



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued



Faculté de la Technologie
DEPARTEMENT DE GENIE Electrique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Spécialité : Commande Electrique

Présenté par :

- 1- SETTOU FARES
- 2- SEGHERI Mohammed Ayoub
- 3- Djerraya Salah

Intitulé :

**Optimisation intelligente du VSC dans un système hybride
PV–éolienne–batterie : Analyse comparative des
performances entre PI et ANFIS.**

Soutenue le : 13 /06 /2026

Devant le jury composé de :

Dr : Riad Toumi

Président

Dr : Mohammed Boughazala

Examineur

Dr : Chaouki Ilyes

Encadreur

Année académique : 2025/2026

Dédicace

*Avec tout amour et respect, nous dédions cet humble travail, fruit de deux années
D'apprentissage, de découverte et d'innovation, à l'éminent professeur, le Dr. Ilyes Chaouki.
Vous étiez plus qu'un enseignant, vous étiez un guide, un motivateur et un père scientifique.*

Nous ne méritons pas tous ces dons de votre part.

Notre honorable docteur,

*Ces mots ne vous rendent pas justice, mais ils portent en eux une part de notre gratitude
Infinie.*

Qu'Allah vous récompense en notre nom comme un professeur récompense son élève.

Je dédie également ce travail à :

****Aux cœurs chaleureux qui m'ont porté dans leurs bras,
Aux mains sûres qui m'ont soutenu lorsque mes pas ont faibli.*

***À ma famille**.*

*Ma mère qui a éclairé mon chemin par sa patience, mon père qui m'a appris que le succès exige
Des efforts et de la détermination, et mes frères qui ont été mon soutien et mes compagnons.*

***Et à mes amis**.*

*Des compagnons qui ont transformé la fatigue en beaux souvenirs, l'échec en leçon et le succès
En joie que nous vivons ensemble.*

*Cette réalisation est le fruit de votre amour et de votre soutien. Je vous suis très reconnaissant et
Reconnaissant.*

Merci de faire partie de mon histoire.

« Et si vous êtes patients et craignez Allah, cela fait partie des choses dignes d'être résolues. »

[Al-Imran : 186]

Écrit par vos étudiants reconnaissants :

*** SETTOU FARES ***

*** DJERRAYA SALAH ***

***SEGHERI Mohammed AYOUB ***

Résumé

Ce travail présente une stratégie avancée d'exploitation et de contrôle d'un système énergétique hybride multi-sources comprenant des générateurs d'énergie solaire, une éolienne, ainsi qu'un système de stockage par batteries. L'objectif principal est d'améliorer la gestion des flux d'énergie et d'élever la qualité de l'énergie électrique injectée dans le réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de source de tension (VSC).

À cet effet, deux stratégies de contrôle indépendantes ont été étudiées et évaluées pour le contrôle du convertisseur de source de tension ; la première repose sur un régulateur classique de type PI assurant la stabilité de base et la régulation de la tension du bus continu, tandis que la seconde est basée sur un système d'inférence neuro-flou adaptatif (ANFIS) permettant d'ajuster dynamiquement les paramètres de commande afin de compenser la non-linéarité du système et d'améliorer la robustesse face aux variations climatiques et aux fluctuations de charge.

La comparaison entre les deux approches permet d'évaluer les performances de chacune en termes de réduction de l'erreur de suivi du courant et de diminution du taux de distorsion harmonique du courant injecté dans le réseau. Les résultats de simulation numérique réalisés sous l'environnement MATLAB/Simulink confirment l'efficacité des deux approches proposées, montrant une bonne réponse dynamique lors des perturbations, une régulation précise de la tension du bus continu, ainsi qu'une amélioration notable de la qualité de l'énergie électrique, garantissant ainsi une gestion énergétique optimale et sûre.

Mots-clés : Système hybride, énergie renouvelable, convertisseur de source de tension (VSC), régulateur PI, ANFIS, logique floue, réseaux de neurones, gestion de l'énergie, distorsion harmonique (THD), MATLAB/Simulink.

الملخص

يقدم هذا العمل استراتيجية متقدمة لتشغيل والتحكم في نظام طاقة هجين متعدد المصادر، يتألف من مولدات طاقة شمسية، وتوربين رياح، ونظام تخزين بطاريات. يهدف البحث بشكل أساسي إلى تحسين إدارة تدفق الطاقة ورفع جودة الطاقة الكهربائية المُضخّة إلى الشبكة عبر محول مصدر الجهد (VSC).

لتحقيق هذه الغاية، دُرست وقُيِّمت استراتيجيتان مستقلتان للتحكم في محول مصدر الجهد. تعتمد الأولى على وحدة تحكم تناسبية تكاملية (PI) تقليدية، تضمن الاستقرار الأساسي وتنظيم جهد ناقل التيار المستمر، بينما تعتمد الثانية على نظام استدلال عصبي ضبابي تكيفي (ANFIS) يُعدّل معلمات التحكم ديناميكيًا للتعويض عن اللاخطية في النظام، وتحسين مقاومته للتغيرات المناخية وتقلبات الأحمال.

نتيح مقارنة النهجين تقييم أداء كل منهما من حيث تقليل خطأ تتبع التيار وخفض التشوه التوافقي الكلي (THD) للتيار المُضخّ إلى الشبكة. تؤكد نتائج المحاكاة العددية التي تم الحصول عليها باستخدام بيئة MATLAB/Simulink فعالية كلا النهجين المقترحين، حيث تُظهر استجابة ديناميكية جيدة للاضطرابات، وتنظيمًا دقيقًا لجهد ناقل التيار المستمر، وتحسنًا ملحوظًا في جودة الطاقة، مما يضمن إدارة مثلى وأمنة للطاقة.

