimiser la récupération d'énergie. Nous commencerons par un examen des méthodes MPPT conventionnelles avant d'explorer une approche plus avancée basée sur la logique floue.

## 2.Commande MPPT :

A cause de l'irrégularité du vent et la discontinuité dans le temps du rayonnement solaire, les éoliennes et les capteurs solaires utilisées pour la production de l'électricité présentent des caractéristiques puissance/tension non linéaires avec la présence de plusieurs extremums (PPM : Points de Puissance Maximale) qui varient avec la température, l'éclairement, la vitesse et la direction du vent. C'est pour cette raison que ces générateurs doivent permettre de produire un maximum de puissance en exploitant au mieux l'énergie du soleil et celle disponible dans le vent. Pour atteindre cet objectif, de nombreux systèmes de commande, agissant au niveau de la partie mécanique ou électrique, sont développés pour maximiser la conversion d'énergie. [50]

### 2.1. Techniques MPPT classiques :

Il existe des techniques MPPT conventionnelles standards, telles que perturbation et observation et conductance incrémentale. Ces techniques sont relativement peu coûteuses et reposent sur des algorithmes très simples. Elles peuvent être définies parmi les meilleures solutions pour suivre le point de puissance maximale dans des conditions d'éclairement constantes et uniformes. [51]

#### 2.1.1.P&O (Perturb and Observe) :

Le principe de cet algorithme consiste à effectuer une perturbation sur la tension du panneau photovoltaïque tout en agissant sur le rapport cyclique (duty cycle). En effet, après cette perturbation, la puissance fournie par le panneau photovoltaïque à l'instant  $k$  est calculée et comparée à celle de l'instant précédent  $k-1$ .

Si la puissance augmente, cela signifie que l'on se rapproche du point de puissance maximale (MPPT – Maximum Power Point Tracking), et la variation du rapport cyclique est alors maintenue dans la même direction. En revanche, si la puissance diminue, cela signifie que l'on

s'éloigne du point de puissance maximale, et la variation du rapport cyclique doit être inversée.[52]

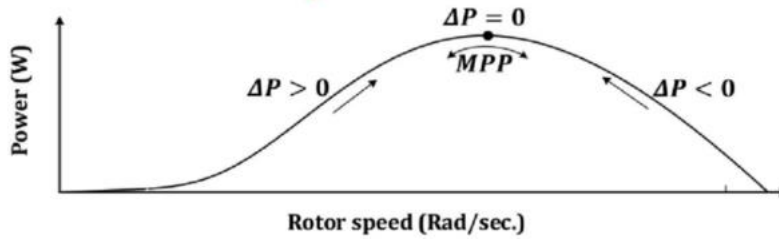


Fig III.1: Courbe representee la strategie P&O [52]

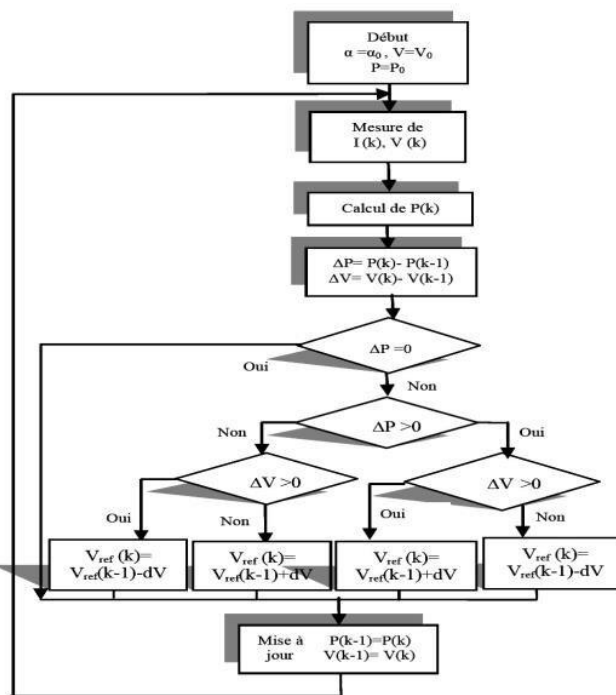


Fig III.2: Organigramme de l'algorithme 'P&O'[52]

### 2.1.2. Incremental Conductance (IncCond) :

Cet algorithme est basé directement sur la dérivée de la puissance du panneau photovoltaïque par rapport à la tension. La conductance est une grandeur physique relativement bien connue, définie comme le rapport entre le courant et la tension [53]

$$G = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} \tag{III.1}$$

La conductance différentielle, quant à elle, est plus rarement mesurée. Elle correspond à la dérivée du courant par rapport à la tension, soit :[53]

$$\Delta G = \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \tag{III.2}$$

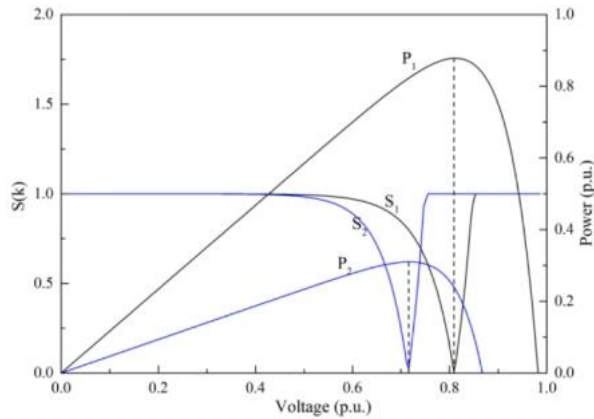


Fig III.3: Courbe representee la strategie IncCond.[54]

**2.1.3. La méthode (Power Signal Feedback control) (PSF) :**

La méthode de contrôle par rétroaction de puissance (Power Signal Feedback Control) repose sur le contrôle de la puissance transmise à la charge.

L’objectif de ce contrôle est de rechercher en permanence le point de puissance maximale, une technique connue sous le nom de MPPT (Maximum Power Point Tracking).[55]

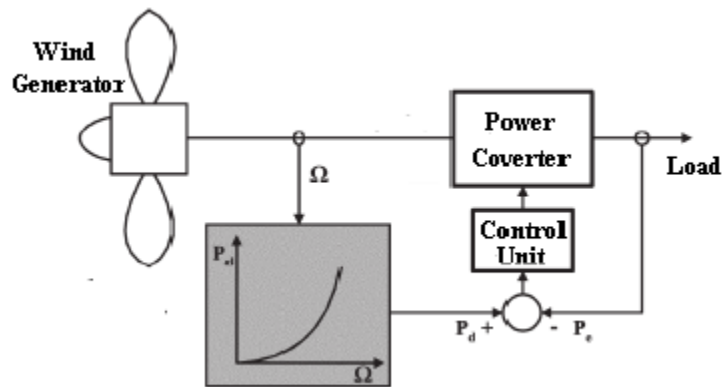
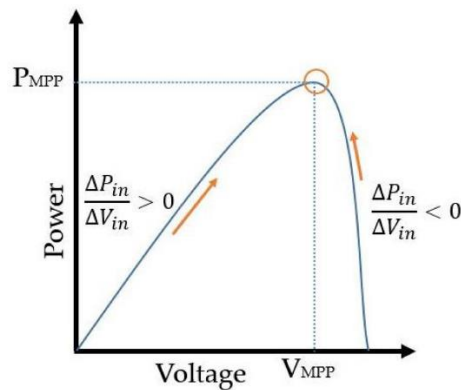


Fig III.4: Courbe representee la strategie PSF. [55]

**2.1.4. Hill Climbing:**

Le principe de la méthode du hill-climbing (ascension de colline) repose sur la perturbation du cycle de travail du signal PWM, ce qui conduit le convertisseur DC/DC à faire converger le point de fonctionnement du système vers le point de puissance maximale (MPP). Cette méthode

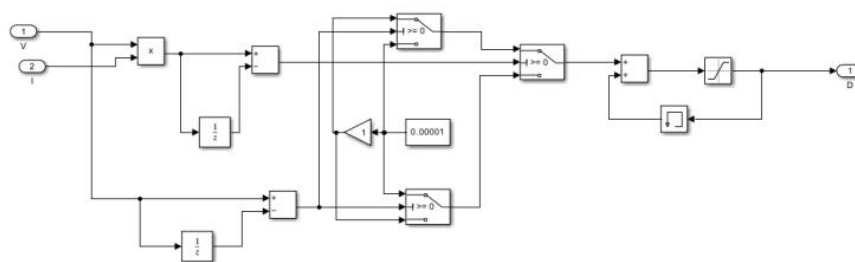
est basée sur la relation entre la puissance fournie par les panneaux photovoltaïques et la valeur du cycle de travail du signal PWM contrôlant le convertisseur de puissance du système. [56]



*Fig III.5: Courbe representee la strategie Hill Climbing.[57]*

Cependant, ces techniques n'assurent plus de bonnes performances dans des conditions environnementales changeantes. En effet, lorsque l'irradiation et la température varient lentement, le point de fonctionnement du système oscille autour du MPP, ce qui entraîne une perte plus ou moins importante d'énergie disponible. De plus, en présence de variations météorologiques rapides, ces algorithmes peuvent devenir confus en raison de la lenteur de leur capacité de suivi. [65]

### 3.Application de la commande mppt P&O :



*Fig III.6 : Schéma bloc de la commande MPPT P&O*

### 4.Techniques avancées :

Les performances des techniques conventionnelles standards ont été évoluées à l'aide des améliorations effectuées, cependant, leur utilisation pour des applications nécessitant la précision et la rapidité reste limitée. Dernièrement, les techniques MPPT avancées sont devenue

le centre d'intérêt d'un nombre important de recherches afin d'améliorer considérablement les performances de la poursuite du point de puissance maximale. Ces techniques avancées peuvent être classées en trois sous-catégories en tant que techniques basées sur l'intelligence artificielle tels que le réseau de neurone artificiel et le contrôle par logique floue, l'approche méta-heuristique tels que l'algorithme génétique, l'optimisation des essaims de particules, les méthodes de recherche aléatoire, l'optimisation des colonies de fourmis, et le contrôle non linéaire tels que le contrôle en mode glissant, le contrôle prédictif, méthode directe de Lapugnoy et un contrôle PID discret non linéaire.[66]

#### **4.1. Introduction à la logique floue :**

La logique floue a été introduite pour la première fois en 1965 par le Professeur Lotfi Zadeh de l'Université de Berkeley en Californie. Il a développé la théorie des « sous-ensembles flous » et a proposé que, pour certaines applications, un automate électromécanique intelligent basé sur une logique non binaire pourrait s'avérer plus performant qu'un contrôleur classique. Cette logique s'inspire du raisonnement humain, qui repose souvent sur des informations imprécises, incomplètes ou vagues. [67]

La logique floue facilite la représentation et la manipulation du "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. On peut modéliser des concepts difficiles à définir avec précision, comme les nuances du langage naturel ou les situations ambiguës. Elle s'appuie sur des fonctions d'appartenance pour évaluer le lien entre une valeur et une catégorie, et les combine pour déterminer le degré de vérité d'une décision ou d'une proposition. [29]

#### **4. 2. Eléments 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. [28]

##### **4.2.1. Ensembles flous :**

Dans la théorie Dans un ensemble classique, 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. C'est pourquoi la théorie des ensembles flous permet d'établir un degré d'appartenance (de dire qu'un élément appartient un

peu, beaucoup ou pas du tout à un ensemble), grâce à une valeur entre 0 et 1. Cela aide à mieux représenter les situations complexes. [28]

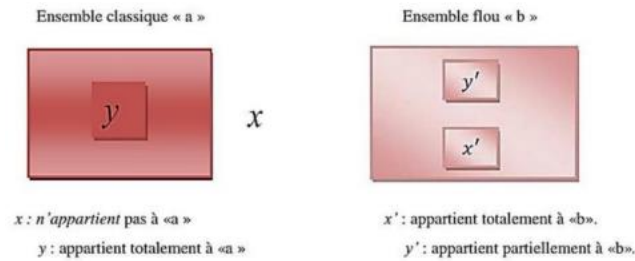


Fig III.7: Comparaison entre un ensemble classique et un ensemble flou. [28]

4.2.2. Variables linguistiques :

La variable linguistique permet de représenter des informations 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. Elle est souvent notée sous la forme  $(x, T(x), U)$ , où  $x$  est la variable,  $T(x)$  ses valeurs linguistiques (comme Petite, Moyenne, Grande pour la vitesse), et  $U$  l'univers de discours. [29]

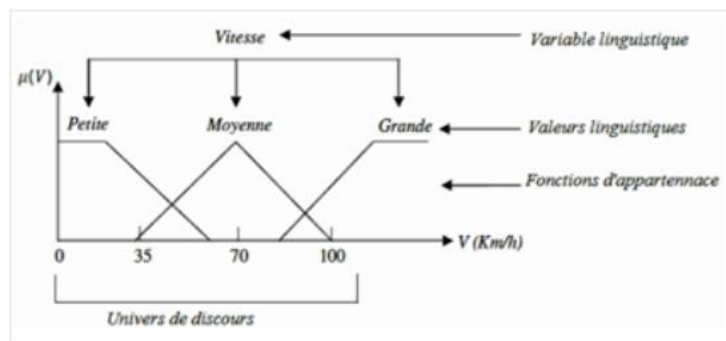
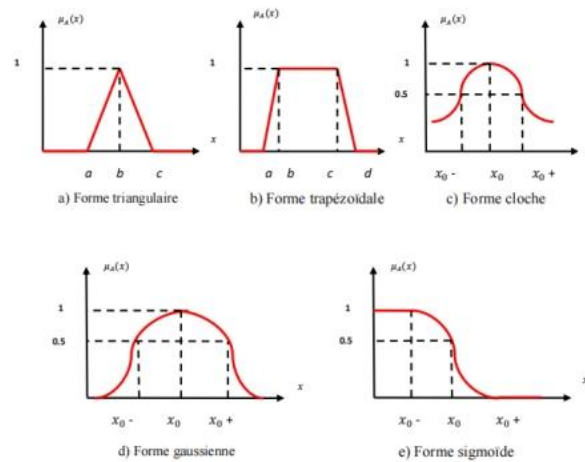


Fig III.8: Représentation graphique d'une variable linguistique. [29]

4.2.3. Fonctions d'appartenance :

Les fonctions d'appartenance peuvent avoir différentes formes, mais les plus utilisées sont les formes géométriques triangulaires et trapézoïdales, car elles sont simples et linéaires par morceaux. Dans la plupart des cas, ces deux types suffisent pour définir les ensembles flous. [58]



**Fig III.9:** Différentes formes des fonctions d'appartenance [58]

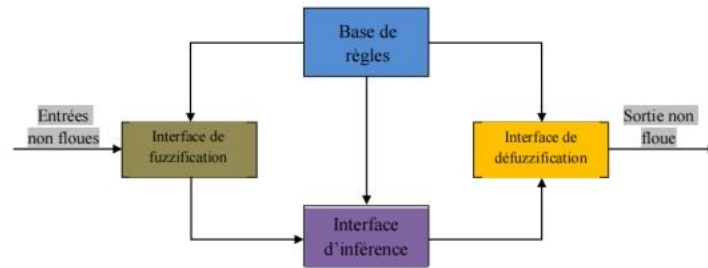
### 4.3. Structure générale d'un régulateur flou :

Dans le domaine de la régulation et de la commande des processus industriels, la logique floue permet d'élaborer des lois de commande efficaces en s'appuyant sur les connaissances et l'expérience des opérateurs, traduites sous forme de règles d'inférence. [59]

Contrairement aux techniques de réglage classique, le réglage par la logique floue n'utilise pas des formules ou des relations mathématiques bien déterminées ou précises. Mais, il manipule des inférences avec plusieurs règles floues à base des opérateurs flous " et, ou, alors, etc", appliquées à des variables linguistiques.[60]

On peut distinguer trois étapes principales constituant la structure d'un régulateur flou quel que soit le type d'application : [61]

- **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.



**Fig III.10:** Schéma synoptique général d'un contrôleur flou. [64]

Le régulateur flou comporte essentiellement quatre parties comme illustré dans la figure (III.10) une interface de fuzzification, une base des règles, une interface d'inférence et une interface de défuzzification. [61]

#### 4.3.1. Interface de La fuzzification :

L'interface de fuzzification est l'élément qui traduit les valeurs d'entrées numériques précises en des variables linguistiques floues, en utilisant les fonctions d'appartenance pour la transformation qui se fait dans un domaine normalisé. [61]

Cette opération doit être effectuée dans un domaine normalisé généralement par l'intervalle [1,1] afin de faciliter le calcul. [62]

#### 4.3.2. 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 linguistiques 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 [29]

Ces règles suivent une structure conditionnelle de type Si... Alors... et sont définies par des experts, soit en utilisant des valeurs numériques directes, soit en employant des variables linguistiques associées à des fonctions d'appartenance. [63]

#### 4.3.3. L'inférence floue :

Le bloc inférence est le cœur d'un RLF, il possède la capacité de simuler les décisions humaines et de déduire les actions de commande floue à l'aide de l'implication floue et des règles

d'inférence dans la logique floue. Le traitement numérique des règles d'inférence qui permet d'obtenir la sortie linguistique ou floue du régulateur se fait par différentes méthodes, on cite principalement :

- la méthode d'inférence max-min (Mamdani) ;
- la méthode d'inférence max-produit ;
- et la méthode d'inférence somme-produit.

Chacune de ces trois méthodes utilise un traitement numérique propre des opérateurs de la logique floue. [63]

#### **4.3.4. 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. [64]

- La méthode de centre de gravité ;
- La méthode du maximum ;
- La méthode des surfaces ;
- La méthode des hauteurs.

On présente dans ce qui suit l'une des méthodes les plus utilisées, qui est la méthode du centre de gravité. Cette méthode donne généralement de meilleurs résultats malgré l'exigence d'une grande puissance de calcul. [65]

#### **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. [29]

#### 4.4. Les avantages et inconvénients de la commande par la logique floue :

La commande par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et de désavantages. Les avantages essentiels sont: [64]

- Le non nécessité d'une modélisation mathématique rigoureuse du processus ;
- La possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus ;
- La réduction du temps de développement et de maintenance ;
- La simplicité de définition et de conception.

Par contre, les inconvénients sont :

- Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification);
- L'approche artisanale et non systématique (implantation des connaissances des opérateurs souvent difficile) ;
- La difficulté de montrer la stabilité dans tous les cas ;
- La cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible).

#### 4.5. Application de la commande mppt par la logique floue :

Dans ce travail, nous présentons une commande MPPT basée sur la logique floue visant à réduire les oscillations de la méthode perturbation et observation (P&O), responsables de pertes significatives de puissance et de ralentissement de la réponse dynamique du système. [28]

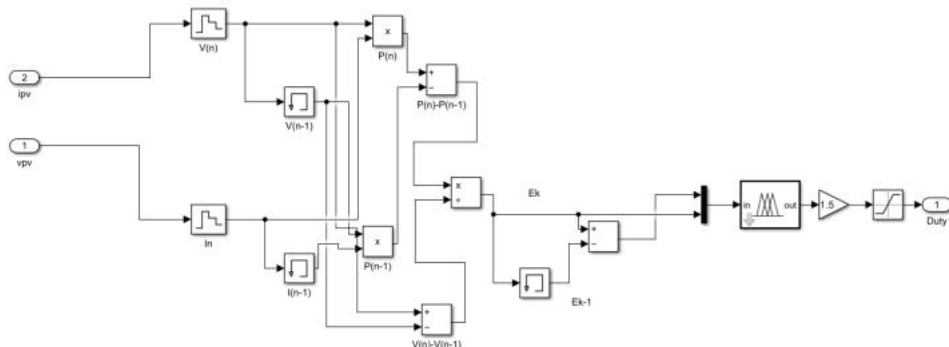


Fig III.11: Structure d'un contrôleur MPPT flou.