الكلمات المفتاحية: نظام هجين، طاقة متجددة، محول مصدر الجهد (VSC)، وحدة تحكم تناسبية تكاملية (PI)، نظام استدلال ضبابي عصبي تكيفي (ANFIS)، منطق ضبابي، شبكات عصبية، إدارة الطاقة، التشوه التوافقي الكلي (THD)، MATLAB/Simulink.

Abstract

This work presents an advanced strategy for the exploitation and control of a hybrid multi-source energy system comprising solar energy generators, a wind turbine, and a battery storage system. The main objective is to improve energy flow management and enhance the quality of electrical power injected into the grid through a Voltage Source Converter (VSC).

For this purpose, two independent control strategies have been studied and evaluated for the control of the voltage source converter; the first is based on a classical PI regulator ensuring basic stability and DC bus voltage regulation, while the second is based on an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) that dynamically adjusts the control parameters to compensate for system non-linearity and improve robustness against climatic variations and load fluctuations.

The comparison between the two approaches allows the evaluation of each one's performance in terms of reducing current tracking error and decreasing the Total Harmonic Distortion (THD) of the current injected into the grid. The numerical simulation results obtained using the MATLAB/Simulink environment confirm the effectiveness of both proposed approaches, showing good dynamic response during disturbances, precise DC bus voltage regulation, and a notable improvement in electrical power quality, thus ensuring optimal and safe energy management.

Keywords: Hybrid system, renewable energy, Voltage Source Converter (VSC), PI regulator, ANFIS, fuzzy logic, neural networks, energy management, Total Harmonic Distortion (THD), MATLAB/Simulink.

Table Des Matières

Dédicace.....	
Résumé.....	
Table Des Matières.....	
List Des Figures	
List Des Tableaux.....	
List Des Acronymes et des Symboles.....	
Introduction Générale	
Chapitre I: Introduction générale aux systèmes hybrides d'énergies renouvelables	
I .1. Introduction.....	2
I .2. Aperçu des énergies renouvelables et des systèmes hybrides	2
I .3. Définition des énergies renouvelables	3
I .4. Système photovoltaïque	3
I .5. Structure et Optimisation du Système	4
I .6. Avantages de la Technologie Photovoltaïque.....	5
I .7. Système éolien	5
I .8. Système de stockage par batteries Principe de fonctionnement	6
I .9. Importance des systèmes hybrides.....	7
I .10. Enjeux de la gestion énergétique et de la qualité de l'énergie.....	8
I .11. Problématique de la gestion énergétique	9
I .12. Qualité de l'énergie électrique	9
I .13. Objectifs de la recherche.....	9
Chapitre II: Modélisation du système (PV – Éolienne – Batterie – VSC)	
II.1 Introduction	12
II.2 Modélisation du PV.....	12
II.2.1 Modèle à une diode (1LM5P):.....	13
II.2.2 Modèle à deux diodes (2LM7P) :	14
II.3 Modélisation de l'éolienne	17
II.4 Modélisation de la batterie :	19
II.4.1 Batterie Nickel-Cadmium (NiCd) et Nickel-Hydrure Métallique (NiMH).....	20
II.5 Modélisation du VSC	24
II.6. Conclusion.....	27

Chapitre III: Commande et optimisation

III.1. Introduction.....	29
III.2. Commande classique (PI)	29
III.2.1. Généralités sur les régulateurs classiques	29
III.2.2. Description des régulateurs PI.....	30
III.2.3. Méthodes d'optimisation pour le réglage des contrôleurs PI.....	31
III.3. Système d'inférence neuro-flou adaptatif (ANFIS)	31
III.4. Optimisation intelligente par logique floue	32
III.4.1. La fuzzification	32
III.4.2. La défuzzification.....	33
III.5. Gestion énergétique du SHSER.....	33
III.5.1. Stratégies à base de règles	34
III.5.2. Stratégies à base d'optimisation.....	34
III.5.3. Modes de fonctionnement du SHSER.....	35
III.5.4. Mode de fonctionnement normal	35
III.5.5. Mode de fonctionnement dégradé	35
III.6. Conclusion	36

Chapitre IV: Simulation et résultats

IV.1.Introduction:	38
IV.2 Simulation modèle d'alimentation PV 20 kW, algorithme MPPT « Perturber et observer »	38
IV.2.1 Modélisation du convertisseur DC-DC élévateur:	39
IV.3. Simulation modèle éolien de 20 kW utilisant un contrôleur à logique floue	40
IV.4 Simulation modèle de gestion de batterie utilisant un contrôleur PI.....	41
IV.5. Voltage Source Converter (VSC)	43
IV.5.1 Simulation système hybride PV–éolienne–batterie avec VSC- PI	43
IV.6. Analyse des performances du système avec le contrôleur PI classique	47
IV.6.1. Effondrement de la tension du bus continu (Vdc) :	47
IV.6.2. Interruption du flux de puissance et du courant de charge :	47
IV.6.3. Interprétation scientifique de la défaillance :	47
IV.6.4. Simulation système hybride PV–éolienne–batterie avec VSC- ANFIC.....	48
IV.7. Analyse et interprétation des résultats de simulation du système hybride (PV-Éolien-Batterie) avec contrôleur ANFIS	51
IV.7.1. Analyse du flux de puissance et de la stabilité du bus continu (DC Bus) :	51
IV.7.2. Analyse de la puissance de la charge et du courant d'appel :	51
IV.7.3. Analyse harmonique (FFT) et évaluation de la qualité de l'énergie :	51

IV.8. Conclusion	55
Conclusion générale	56
Référence	58
Annexe	64

List De Figures

Fig. I.1 : Panneaux Solaires Photovoltaïques.	4
Fig. I.2 : Schéma d'une chaîne de conversion d'énergie solaire PV.....	5
Fig. I.3 : Éolienne à Axe Horizontal.....	6
Fig. I.4 : Éolienne à Axe Vertical.....	6
Fig. I.5: Schéma fonctionnel de la batterie.	7
Fig. II.1 : Schéma équivalent du modèle à une seule diode.	13
Fig. II.2 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles (2LM7P).	15
Fig. II.3 : Courbe C_p du modèle Simulink pour différents angles β	18
Fig. II.4 : Schéma fonctionnel du modèle dynamique de l'éolienne.	19
Fig II.5 Caractéristique de décharge du courant nominal de batterie Nickel-Cadmium	20
Fig II.6 Caractéristique de décharge pour batterie Ni-MH.....	21
Fig II.7 Caractéristique de décharge au courant nominal – Batterie Li-Ion.....	22
Fig II.8 Caractéristique de décharge au courant nominal – Batterie Acide-Plomb.....	23
Fig. II.9(a) : Diagramme simplifié du convertisseur VSC à deux niveaux.	24
Fig. III.1 : Schéma fonctionnel d'un processus réglé.	30
Fig. III.2 : L'Architecture de l' ANFIS..	31
Fig. III.3 : Structure principale d'un contrôleur à logique floue.	32
Fig. III.4 : Classification des stratégies de gestion d'énergie.	34
Fig IV. 1: Schéma bloc Simulink du convertisseur DC-DC (Boost) associé au système photovoltaïque avec commande MPPT (P&O).....	39
Fig IV. 2 : Paramètres du bloc PV.	39
Fig IV. 3 : Simulation d'un convertisseur DC-DC élévateur à l'aide de MATLAB/Simulink.....	40
Fig IV. 4 : Modélisation Simulink de la chaîne de conversion d'énergie éolienne incluant la turbine, le générateur PMSG et le redresseur.	41
Fig IV. 5 : Paramètres du bloc éolienne.	41
Fig IV. 6 : Schéma de commande Simulink du système de stockage d'énergie (Batterie) via un convertisseur bidirectionnel abaisseur-élévateur.....	42
Fig IV. 7 : Paramètres du bloc batterie.....	42
Fig IV. 8 : Batterie du convertisseur DC/DC abaisseur-élévateur	42
Fig IV. 9 : Pont universel (Voltage Source Converter).....	43
Fig IV. 10 : Forme d'onde du courant alternatif triphasé de la charge sous le contrôle du régulateur PI classique.	44
Fig IV. 11: Structure de commande globale de l'onduleur source de tension (VSC Contrôleur principal) illustrant les boucles de régulation de tension et de courant.....	44
Fig IV. 12 : Modèle Simulink global du système hybride (PV-Éolien-Batterie) avec commande PI classique de l'onduleur (VSC).	45
Fig IV. 13 : Évolution dynamique des puissances (Éolien, PV, Batterie) et de la tension du bus continu (Vdc) avec le contrôleur PI.	45
Fig IV. 14 : Réponse de la puissance active de la charge sous le contrôle du régulateur PI classique.	46
Fig IV. 15 : Forme d'onde du courant alternatif triphasé de la charge sous le contrôle du régulateur PI classique.	46
Fig IV. 16 : Analyse spectrale (FFT) et Taux de Distorsion Harmonique (THD) du courant de la charge en régime transitoire.	47
Fig IV. 17 : Boucle de régulation interne du courant (Current Regulator) basée sur le contrôleur intelligent ANFIS.	48
Fig IV. 18 : Structure de commande globale de l'onduleur source de tension (VSC Main Controller) intégrant la boucle de régulation intelligente (ANFIS).	49

Fig IV. 19 : Modèle Simulink global du système hybride (PV-Éolien-Batterie) avec commande intelligente ANFIS de l'onduleur (VSC).	49
Fig IV. 20 : Évolution dynamique des puissances (Éolien, PV, Batterie) et de la tension du bus continu (Vdc) sous le contrôle de l'algorithme ANFIS.	50
Fig IV. 21 : Réponse de la puissance active de la charge sous le contrôle intelligent ANFIS.	50
Fig IV. 22 : Forme d'onde du courant alternatif triphasé de la charge sous le contrôle intelligent ANFIS.	51
Fig IV. 23 : Analyse spectrale (FFT) et Taux de Distorsion Harmonique (THD) du courant de la charge en régime transitoire (contrôleur ANFIS).....	51
Annexe 1 : Implémentation Simulink du contrôleur MPPT P&O conventionnel.	65
Annexe 2 : Implémentation Simulink du contrôleur MPPT Fuzzy logic conventionnel.....	67

List Des Tableaux

Tableau III. 1 : Formes d'onde de la tension et état de commutation Idc.	24
Tableau IV. 1 : Paramètres du convertisseur élévateur DC-DC.....	39
Tableau IV. 2 Comparatif : PI vs ANFIS.....	54

Liste des Acronymes et des Symboles

Symbole	Désignation
I_{pv}	Courant de sortie de la cellule photovoltaïque
V_{pv}	Tension de sortie de la cellule photovoltaïque
I_{ph}	Photo-courant (courant généré par la lumière)
I_{phref}	Photo-courant en conditions de référence
I_d	Courant de la diode
I_{d1}, I_{d2}	Courants des diodes 1 et 2 (modèle 2 diodes)
I_0	Courant de saturation inverse de la diode
I_{s1}, I_{s2}	Courants de saturation des diodes 1 et 2
I_{sh}	Courant dans la résistance de shunt
R_s	Résistance série de la cellule PV
R_{sh}	Résistance shunt (parallèle) de la cellule PV
n, n_1, n_2	Facteur(s) d'idéalité de la diode
V_t	Tension thermodynamique (potentielle thermique)
q	Charge de l'électron ($1,6 \times 10^{-19}$ C)
K	Constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K)
T_c	Température réelle de la cellule PV
T_{cref}	Température de référence de la cellule PV
G	Éclairement solaire réel
G_{ref}	Éclairement solaire de référence (1000 W/m ²)
μ_{cc}	Coefficient de sensibilité du courant à la température
I_{cc}	Courant de court-circuit en conditions de référence
P_m	Puissance mécanique disponible sur l'arbre
P_{eol}	Puissance extraite par l'éolienne
C_p	Coefficient de puissance de l'éolienne