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 : [66]

$$E(k) = \frac{P_{in}(k) - P_{in}(k-1)}{V_{in}(k) - V_{in}(k-1)} \tag{III.3}$$

$$CE(k) = E(k) - E(k - 1) \tag{III.4}$$

Avec :

**P<sub>in</sub>**: Puissance d'entrée [W].

**V<sub>in</sub>**: Tension d'entrée [V].

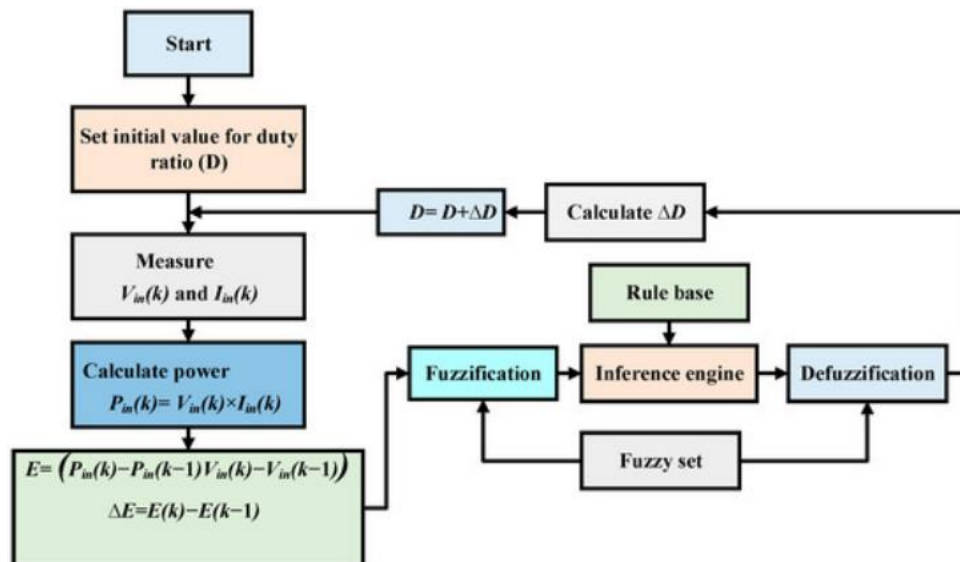


Fig III.12: Organigramme d'un contrôleur flou pour l'optimisation du rapport cyclique [67]

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 sept sous-ensembles flous à l'aide des fonctions d'appartenance. [29]

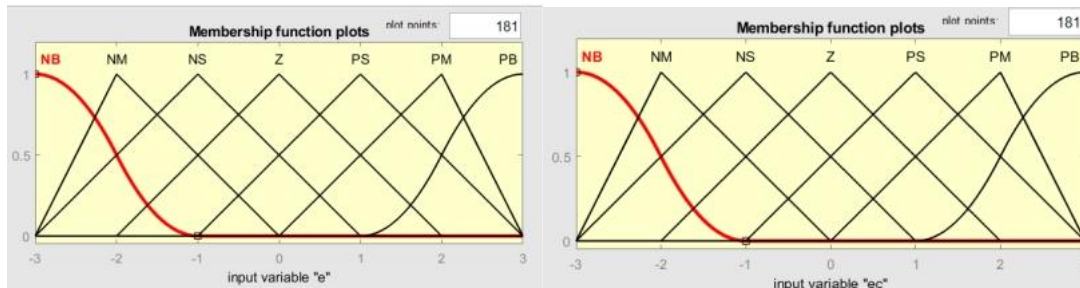


Fig III.13: Fonctions d'appartenance des variables d'entrée E et CE

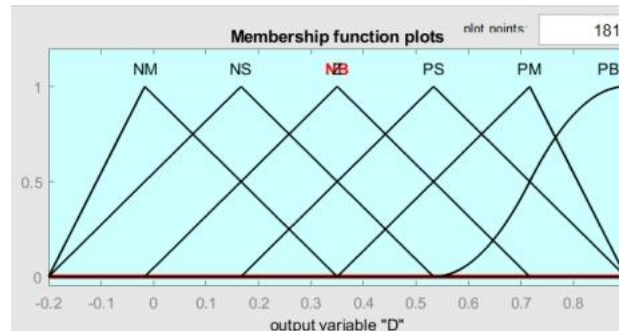


Fig III.14: Fonction d'appartenance de la variable de sortie D.

Les classes sont notées comme suit (les sous-ensemble):

- **NB:** Négatif Grand
- **NM:** Négatif Moyen
- **NS:** Négatif Petit
- **Z:** Zéro
- **PS:** Positif Petit
- **PM:** Positif Moyen
- **PB:** Positif Grand

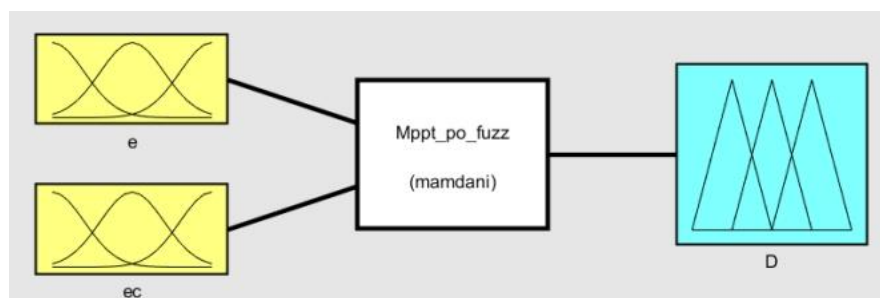


Fig III.15: Structure du contrôleur MPPT basé sur la logique floue de type Mamdani

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 : [29]

*Tableau III.1. Les règles du régulateur FLC.*

E \ CE	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	Z	Z	Z	NB	NB	NB	NM
NM	Z	Z	Z	NS	NM	NM	NM
NS	NS	Z	Z	Z	NS	NS	NS
Z	NM	NS	Z	Z	Z	PS	PM
PS	PS	PM	PM	PS	Z	Z	Z
PM	PM	PM	PM	Z	Z	Z	Z
PB	PB	PB	PB	Z	Z	Z	Z

## 5. 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. 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.

# **C**hapitre IV

## **Simulation et résultats**

### 1.Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'étude comparative, réalisée par simulation, entre deux algorithmes de suivi du point de puissance maximale : la méthode classique Perturb and Observe (P&O) et la commande intelligente basée sur la logique floue. Ces deux approches ont été décrites en détail dans le chapitre précédent.L'objectif ici est d'évaluer leurs performances respectives à travers l'analyse des résultats obtenus en se basant sur différents indicateurs : la puissance extraite, la stabilité du système, le comportement des générateurs (PV et éolienne), ainsi que l'impact sur la batterie, le réseau et la charge.

### 2. Simulation d'un Système Hybride raccordé au réseau :

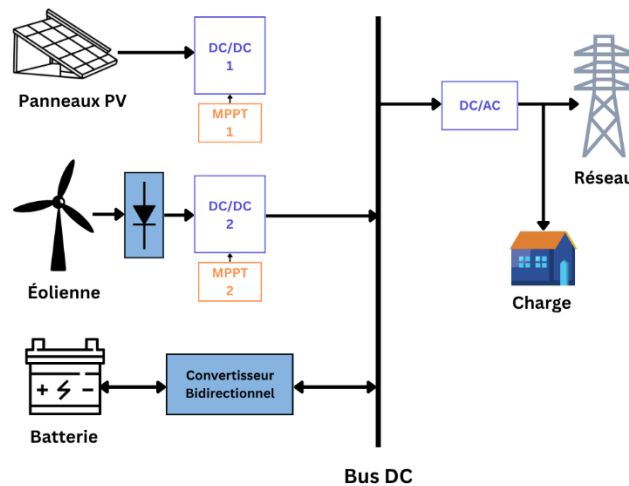


Fig IV.1 : Structure du système hybride raccordé au réseau.

Le Schéma bloc du système hybride raccordé au réseaux BT est présenté à la Figure IV.2.

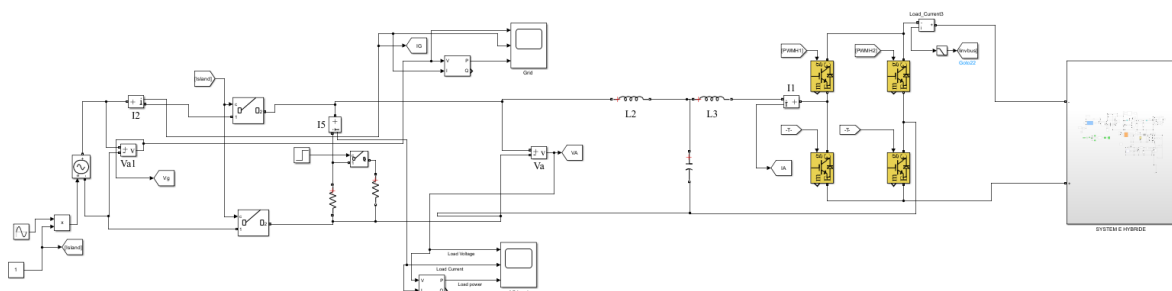


Fig IV.2 : Schéma bloc d'un système hybride connecté au réseau.

## 2.1 Caractéristique du système hybride simulé :

La configuration choisie pour notre simulation est un système hybride connecté au réseau, combinant l'énergie photovoltaïque, l'énergie éolienne et un système de stockage par batterie. Chaque source d'énergie est reliée au bus à courant continu (CC) à travers un convertisseur DC-DC indépendant. L'énergie stockée est gérée à l'aide d'un convertisseur bidirectionnel permettant le transfert dans les deux sens entre le bus CC et la batterie. L'ensemble des sources alimente un bus à courant alternatif (CA) via un onduleur, permettant l'alimentation de la charge et l'injection dans le réseau électrique.