Symbole	Désignation
P_v	Puissance du vent
λ	Vitesse spécifique (tip speed ratio)
β	Angle de calage (pitch angle) des pales
V_w	Vitesse du vent
R	Rayon du rotor de l'éolienne
ρ	Densité de l'air
S	Surface balayée par les pales
Ω	Vitesse angulaire du rotor
C_{eol}	Couple mécanique de l'éolienne
C_{mec}	Couple mécanique résistant
J	Moment d'inertie du rotor
f	Coefficient de frottement visqueux
γ	Rapport de vitesse périphérique
E_{batt}	Tension non linéaire de la batterie
E_o	Constante de tension de la batterie
K	Constante de polarisation
Q	Capacité maximale de la batterie
it	Capacité extraite (charge accumulée)
i^*	Courant de filtrage basse fréquence
SOC	État de charge (State of Charge)
A	Amplitude de la zone exponentielle
B	Inverse de la constante de temps exponentielle
$Exp(s)$	Tension exponentielle dans le domaine de Laplace
V_{dc}	Tension du bus continu (DC)
V_n	Vecteur de tension nœud (ligne-neutre) [V_{an} , V_{bn} , V_{cn}]

Symbole	Désignation
VL	Vecteur de tension ligne-ligne [V_{ab} , V_{bc} , V_{ca}]
Vdq	Vecteur de tension dans le repère tournant (dq)
IL	Vecteur de courant [I_{an} , I_{bn} , I_{cn}]
Idq	Vecteur de courant dans le repère dq
Idc	Courant du bus continu
S_v, S_{dq}	Matrices de commutation du VSC
TL	Matrice de transformation phase-ligne
S, S'	Matrices de transformation de Park ($abc \rightarrow dq$)
m	Indice de vecteur de commutation ($m = 0, 1, \dots, 7$)
THD	Taux de Distorsion Harmonique
P_{pv}	Puissance produite par le générateur PV
P_{tot}	Puissance totale produite (PV + Éolien)
$P_{demande}$	Puissance demandée par la charge
AC	Alternating Current — Courant Alternatif
$ANFIS$	Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System — Système d'Inférence Neuro-Flou Adaptatif
DC	Direct Current — Courant Continu
EMS	Energy Management Strategy — Stratégie de Gestion de l'Énergie
FFT	Fast Fourier Transform — Transformée de Fourier Rapide
GED	Génération d'Énergie Dispersée
$MADA$	Machine Asynchrone à Double Alimentation
$MPPT$	Maximum Power Point Tracking — Poursuite du Point de Puissance Maximale
$NiCd$	Nickel-Cadmium — Type de batterie rechargeable
$NiMH$	Nickel-Metal Hydride — Batterie Nickel-Hydrure Métallique
$P\&O$	Perturb and Observe — Méthode Perturber et Observer

Symbole	Désignation
<i>PI</i>	Proportional-Integral — Contrôleur Proportionnel-Intégral
<i>PMSG</i>	Permanent Magnet Synchronous Generator — Machine Synchrone à Aimants Permanents
<i>PV</i>	Photovoltaic — Photovoltaïque
<i>PWM</i>	Pulse Width Modulation — Modulation de Largeur d'Impulsion
<i>SHSER</i>	Système Hybride de Sources d'Énergie Renouvelable
<i>SOC</i>	State of Charge — État de Charge
<i>THD</i>	Total Harmonic Distortion — Taux de Distorsion Harmonique
<i>VSC</i>	Voltage Source Converter — Convertisseur de Source de Tension

Introduction générale

Introduction générale

L'utilisation des énergies renouvelables ne date pas d'hier. Dans l'histoire de l'humanité, elles ont longtemps représenté la principale source d'approvisionnement en énergie. Les moulins à eau et à vent, le bois comme combustible, la traction animale ou encore les bateaux à voile ont largement contribué au développement des civilisations. Ce n'est qu'avec la révolution industrielle que cette tendance a changée, marquée par deux grandes étapes : le 19^e siècle, avec l'exploitation massive du charbon et l'avènement des machines à vapeur, et le 20^e siècle avec la prédominance du pétrole, du gaz naturel et de l'énergie nucléaire. Ces découvertes ont réduit le recours aux énergies renouvelables, tant en volume absolu qu'en proportion.

De nos jours, plus de 76 % de l'énergie consommée dans le monde provient de combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz. Ces ressources, formées sur plusieurs millions d'années, sont limitées, non renouvelables et vouées à s'épuiser un jour. Leur extraction et utilisation sont également à l'origine d'importantes émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi au réchauffement climatique et à un niveau de pollution préoccupant. Ces externalités négatives accentuent les défis auxquels le monde est confronté dans le cadre du développement durable : d'une part, la raréfaction des matières premières fossiles et, d'autre part, leur impact sur l'environnement.

Face à cet enjeu mondial, les gouvernements signataires du Protocole de Kyoto s'efforcent d'intensifier leurs initiatives pour encourager les énergies renouvelables. Ces sources d'énergie alternatives, propres et inépuisables, représentent un potentiel énorme à exploiter. En conséquence, ces dernières années ont vu une croissance significative des projets liés aux énergies renouvelables. À l'avenir, les systèmes énergétiques durables devront atteindre un équilibre entre une gestion rationnelle des ressources traditionnelles et une augmentation substantielle de l'utilisation des énergies vertes. Dans cette optique, de nombreux projets de recherche se développent dans le cadre du développement durable pour répondre à la demande croissante tout en minimisant les effets négatifs des combustibles fossiles sur l'environnement. [1].

Les principales sources d'énergie renouvelable incluent l'énergie solaire (dérivée du rayonnement solaire), l'énergie éolienne, l'énergie hydroéolienne (exploitant les courants marins), la biomasse, la géothermie et l'énergie hydraulique. Par exemple, le rayonnement solaire peut être converti en électricité directement grâce aux systèmes photovoltaïques ou utilisé dans les systèmes de concentration solaire pour produire de la vapeur nécessaire au fonctionnement des turbines électriques et au chauffage. Parmi ces sources, l'énergie

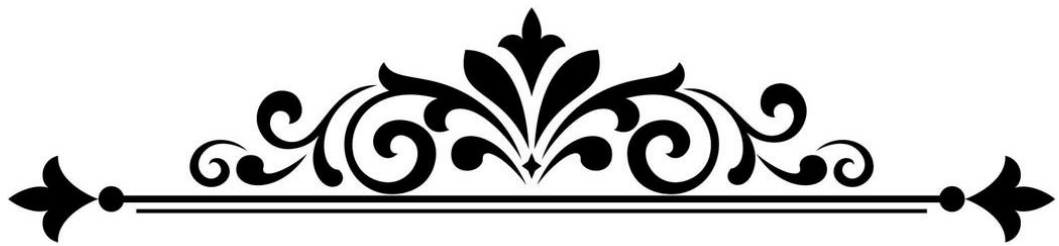
Introduction générale

solaire et éolienne sont remarquablement bien réparties à travers la planète et deviennent de plus en plus exploitées.

La conversion d'énergie solaire via l'effet photovoltaïque est couramment utilisée pour alimenter aussi bien des appareils domestiques que des équipements industriels. Ce procédé est largement répandu dans des projets variés : petites installations autonomes à faible consommation énergétique ou encore grandes centrales solaires pour alimenter des zones reculées ou interconnectées au réseau électrique existant. Les avancées technologiques dans ce domaine laissent entrevoir une diminution continue des coûts associés aux équipements solaires. Par exemple, le coût unitaire des panneaux photovoltaïques est passé d'environ 30 k/W il y a trois décennies à 3 k/W aujourd'hui. Toutefois, le coût total des systèmes reste élevé autour de 6 k/W, rendant parfois complexe leur compétitivité face aux sources d'énergie classiques. Malgré cela, les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau électrique commencent à devenir économiquement viables, notamment sous forme d'installations intégrées aux toits ou aux façades des bâtiments [1].

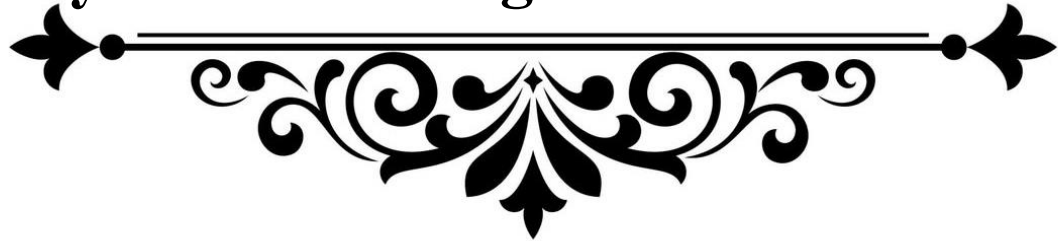
De son côté, le secteur éolien a également réalisé des progrès remarquables en matière de technologie et de coûts. Cette évolution a permis une rentabilité accrue des éoliennes installées dans des emplacements stratégiques bénéficiant d'un bon potentiel éolien. La rentabilité dépend directement des conditions spécifiques au site sélectionné, en particulier du régime des vents local. Selon le Département américain de l'Énergie (DOE), pour un site offrant une vitesse moyenne annuelle du vent comprise entre 5,8 et 6,7 m/s mesurée à une hauteur de 10 mètres (classes 4 et 6), le coût moyen de production énergétique d'un parc éolien peut être optimisé.

Les avancées technologiques dans les secteurs solaire et éolien témoignent d'un potentiel prometteur pour une transition énergétique vers un avenir plus propre et durable. Cependant, pour atteindre cet objectif, il est crucial que les efforts se poursuivent afin d'améliorer encore les rendements [2].



Chapitre I

Introduction générale aux systèmes hybrides d'énergies renouvelables



I .1. Introduction

La scène énergétique mondiale connaît aujourd'hui une transformation radicale, marquée par une transition irréversible vers la dérégulation des marchés et une prise de conscience environnementale croissante . [4,5] Face aux défis du changement climatique et aux impératifs du développement durable, les décideurs et les producteurs d'électricité se tournent massivement vers les énergies renouvelables (solaire, éolien, biomasse) comme alternatives de haute efficacité énergétique [6].

Cette évolution a favorisé l'émergence d'un nouveau paradigme : la Génération d'Énergie Dispersée (GED). L'intégration de ces sources de petite et grande taille dans les réseaux électriques de basse et moyenne tension est devenue un facteur clé pour répondre à la demande croissante de manière décentralisée.

Toutefois, l'insertion massive de ces énergies intermittentes présente un caractère ambivalent. Si elle renforce les capacités de production et réduit l'empreinte carbone, elle peut également fragiliser la stabilité du réseau, notamment lors de situations critiques ou de variations climatiques brusques.