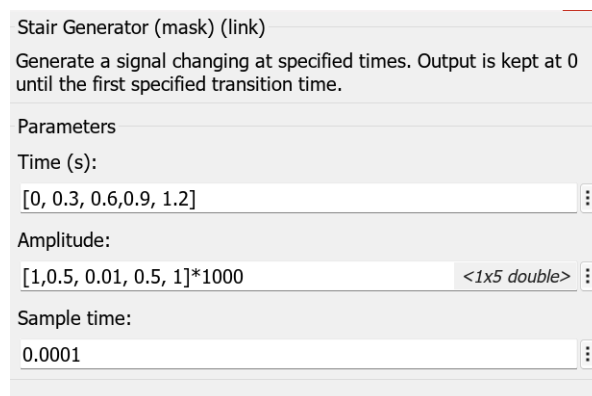
### 2.1.1 Système Photovoltaïque :

On a utilisé un générateur PV constitué de 8 modules ayant une puissance globale de 2 kW, voir (Tableau IV.1). Chaque module contient 60 cellules raccordé avec un hacheur boost.

*Tableau IV.1. Caractéristiques électriques de Module.*

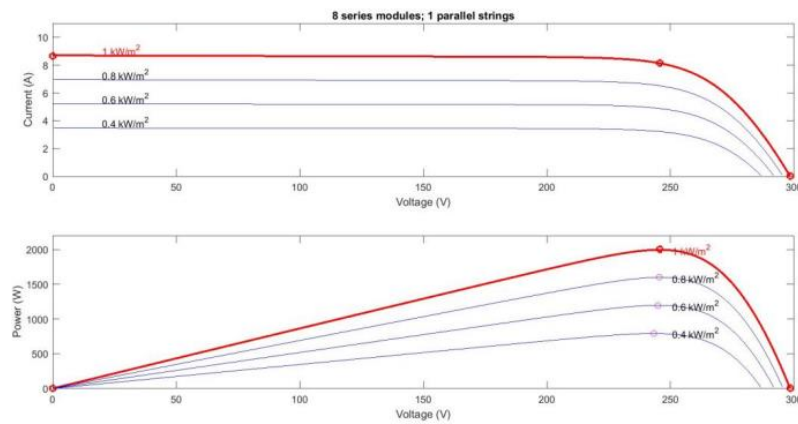
Caractéristiques électriques	E=1000W/m <sup>2</sup> ; T=25 C°
Puissance maximale de module ( $P_{max}$ )	250.205 W
Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )	8.66 A
Tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ )	37.3 V
Courant au point de MPPT ( $I_M$ )	8.15 A
Tension au point de MPPT ( $V_M$ )	30.7 V
Nombre de modules en série ( $N_s$ )	8
Nombre de modules en parallèle ( $N_p$ )	1
Nombre des cellules par module	60

Afin de tester la robustesse du système, un profil d'irradiation variable a été appliqué, représentant des changements rapides de l'ensoleillement .



*Fig IV.3: Paramétrage du profil d'irradiation solaire dans Simulink*

On choisit des valeurs réalistes comprises entre  $100 \text{ W/m}^2$  (ciel très nuageux) et  $1000 \text{ W/m}^2$  (ensoleillement maximal), afin d'analyser la capacité du système MPPT à suivre le point de puissance maximale dans un contexte dynamique et variable.



**Fig IV.4:** Performance des modules solaires sous une irradiance variable.

### 2.1.2 Système Eolien :

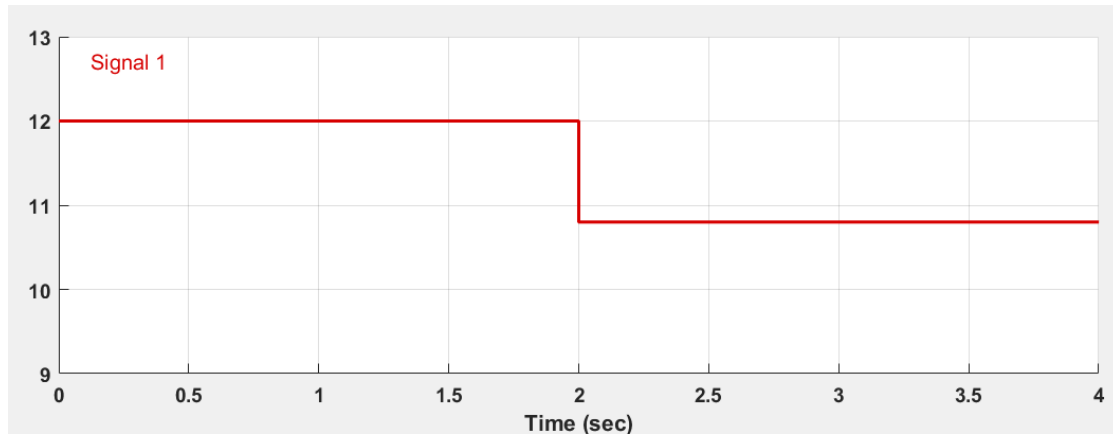
L'éolienne est constitué d'une génératrice synchrone à aimant permanent ayant les

Caractéristiques suivantes :

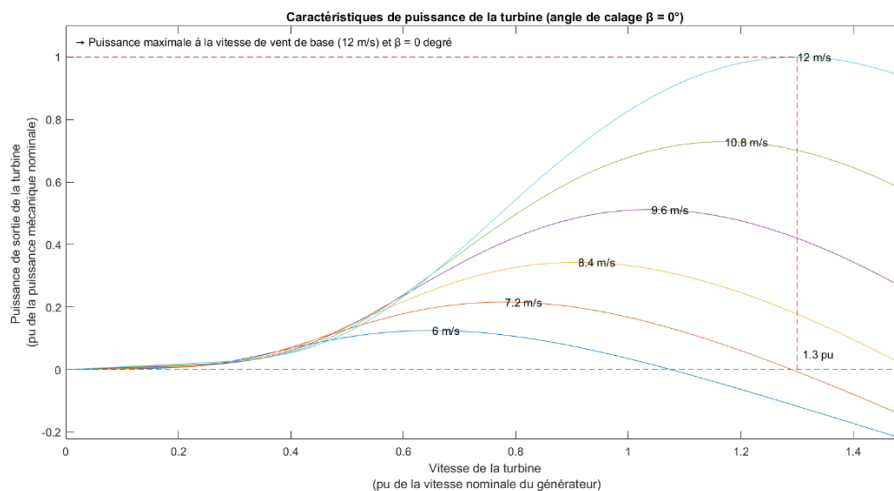
**Tableau IV.2.** Caractéristiques Techniques de l'éolienne.

<b>Caractéristiques de la turbine</b>	
Puissance mécanique nominale	2500 W
Puissance électrique de base	2777.78 VA
Vitesse de base du vent	12 m/s
Angle de pas $\beta$	$0^\circ$
<b>Caractéristiques du PMSG</b>	
Couple nominal ( $T_m$ )	10 Nm
Tension continue	300 V
Vitesse de rotation	2300 tr/min
Resistance statorique de phase	0.4578 Ohm
Inductance de l'armature	0.00334 H

Les tensions à la sortie de la génératrice sont alternatives de forme sinusoïdales, Les tensions alternatives sont redressées à l'aide d'un pont de diodes pour obtenir une tension continue. La tension continue obtenue alimente un hacheur boost. La tension continue obtenue est celle à la sortie du système PV, elles sont toutes couplées avec une batterie. Puis cette tension est convertie en alternative via un onduleur.



*Fig IV.5: Vitesse de vent*



*Fig IV.6: Caractéristique de la puissance générée par la turbine pour un angle de calage  $\beta = 0$*

### 2.1.3. Système de stockage :

Le stockage d'énergie contribue à stabiliser l'offre et la demande, à améliorer les conditions d'utilisation des réseaux de transport et de distribution, ainsi qu'à accroître le rendement de certaines unités de production à puissance nominale. Dans notre étude les accumulateurs électrochimiques (batterie) utilisée est de type lithium ayant les caractéristiques schématisées sur le tableau suivant :

Tableau IV.3. Caractéristiques de la batterie

Caractéristiques	Batterie lithium
Tension nominale	240 V
Capacité nominale	48 Ah
État de charge initial	9 %
Temps de réponse de la batterie	0.1 ms

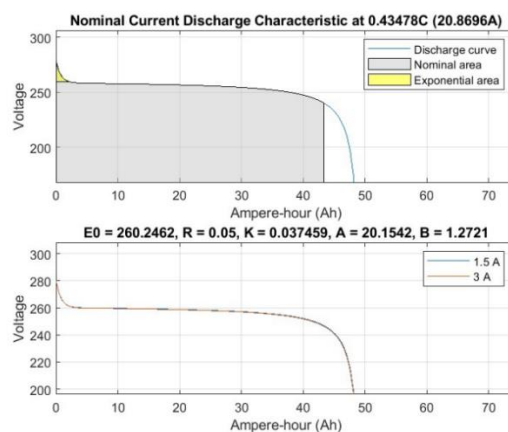


Fig IV.7: Caractéristique de décharge de la batterie pour différentes valeurs du courant

### 3. Résultats de la Simulation :

La même structure générale a été utilisée pour les deux systèmes, avec des ajustements mineurs au niveau des entrées ou I, en fonction de la source d'énergie exploitée.

#### 3.1. Panneau photovoltaïque (PV) :

Les résultats de simulation du système photovoltaïque, pour les deux méthodes de commande MPPT utilisées, sont obtenus sous un éclairage variable et une température constante 25 °C.

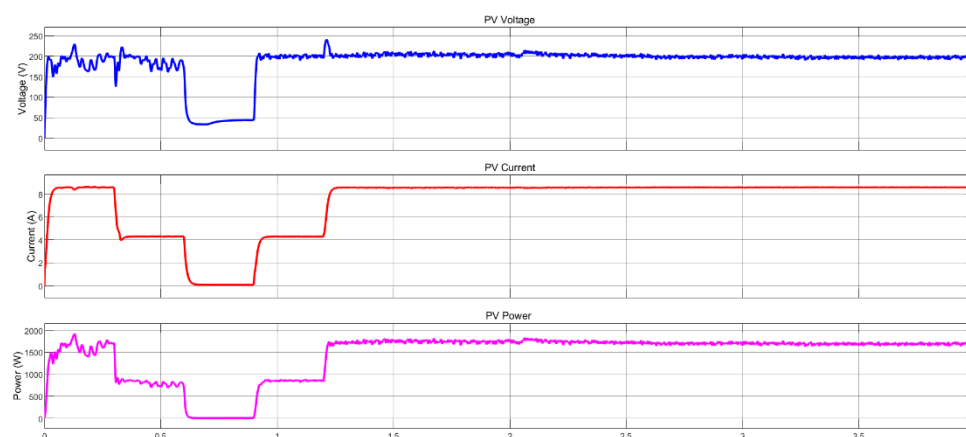
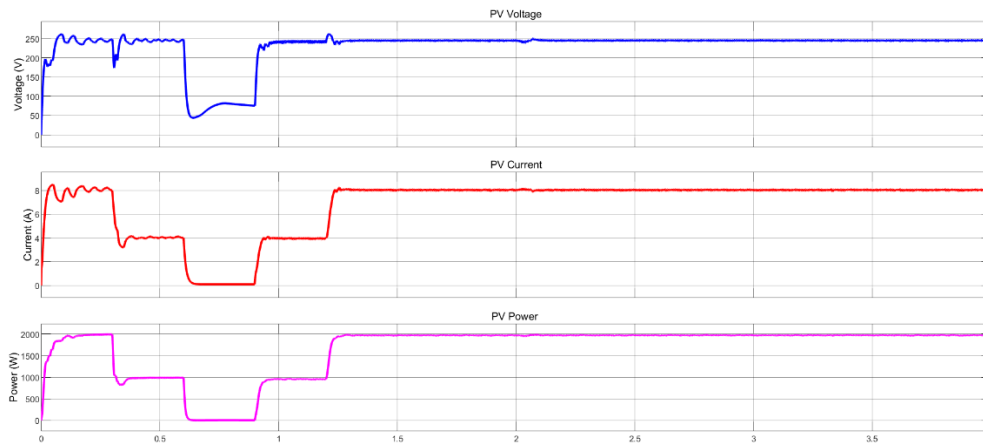


Fig IV.8: Résultats de simulation de sortie du système PV avec commande P&O

La figure montre la tension, le courant et la puissance de sortie d'un générateur photovoltaïque (PV) utilisant la méthode de MPPT (P&O). La montée initiale montre que le système converge rapidement vers un point de fonctionnement stable. La tension et le courant relativement stables, avec des oscillations mineures, indiquent que l'algorithme P&O suit avec succès le point de puissance maximale (MPP). Les petites fluctuations sont typiques du MPPT P&O et reflètent les ajustements continus de l'algorithme pour maintenir le MPP. Le changement d'irradiation solaire entraînerait probablement un changement important de la puissance de sortie.

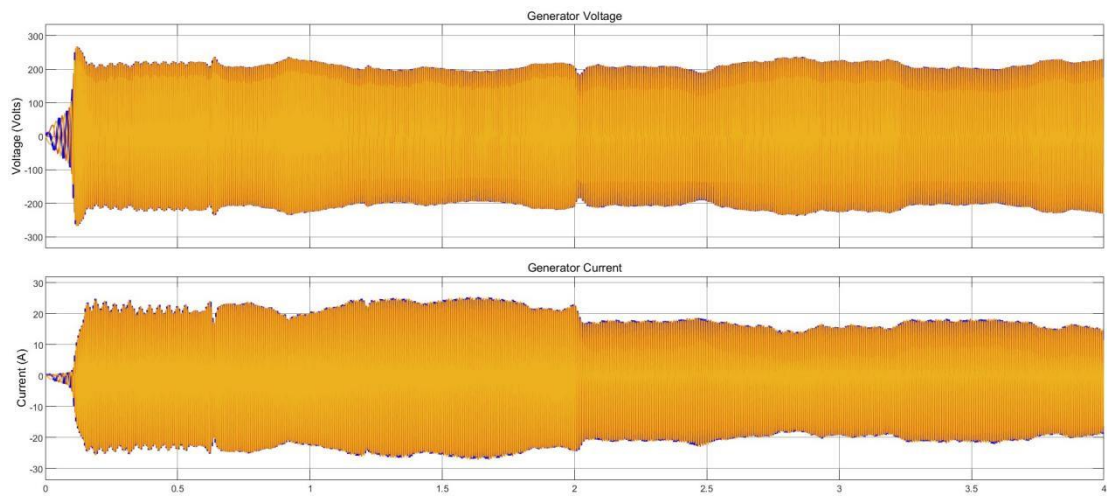


**Fig IV.9:** Résultats de simulation de sortie du système PV commandé par une logique floue

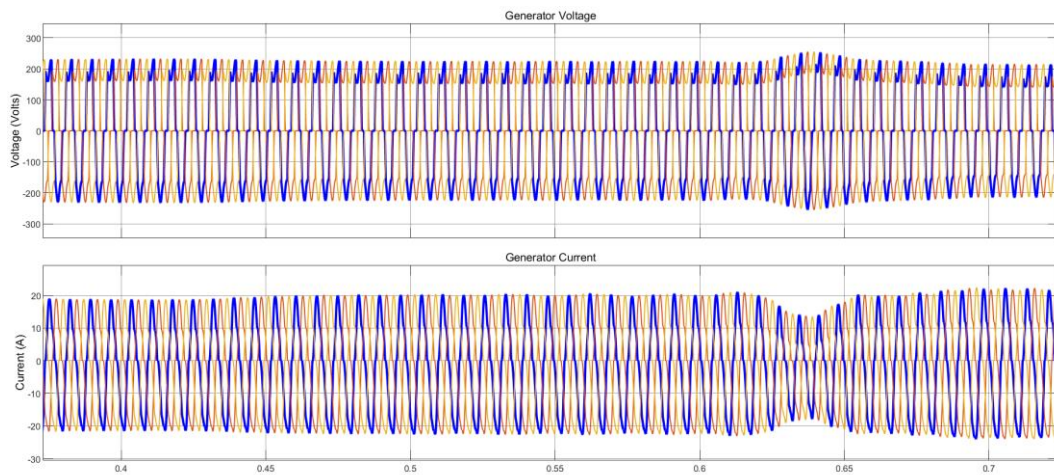
Cette figure montre la tension, le courant et la puissance d'un générateur photovoltaïque (PV) utilisant la logique floue. Contrairement à la méthode P&O, on observe que le MPPT à logique floue génère généralement des transitions plus douces et des variations moins brusques de la tension et du courant. De plus, la puissance extraite atteint une valeur supérieure à celle obtenue avec la méthode P&O (1500 W pour le P&O contre 2000 W pour la logique floue). Les variations de la puissance de sortie indiquent que le système s'adapte aux changements d'irradiation solaire, tout en assurant des transitions plus fluides et moins oscillatoires que celles observées avec la méthode P&O.

### 3.2. Turbine éolienne (WT) :

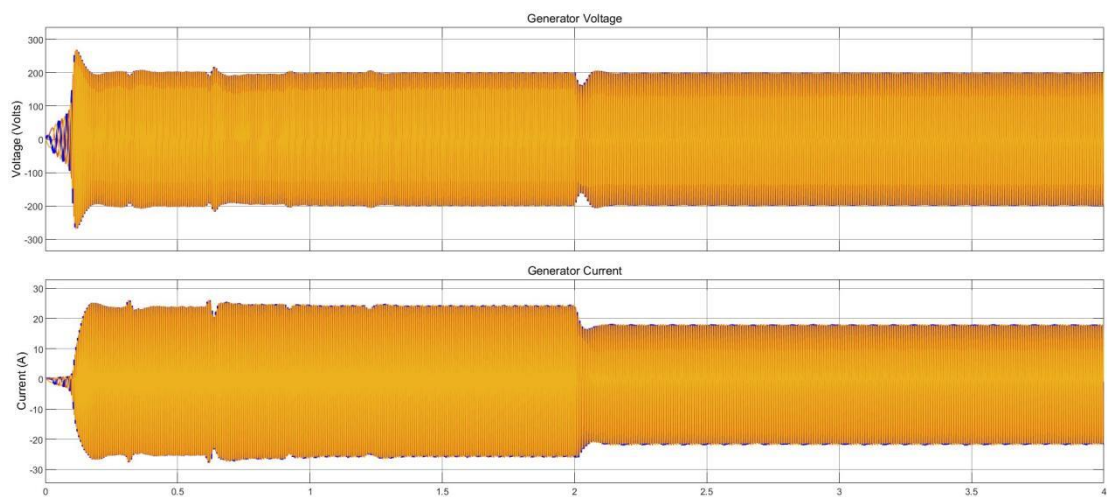
Les résultats de simulation du système éolien sont obtenus sous une vitesse de vent variable, avec une valeur maximale de 12 m/s.