C'est dans ce contexte que les systèmes hybrides d'énergies renouvelables apparaissent comme la solution la plus viable . [7,8] En combinant plusieurs sources d'énergie ou en associant des méthodes de contrôle avancées (classiques et intelligence artificielle), ces systèmes permettent de garantir une production électrique fiable, continue et durable. Ils pallient l'intermittence des sources isolées et assurent une gestion optimale de l'énergie, répondant ainsi aux exigences techniques et économiques de l'exploitation des réseaux modernes.

Dans ce chapitre, nous dresserons un panorama des différentes énergies renouvelables, nous définirons les concepts de production décentralisée et nous analyserons les impacts de l'insertion de ces sources hybrides sur la stabilité et la performance du réseau électrique .

I .2. Aperçu des énergies renouvelables et des systèmes hybrides

Les énergies renouvelables proviennent de sources qui se régénèrent naturellement, mais dont le débit est limité par unité de temps malgré leur caractère inépuisable. Pour pallier cette limitation et garantir une production stable, l'intégration de systèmes hybrides devient essentielle. En combinant plusieurs sources—telles que le solaire, l'éolien, l'hydraulique, la biomasse ou la géothermie—ces systèmes permettent de compenser l'intermittence de chaque ressource. [9,

10] L'association de ces technologies, souvent couplée à des solutions de stockage, assure ainsi une gestion optimisée et une continuité d'approvisionnement énergétique fiable [3].

I .3. Définition des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des flux d'énergie issus de sources naturelles qui se régénèrent plus rapidement qu'ils ne sont consommés. Contrairement aux combustibles fossiles, leur exploitation est devenue une priorité suite à la dérégulation du marché de l'électricité, offrant une solution propre, inépuisable et économiquement rentable une fois les installations amorties. Pour garantir une efficacité maximale, ce mix énergétique s'appuie sur trois piliers complémentaires :

- L'Énergie Solaire : Captée via des panneaux photovoltaïques, sa caractéristique majeure est sa disponibilité universelle. Bien qu'elle soit intermittente (dépendante du cycle jour/nuit), elle constitue une source d'énergie propre et prévisible durant la journée [11,12].

- L'Énergie Éolienne : Produite par la force du vent, elle se distingue par une grande capacité de production. [13] Elle est souvent complémentaire au solaire, car le vent peut souffler de manière intensive la nuit ou durant les périodes de faible ensoleillement.

- Le Stockage par Batteries : C'est le cœur du système hybride. Sa fonction principale est de stabiliser le réseau en stockant l'énergie excédentaire produite par le soleil et le vent pour la restituer en cas de besoin (nuit ou calme plat). Sa caractéristique essentielle est la flexibilité, permettant d'assurer une continuité d'alimentation sans interruption [4] [14].

I .4. Système photovoltaïque

Les systèmes solaires photovoltaïques utilisent des cellules pour convertir la lumière du soleil en électricité. La cellule PV (Photovoltaïque) est constituée d'une ou deux couches d'un matériau semi-conducteur, généralement du silicium.



Fig. I.1 : Panneaux Solaires Photovoltaïques. [1]

Lorsque la lumière éclaire la cellule, elle crée un champ électrique à travers les couches, ce qui entraîne un flux d'électricité. Plus l'intensité de la lumière est élevée, plus le flux d'électricité est important. Les cellules photovoltaïques sont désignées en fonction de la puissance crête qu'elles génèrent dans les conditions d'ensoleillement et de température idéales ; on parle de kilowatt crête (kWc) [1] [15].

I .5. Structure et Optimisation du Système

Les cellules PV sont câblées ensemble pour former un module PV, qui recueille l'énergie solaire et la convertit en courant électrique continu. Ces modules sont reliés entre eux pour former un système de panneaux solaires PV, généralement lié à un onduleur. Le principal objectif de l'onduleur solaire est de convertir le courant continu en courant alternatif pour qu'il puisse être utilisé dans un système d'alimentation autonome ou par le réseau public de distribution. Un algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking) est implémenté dans l'onduleur pour ajuster de manière continue le point de fonctionnement électrique des modules afin d'extraire la puissance maximale disponible [1].



Fig. I.2 : Schéma d'une chaîne de conversion d'énergie solaire PV. [1]

I .6. Avantages de la Technologie Photovoltaïque

Cette technologie présente des atouts majeurs :

- Haute fiabilité : Elle ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées et explique son utilisation sur les engins spatiaux.
- Modularité : Le caractère modulaire des panneaux permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.
- Économie : Les coûts de fonctionnement sont très faibles grâce à un entretien réduit ; elle ne nécessite ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Écologie : Le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu naturel [3].

I .7. Système éolien

Le générateur éolien, davantage désigné comme « éolienne », opère selon un concept simple calqué sur les moulins à vent anciens. Ce dispositif comporte habituellement trois pales soutenues par un moyeu formant le rotor, le tout étant positionné au sommet d'un poteau vertical.



Fig. I.3 : Éolienne à Axe Horizontal. [1]



Fig. I.4 : Éolienne à Axe Vertical. [1]

Cette armature est attachée à une nacelle qui renferme un générateur. Un moteur électrique sert à positionner le rotor afin qu'il soit constamment face au vent. Les pales convertissent l'énergie cinétique du vent (énergie liée au déplacement) en énergie mécanique (rotation des pales) . [16,17] Les spécificités techniques de rotation sont les suivantes :

- Le vent fait mouvoir les pales entre 10 et 25 tours par minute. Le rythme de rotation dépend de leurs dimensions : plus elles sont vastes, plus elles évoluent lentement.
- La majorité des générateurs requièrent une fréquence élevée, entre 1 000 et 2 000 tours par minute, pour produire l'électricité.
- Pour atteindre ce rythme, l'énergie mécanique transite par un boîtier multiplicateur. Sa fonction est d'accélérer la course de l'axe lent (relié aux pales) vers l'axe rapide (connecté à la génératrice).
- L'électricité créée possède une tension d'environ 690 volts. Elle est traitée par un transformateur qui élève sa tension à 20 000 volts, puis acheminée dans le réseau électrique pour être distribuée aux usagers [5].

I .8. Système de stockage par batteries Principe de fonctionnement

Les batteries d'accumulateurs sont la solution la plus utilisée pour un stockage électrochimique de faibles dimensions . Proposant des technologies matures et à des prix raisonnables, elles réalisent une réaction d'oxydoréduction selon le principe de la pile pour emmagasiner à la charge de l'énergie électrique, qui peut être restituée à la décharge avec un bon rendement, autour de 85 % selon les types d'accumulateurs. Elles consistent en deux

électrodes, l'anode et la cathode, plongées chacune dans une solution ionique, comme représentées à la figure I.5.

Sous l'effet d'un courant de charge, une oxydation se produit au niveau des molécules de la cathode, qui perdent alors des électrons. Ceux-ci sont envoyés dans le circuit électrique, créant ainsi le courant en question. À l'anode, les électrons arrivent ensuite pour générer une réduction sur les molécules qui la composent. Les ions qui résultent de ces deux demi-équations se retrouvent ainsi dans les solutions ioniques respectives des électrodes.

Celles-ci sont séparées par un électrolyte, une solution ionique non réactive. Selon les besoins, ses ions positifs et négatifs migrent respectivement vers la solution de l'anode et de la cathode, permettant de rendre les deux solutions électriquement neutres. À la décharge, les réactions d'oxydation et de réduction inverses se produisent sous l'effet du courant inverse qui fait cette fois migrer les électrons de l'anode à la cathode. Les concentrations d'ions diminuent dans les solutions au fur et à mesure que les électrodes se reconstruisent, et l'électrolyte se reconstitue en conséquence. Plusieurs technologies ont au cours du dernier siècle été développées selon ce principe [3] [18].

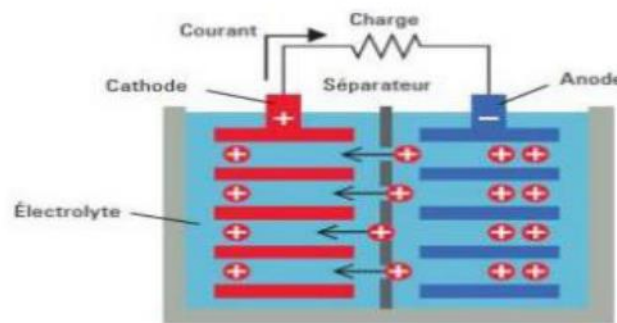


Fig. I.5: Schéma fonctionnel de la batterie. [3]

I .9. Importance des systèmes hybrides

Les systèmes hybrides combinent plusieurs sources d'énergie afin d'assurer une production énergétique plus fiable, efficace et adaptée aux besoins. Dans le domaine des énergies renouvelables, ces systèmes associent généralement l'énergie solaire photovoltaïque avec d'autres sources comme l'énergie éolienne, les générateurs diesel ou les systèmes de stockage par batteries. Cette combinaison permet de compenser les limites de chaque source d'énergie prise individuellement et d'améliorer la continuité de l'alimentation énergétique.

L'un des principaux avantages des systèmes hybrides est l'augmentation de la fiabilité du système énergétique. Par exemple, dans un système solaire seul, la production d'électricité dépend directement du rayonnement solaire. Cependant, lorsque l'ensoleillement est insuffisant (la nuit ou par temps nuageux), la production diminue fortement. L'intégration d'autres sources d'énergie ou de dispositifs de stockage permet alors de garantir une alimentation électrique continue.

Les systèmes hybrides permettent également d'optimiser l'utilisation des ressources énergétiques renouvelables. En combinant différentes sources d'énergie, il est possible d'exploiter les conditions naturelles disponibles à différents moments, ce qui améliore l'efficacité globale du système et réduit les pertes d'énergie. De plus, ces systèmes contribuent à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et à diminuer les émissions de gaz à effet de serre, favorisant ainsi la protection de l'environnement.

Dans les applications rurales ou isolées, comme les systèmes de pompage solaire pour l'irrigation, les systèmes hybrides offrent une solution particulièrement adaptée. Ils assurent une alimentation énergétique stable pour les équipements tout en réduisant les coûts d'exploitation à long terme. Par conséquent, les systèmes hybrides représentent une solution stratégique pour le développement durable et l'intégration efficace des énergies renouvelables dans les systèmes énergétiques modernes [4] [19, 20].

I .10. Enjeux de la gestion énergétique et de la qualité de l'énergie

Dans les systèmes énergétiques modernes, en particulier ceux basés sur les énergies renouvelables, la gestion énergétique et la qualité de l'énergie représentent des enjeux majeurs pour assurer un fonctionnement fiable et efficace. La gestion énergétique consiste à organiser et à contrôler la production, le stockage et la distribution de l'énergie afin d'optimiser l'utilisation des ressources disponibles tout en réduisant les pertes énergétiques et les coûts d'exploitation.

Dans les systèmes photovoltaïques ou hybrides, la production d'électricité dépend fortement des conditions climatiques, notamment du rayonnement solaire. Cette variabilité peut entraîner des déséquilibres entre la production et la consommation d'énergie. Ainsi, une gestion énergétique efficace permet de coordonner les différentes sources d'énergie, les systèmes de stockage (comme les batteries) et les charges afin de garantir la continuité de l'alimentation électrique [21,22].