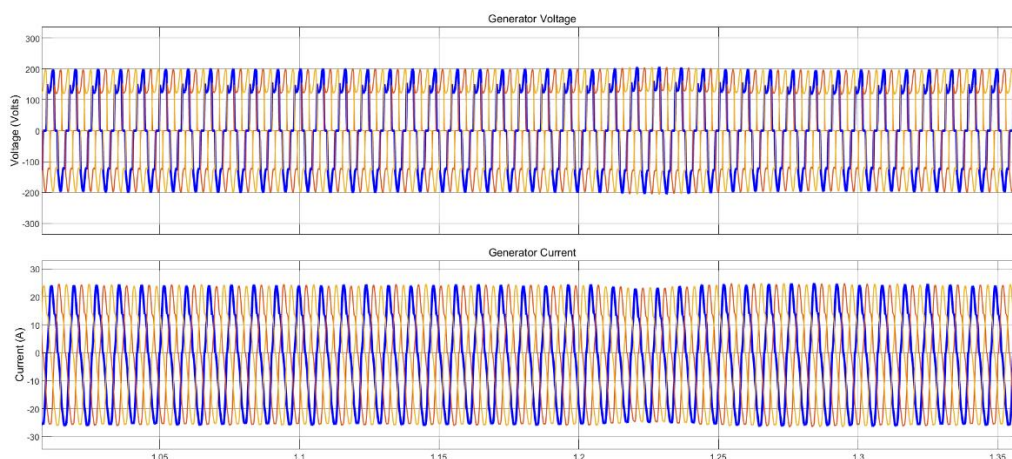
**Fig IV.10:** Résultats de simulation générateur éolienne (P&O)



**Fig IV.11:** Image agrandie du résultats de générateur éolienne (P&O)

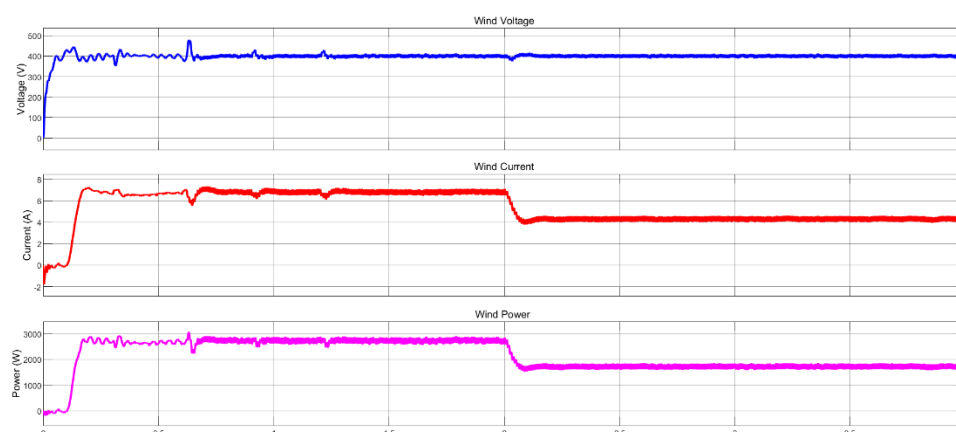


**Fig IV.12:** Résultats de simulation générateur éolienne (logique floue)



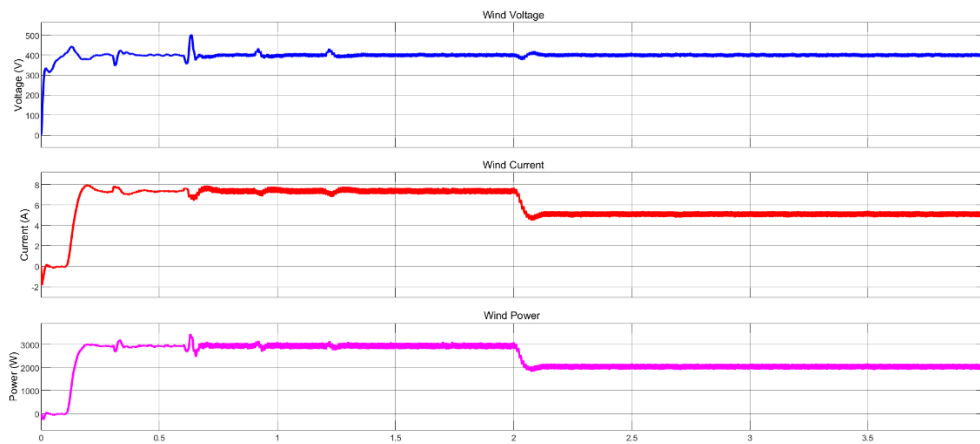
**Fig IV.13:** Image agrandie du résultats de générateur éolienne (logique floue)

L'amplitude des formes d'ondes de tension et de courant du générateur éolien a diminué suite à la baisse de la vitesse du vent (voir le figure IV.4). La réduction de la vitesse du vent entraîne directement une diminution de la puissance mécanique entraînant le générateur, ce qui conduit à une baisse de la tension et du courant de sortie.



**Fig IV.14:** Résultats de simulation de sortie du système éolienne avec commande P&O

La tension stable indique que le système régule efficacement la tension de sortie. Autour de la marque des 2 secondes, on observe une baisse notable du courant et de la puissance, probablement due à des fluctuations de la vitesse du vent. Les courbes de tension, de courant et de puissance restent relativement stables, reflétant l'efficacité de l'algorithme MPPT P&O dans le suivi du point de puissance maximale.

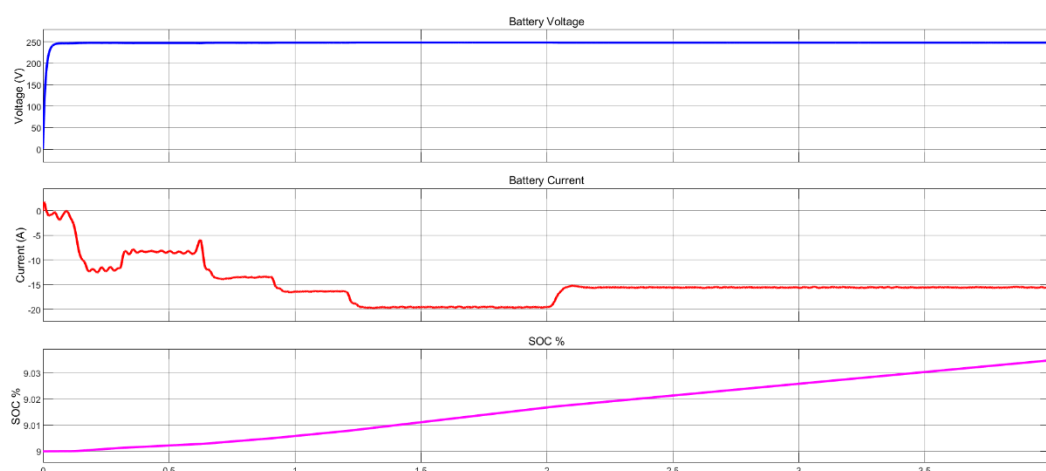


**Fig IV.15:** Résultats de simulation de sortie du système éolienne commandé par une logique floue

Comparée à la méthode P&O, l'approche à logique floue produit généralement des transitions plus douces et moins d'oscillations autour du point de puissance maximale. La montée initiale et le comportement de stabilisation subséquent sont similaires à la méthode P&O, indiquant que le système atteint un point de fonctionnement stable. La courbe de puissance relativement lisse suggère que le contrôleur à logique floue s'adapte efficacement aux variations des conditions de vent, minimisant les fluctuations de puissance.

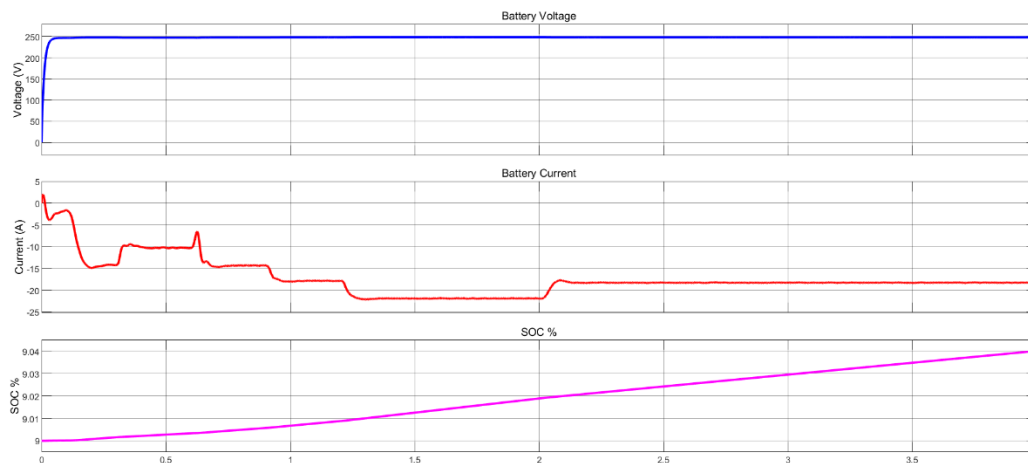
Cependant, la chute de puissance autour de la deuxième seconde est toujours présente. Cela montre que la baisse de puissance est davantage liée à la dynamique du vent qu'à l'algorithme de commande lui-même.

### 3.3. Batterie :



**Fig IV.16:** Résultats de simulation de Batterie (P&O)

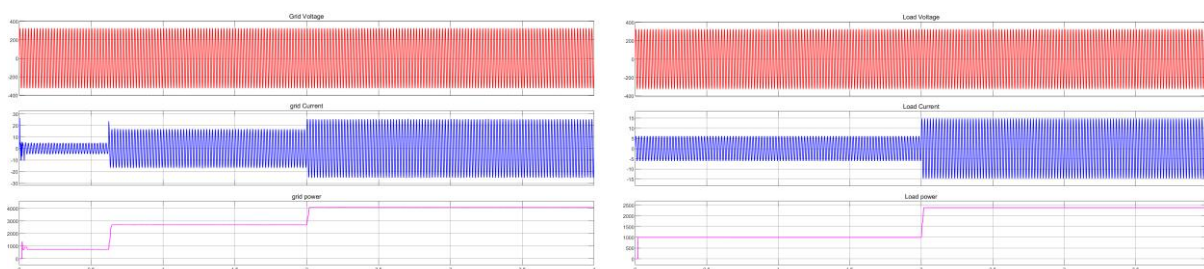
Les résultats montrent que la tension atteint rapidement sa valeur nominale puis reste relativement stable tout au long du processus de charge. Cela indique une tension de charge stable. Puis une augmentation constante du SOC confirme un stockage d'énergie efficace. On observe des fluctuations mineures du courant reflètent la variabilité des sources d'énergie renouvelables.



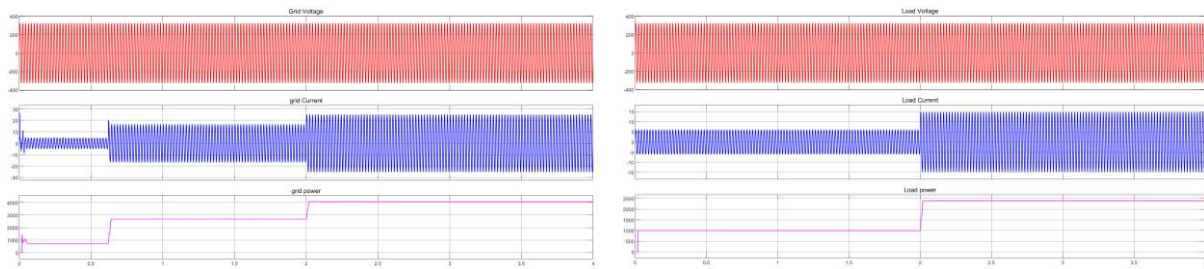
*Fig IV.17: Résultats de simulation de Batterie (logique floue)*

La logique floue offre un contrôle plus stable et efficace par rapport à la méthode P&O. La tension atteint rapidement sa valeur nominale et reste stable, tandis que le courant présente moins d'oscillations, ce qui reflète un meilleur lissage du comportement dynamique. Le SOC augmente de manière régulière, confirmant un stockage d'énergie fiable.

### 3.4. Réseau électrique et charge AC :



*Fig IV.18: Résultats de simulation de réseau électrique et de charge AC (P&O)*



**Fig IV.19:** Résultats de simulation de réseau électrique et de charge AC (logique floue)

Les résultats relatifs au réseau électrique et à la charge montrent peu de différences entre les deux méthodes, car ils sont généralement connectés via un onduleur avec un contrôle en tension ou en puissance. Par conséquent, ils ne sont pas directement influencés par la méthode MPPT, sauf si l'énergie totale extraite varie de manière significative entre les deux méthodes (ce qui est contraire à ce qui a été observé dans les résultats précédents). La différence devient clairement visible au niveau du réseau lorsque la vitesse du vent est instable ou lorsque les conditions d'irradiation solaire et de température varient.

#### 4. Résumé comparatif:

##### Générateur photovoltaïque (PV) :

- Le système contrôlé par logique floue a montré une meilleure stabilité que celui utilisant P&O.
- La puissance maximale extraite a atteint 2000 W avec la logique floue, contre 1500 W avec P&O.
- Les transitions de tension, de courant et de puissance étaient plus fluides.

##### Turbine éolienne :

- Réponse plus rapide et plus précise avec la commande floue.
- La puissance maximale extraite a atteint 3000 W avec la logique floue, contre 2800 W avec P&O.
- Réduction significative des oscillations dans la puissance de sortie.

##### En résumé :

La commande MPPT par logique floue a permis :

- Une extraction d'énergie plus efficace

- Une adaptation plus rapide aux variations climatiques
- Moins d'oscillations
- Une meilleure fiabilité et performance globale du système hybride

**Conclusion :**

L'analyse des résultats de simulation montre que la commande MPPT basée sur la logique floue offre une performance supérieure à la méthode P&O, notamment en termes de stabilité du courant, de réduction des oscillations et de suivi plus fluide du point de puissance maximale. Ces avantages sont particulièrement visibles au niveau du système photovoltaïque, de la batterie et, dans une moindre mesure, de la turbine éolienne. Toutefois, les différences restent moins marquées au niveau du réseau, ce qui s'explique par la régulation indépendante assurée par l'onduleur. Ces résultats confirment l'efficacité du contrôle intelligent pour améliorer la performance globale d'un système hybride.

# **C**onclusion Générale

## **Conclusion générale**

À travers ce mémoire, nous avons mené une étude approfondie sur la modélisation, la commande et la simulation d'un système hybride photovoltaïque-éolien connecté au réseau, en mettant l'accent sur l'optimisation de la production d'énergie à l'aide d'un contrôle MPPT basé sur la logique floue.

Dans un premier temps, nous avons présenté les concepts fondamentaux liés aux systèmes hybrides d'énergies renouvelables, en détaillant leurs composantes principales : générateurs photovoltaïques, éoliennes, convertisseurs, systèmes de stockage et interfaces de connexion au réseau. Une attention particulière a été portée à la modélisation des sources d'énergie et à leur comportement en conditions variables d'irradiation, de température et de vitesse du vent.

Ensuite, nous avons étudié différentes techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT), en comparant une approche classique (Perturb & Observe) à une approche avancée basée sur la logique floue. Cette dernière a démontré une meilleure capacité d'adaptation face aux variations climatiques rapides et a permis d'améliorer l'efficacité énergétique globale du système.

Les résultats de simulation montrent que :

- Les performances du système hybride dépendent fortement des conditions météorologiques, mais la complémentarité entre le solaire et l'éolien permet d'assurer une alimentation continue et plus stable.
- Le contrôle MPPT par logique floue permet une extraction plus efficace de la puissance, en réduisant les oscillations autour du point de puissance maximale et en assurant une meilleure stabilité du système.
- Le raccordement au réseau électrique offre une souplesse importante, notamment pour l'injection de l'excédent de production et pour garantir la continuité de l'alimentation en cas de déficit temporaire de production locale.

Ce travail a ainsi permis de démontrer la faisabilité et l'intérêt d'un système hybride intelligent connecté au réseau, capable de participer activement à la transition énergétique en combinant efficacité, fiabilité et durabilité.

En perspective, il serait pertinent :

- D'étendre le système vers une gestion énergétique intelligente tenant compte des coûts de l'énergie, des profils de consommation, et de la tarification dynamique du réseau;
- De simuler des scénarios plus complexes avec des charges réelles et une intégration de données météorologiques en temps réel.

## Références:

- [1] Maini, A., & Ghemima, I. (2020). "Modélisation et simulation d'un système hybride éolien-photovoltaïque". Mémoire de Master – Biskra, 2020.
- [2] Saheb–Koussa, D., & Belhamel, M. (2007). Production d'électricité sans interruption moyennant un système hybride (éolien–photovoltaïque–diesel). ICRESO-07 Tlemcen.
- [3] Stoyanov, L. (2011). Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables (Doctoral dissertation, Université Pascal Paoli).
- [4] Kraimia, A. (2020). Etude d'un système hybride (Eolien-Photovoltaïque) (Master, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR).
- [5] Khenfous, Soumia & Kaabeche, Abdelhamid & Diaf, S. « Optimisation du dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque/éolien par des méthodes méta heuristiques ». Revue des Énergies Renouvelables. 20.2017.
- [6] MEHIBEL, H. (2017). Dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque-diesel-batterie (Master en Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique).
- [7] VERGÉS SUÁREZ, Maria. "Conception systématique d'une pale de turbine marémotrice en matériau composite et évaluation de l'énergie marémotrice selon des facteurs écologiques et économiques". Mémoire de Master, Génie Mécanique, Université de Munich, Allemagne 2016.
- [8] Manal, FERDJALLAH & Charaf Abdelkarim, Mosbah. MAXIMISATION DE PUISSANCE D'UN GÉNÉRATEUR PHOTOVOLTAÏQUE PARTIELLEMENT OMBRAGÉ. 10.13140/RG.2.2.13750.63047.2021.
- [9] ZEHRI, N. (2015). Modélisation et Simulation d'un Système Photovoltaïque (Master en Automatique, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE).
- [10] Akriche, CH. (2023). Etude comparative entre les méthodes de maximisation de la puissance des panneaux photovoltaïques (Doctoral dissertation, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR).
- [11] BENGHABRIT, S. (2015). Elaboration et caractérisation de couches minces CdS par bain chimique CBD pour application photovoltaïque (Doctoral dissertation, University of sciences and technology in Oran).
- [12] AMMOUR, M. & RIANE, R. (2011). Commande Hybride par Logique Floue d'un Système Hybride Eolien-Photovoltaïque-Diesel pour une maison en site isolé (Doctoral dissertation, ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE).
- [13] AZIZI, A., & LEGOUGUI, A. T. Application des méthodes d'intelligence artificielle dans la modélisation Optimale des générateurs photovoltaïques (Doctoral dissertation).
- [14] Kadri, A. A., & Guelbi, A. Etude Expérimentale d'un Système de Refroidissement Éco-Intelligent pour l'Optimisation en Temps Réel les Performances des Systèmes Photovoltaïques en Région Saharienne (Doctoral dissertation).
- [15] TELLI, A. (2012). Etude et commande d'une éolienne à vitesse variable intégrée au réseau MT (Doctoral dissertation, USTO).
- [16] Abdelkarim, CH. (2019). Contrôle aérogénérateur (MASTER, Université Mohamed Khider de Biskra).

- [17] BENALLAL, A. (2017). Dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque-éolien avec batteries (MASTER en Énergies Renouvelables, UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA-1).
- [18] Bouakar ,M. Etude numérique 2D sur les effets de l'épaisseur de l'aube d'une éolienne Savonius sur la puissance de l'éolienne. University Mohamed Boudiaf M'sila.2022
- [19] BILLEL, F. Etude d'un système Hybride (photovoltaïque-éolien). Mémoire de master génie mécanique.2015
- [20] LAAROSSI, A. M., & YOUSSEF, L. (2017). Calcul du rendement de l'éolienne Rutland 913 à l'aide du logiciel Mecaflux Héliciel. école supérieure de technologie, Guelma.
- [21] Ning, A. (2015). FLOW Lab: FLight, Optimization, and Wind Lab. Research Networking Conference.
- [22] Nouali, S. (2012). Dimensionnement d'un système hybride photovoltaïque/éolien avec stockage d'énergie pour diverses applications (Magister En Energie Renouvelable, Alger, Ecole Nationale Polytechnique).
- [23] ABBOU, B., & Boutkhil, D. J. O. U. D. I. (2022). Modélisation d'un convertisseur DC-DC dans un système de stockage batterie Li-ion et supercondensateur (Doctoral dissertation).
- [24] FRADJ, M. Etude et gestion d'un système hybride (mémoire de master), univercité de Ouargla .
- [25] Kebbati, Y., & Baghli, L. (2022). Design, modeling and control of a hybrid grid-connected photovoltaic-wind system for the region of Adrar, Algeria. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(6), 6531-6558.
- [26] Soedibyo, S., Anam, S., & Pradipta, A. (2019). A Design Of Standalone Hybrid Pv/Wind/Fuel Cell Generation System And Hydrogen Electrolyzer With Local Controller For Remote Areas. *JAREE*, 3(2).
- [27] Atoui, A. (2023). Système de gestion d'énergie basé sur la logique floue pour un système hybride photovoltaïque-diesel-batteries alimentant une charge isolée (Thèse de Doctorat), ENP-Alger).
- [28] Bellili, A., & Yagouni, Y. (2020). Optimisation d'un système photovoltaïque par la logique floue. Mémoire de master, Université de Béjaia.
- [29] Belmellat, S., & Bedjguelel, C. (2023). Commande par logique floue appliquée à la gestion d'un système hybride. Mémoire de master, Université de Béjaia.
- [30] Boubarki, A., & Berraha, B. (2024). Contrôle MPPT basé sur la logique floue pour un système d'énergie éolienne. Mémoire de master, Université de Ouargla.
- [31] Ismaiel, A. M., et al. (2024). Adaptive Fuzzy Logic Controller for MPPT Based DFIG Wind Turbine. *Suez Canal Engineering, Energy and Environmental Science*.
- [32] Zebraoui, O., & Bouzi, M. (2020). Improved MPPT controls for a standalone PV/wind/battery hybrid energy system. *IJPEEDS*, 11, 988-1001.
- [33] Bouguerra, Z. (2025). Comparative Study between Common and Individual MPPT Controller Using Fuzzy Logic Control for Hybrid System (Photovoltaic/Wind Energy Conversion System). *Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science*.
- [34] Pham Duy An. (2025). Control of Stand-Alone Hybrid Wind-Photovoltaic Energy System Using Fuzzy Logic. *JST: Smart Systems and Devices*.
- [35] Yahya, A. O. M., Mahmoud, A. K. O., & Youm, I. (2008). Etude et modélisation d'un générateur photovoltaïque. *Journal of Renewable Energies*, 11(3), 473-483.

- [36] CHEBANA, A. (2014). Contrôle d'un système photovoltaïque connecté au réseau (Master's thesis).
- [37] Zarour, L., & Bouzid, A. (2010). Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau.
- [38] Mida, D. (2019). Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Énergie Electrique Hybride « Eolien-Photovoltaïque » (Doctoral dissertation, Université Mohamed Khider-Biskra).
- [39] Bouhedda, A. (2011). Contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [40] KHECHAB, B., & BENTOUBA, S. (2015). Etude et modélisation d'un système éolien à base d'une génératrice asynchrone à double alimentation GADA dans la région d'Adrar (Doctoral dissertation, Université Ahmed Draïa-Adrar).
- [41] Etude et Modélisation de l'Entrainement Electrique d'un Système Eolien à base de la Machine Synchrone à Aimants Permanents.
- [42] Eddine, Z. S. (2017). Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau. Mémoire de master, Université Badji Mokhtar-Annaba.
- [43] Poitiers, F. (2003). Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone à cage autonome-machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau (Doctoral dissertation, Université de Nantes).
- [44] Eddahech, A. (2013). Modélisation du vieillissement et détermination de l'état de santé de batteries lithium-ion pour application véhicule électrique et hybride (Doctoral dissertation, Université Sciences et Technologies-Bordeaux I).
- [45] Omar N., M. A. Monem, Y. Firouz, J. Salminen, J. Smekens, O. Hegazy, H. Gaulous, G. Mulder, P. Van den Bossche, T. Coosemans, and J. Van Mierlo. "Lithium iron phosphate based battery - Assessment of the aging parameters and development of cycle life model." *Applied Energy*, Vol. 113, January 2014, pp. 1575–1585.
- [46] Smaili, F., & Bouzidi, O. (n.d.). Comparative study between fixed and tracking photovoltaic system in south Algeria (Doctoral dissertation).
- [47] FERDJALLAH, M. « Maximisation de puissance d'un générateur photovoltaïque partiellement ombragé ». Université de Ghardaïa 2021.
- [48] Vaïtchemé, M. T. (2019). Modélisation et simulation d'un système de stockage intégré dans un micro-réseau autonome solaire-éolien (Doctoral dissertation).
- [49] Yannick, B. N. (2012). Modélisation des injections de puissance d'un système PV sur un réseau public. Mémoire de Master, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement.
- [50] Mida, Dris. (2019). Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Énergie Electrique Hybride « Eolien-Photovoltaïque ». Université Mohamed Khider-Biskra.
- [51] Doubabi H. Contribution à l'amélioration de l'efficacité d'une chaîne de conversion photovoltaïque (thèse de doctorat). Université de Reims, France; 2021.
- [52] Abbes H, Abid H, Loukil K, Toumi A, Abid M. Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque. *J Renew Energies*. 2014;17(3):435-45.
- [53] El Hamel LA, Ghodbane S. Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque optimisé par les algorithmes MPPT (thèse de doctorat). 2020.

- [54] Li C, Chen Y, Zhou D, Liu J, Zeng J. A High-Performance Adaptive Incremental Conductance MPPT Algorithm for Photovoltaic Systems. *Energies*. 2016; 9(4):288.
- [55] Mahdavian M, Wattanapongsakorn N, Shahgholian G, Mozafarpour S, Janghorbani M, Shariatmadar SM. Maximum power point tracking in wind energy conversion systems using tracking control system based on fuzzy controller. In: 2014 11th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON). IEEE; 2014. p. 1–5. doi:10.1109/ECTICon.2014.6839750.
- [56] El Alami Y, Chetouani E, Mokhliss H, Ouerradi F, Aoutoul M, Bounouar S, et al. Optimizing solar energy efficiency with an improved hill-climbing maximum power point tracking control approach: hardware implementation. *Clean Energy*. 2024;8(5):167-76.
- [57] Derbeli, Mohamed & Napole, Cristian & Calvo, Isidro & Fernández-Bustamante, Pablo. (2021). Maximum Power Point Tracking Techniques for Photovoltaic Panel: A Review and Experimental Applications. *Energies*. 14. 7806. 10.3390/en14227806.
- [58] Khengaoui N, Khengaoui N. Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation (mémoire de master). Université de Ouargla; 2015.
- [59] Berkani Y, Afia L. Commande floue adaptative de la machine asynchrone (mémoire de master), Université de Béjaia; 2016.
- [60] Zouaoui Z. Commande des convertisseurs statiques DC/DC Par la logique floue (mémoire de magister). Université de Batna; 2007.
- [61] Yahiaoui Y. Commande MPPT à base la logique floue et les algorithmes génétiques [mémoire de master]. Université de Bejaia; 2013.
- [62] Khengaoui N, Khengaoui N. Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation [mémoire de master]. Université de Ouargla; 2015.
- [63] Toulal B. Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable (mémoire de magister). Université de Batna; 2010.
- [64] Elbia Y. Commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux orienté (mémoire de magister). Université Batna; 2009.
- [65] Toulal B. Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable (mémoire).
- [66] Bouchon-Meunier B, Marsala C. Logique floue, principes, aide à la décision. Paris: Hermès Science Publications; 2003.
- [67] Qu Z, Younis W, Wang Y, Georgievitch PM. A Multi-Source Power System's Load Frequency Control Utilizing Particle Swarm Optimization. *Energies*. 2024;17(2):517.

## Résumé

Ce travail vise à concevoir et simuler un système hybride solaire-éolien connecté au réseau, en utilisant un contrôle basé sur la logique floue pour optimiser la production d'énergie. La méthodologie consiste à modéliser les composants du système dans Simulink/MATLAB, puis à comparer la performance des algorithmes MPPT classiques avec ceux utilisant la logique floue. Les résultats montrent que la logique floue offre une meilleure stabilité, réduit les oscillations, et adapte efficacement le système aux variations climatiques, garantissant une alimentation plus continue et performante. En conclusion, cette approche innovante améliore significativement la gestion et l'efficacité des systèmes hybrides d'énergies renouvelables.

**Mots clés:** Commande, MPPT, Logique floue, Eolien, Photovoltaïque, Hybride, Batterie, réseau.

## نبذة مختصرة

يهدف هذا العمل إلى تصميم ومحاكاة نظام هجين يعمل بالطاقة الشمسية وطاقة الرياح ومتصل بالشبكة الكهربائية، مع استخدام التحكم المعتمد على المنطق الضبابي لتحسين إنتاج الطاقة. وتعتمد المنهجية على نمذجة مكونات النظام في بيئة المحاكاة الرياضية، ثم مقارنة أداء خوارزميات تتبع نقطة القدرة العظمى التقليدية مع تلك التي تعتمد المنطق الضبابي. وتُظهر النتائج أن المنطق الضبابي يوفر استقرارًا أفضل، ويقلل من التذبذبات، ويتكيف بكفاءة مع التغيرات المناخية، مما يضمن تغذية كهربائية أكثر استمرارية وكفاءة. وخلاصة القول، فإن هذا النهج المبتكر يعزز بشكل كبير من إدارة وكفاءة أنظمة الطاقة المتجددة الهجينة.

**كلمات مفتاحية :** التحكم, تتبع نقطة القدرة القصوى, المنطق الضبابي, طاقة الرياح, الطاقة الكهروضوئية, هجين, بطارية, شبكة

## Abstract

This work aims to design and simulate a solar-wind hybrid system connected to the grid, using fuzzy logic-based control to optimize energy production. The methodology involves modeling the system components in Simulink/MATLAB, then comparing the performance of classical MPPT algorithms with those using fuzzy logic. The results show that fuzzy logic offers better stability, reduces oscillations, and effectively adapts the system to climatic variations, ensuring a more continuous and efficient power supply. In conclusion, this innovative approach significantly improves the management and efficiency of hybrid renewable energy systems.

**Keywords :** Control, MPPT, Fuzzy logic, Wind , Photovoltaic, Hybrid, Battery, Grid.