La qualité de l'énergie électrique constitue également un aspect essentiel. Elle se réfère aux caractéristiques de l'électricité fournie aux équipements, telles que la stabilité de la tension,

La fréquence, l'absence d'harmoniques et la continuité de service. Dans les systèmes utilisant des sources renouvelables, des perturbations peuvent apparaître en raison des fluctuations de production, ce qui peut provoquer des chutes de tension, des distorsions harmoniques ou des interruptions d'alimentation . [23] Par conséquent, l'intégration de dispositifs de contrôle, de convertisseurs électroniques de puissance et de systèmes de supervision permet d'améliorer la gestion énergétique et de maintenir une bonne qualité de l'énergie[4].

I .11. Problématique de la gestion énergétique

- Variabilité de la production : fluctuations selon le soleil ou le vent.
- Optimisation du stockage : une mauvaise gestion des batteries réduit leur durée de vie.
- Coordination des sources hybrides : nécessité de stratégies de contrôle pour un usage optimal.
- Aspects économiques et environnementaux : réduire les coûts et l'impact écologique tout en maximisant l'efficacité.

I .12. Qualité de l'énergie électrique

- Stabilité de la tension et de la fréquence.
- Réduction des harmoniques (THD) et perturbations.
- Continuité de l'alimentation malgré les variations de production.
- Dispositifs de contrôle et convertisseurs pour maintenir une alimentation stable et fiable.

Une bonne gestion énergétique et une qualité de l'énergie élevée assurent la fiabilité du système et prolongent la durée de vie des équipements.

I .13. Objectifs de la recherche

Ce travail de recherche s'inscrit dans la continuité des défis actuels liés à la transition énergétique et au développement des réseaux électriques intelligents (Smart Grids). L'objectif principal de cette étude est de concevoir, d'analyser et d'optimiser le contrôle

d'un système de production d'énergie hybride autonome et performant. De manière plus spécifique, nos objectifs se déclinent en quatre axes majeurs :

1. Étude et modélisation d'un système hybride (Photovoltaïque–Éolien avec stockage) : Il s'agit dans un premier temps de développer les modèles dynamiques de chaque sous-système (générateur photovoltaïque, système de conversion éolien, et parc de batteries). Cette étape est indispensable pour simuler le comportement global de l'installation et comprendre les interactions complexes entre les différentes sources d'énergie et l'électronique de puissance associée.

2. Mise en place d'une stratégie de gestion énergétique (EMS) : L'enjeu central est d'élaborer et d'implémenter des algorithmes de contrôle robustes capables de superviser les flux de puissance en temps réel. Cette stratégie doit garantir un équilibre permanent entre la production intermittente des sources renouvelables, le niveau de

charge (SOC) des batteries, et la demande énergétique de la charge, tout en assurant la continuité de service.

3. Amélioration de la qualité de l'énergie électrique : L'intégration massive de convertisseurs statiques et la nature fluctuante du soleil et du vent engendrent inévitablement des perturbations réseau. La recherche visera à proposer des solutions de contrôle pour atténuer ces dégradations, notamment en régulant les variations de tension, en minimisant la pollution harmonique (réduction du THD), et en compensant les éventuels déséquilibres de puissance.

4. Optimisation des performances globales du système : En combinant la gestion intelligente des flux et l'amélioration du signal électrique, l'objectif ultime est de maximiser le rendement énergétique global. Il s'agira également d'optimiser l'utilisation du système de stockage pour prolonger la durée de vie des batteries et assurer la fiabilité et la rentabilité du système hybride à long terme.

Chapitre II

Modélisation du système
(PV – Éolienne – Batterie – VSC)

II.1 introduction

L'évolution vers des réseaux électriques intelligents et durables repose essentiellement sur l'exploitation efficace des énergies renouvelables. Parmi les solutions les plus performantes, les systèmes hybrides occupent une place prépondérante, car ils permettent de combiner les avantages de différentes sources pour compenser leur intermittence naturelle. L'association de l'énergie solaire photovoltaïque (PV) et de l'énergie éolienne, soutenue par un système de stockage par batteries, constitue une architecture robuste capable de répondre aux exigences de disponibilité et de fiabilité énergétique [24].

Ce travail s'articule autour de la modélisation mathématique approfondie de cette chaîne de conversion complexe. La démarche consiste d'abord à caractériser les générateurs (PV et éolien) afin de traduire leurs comportements physiques en équations exploitables. Ensuite, une attention particulière est portée à la modélisation du stockage électrochimique, élément clé pour le lissage des puissances injectées. Enfin, nous intégrons le convertisseur de source de tension (VSC : Voltage Source Converter) qui agit comme l'organe de commande et d'interface principal. [24,26] Cette modélisation globale est une nécessité théorique pour analyser les interactions entre les sous-systèmes et préparer la conception de stratégies de contrôle-commande avancées.[11].

II.2 Modélisation du PV

La modélisation des cellules photovoltaïques repose sur le choix approprié de circuits électriques équivalents. Pour élaborer un modèle précis, il est essentiel de bien comprendre la configuration physique des composants de la cellule ainsi que les caractéristiques électriques associées.

Plusieurs modèles mathématiques ont été développés pour représenter le comportement fortement non linéaire des jonctions semi-conductrices, qui constituent la base des cellules photovoltaïques. Ces modèles diffèrent par leurs méthodes mathématiques et par le nombre de paramètres utilisés pour calculer la tension et le courant générés par la cellule.

Deux modèles principaux sont couramment utilisés pour les générateurs photovoltaïques (GPV) :

- Le modèle à une diode (ou exponentielle simple),
- Le modèle à deux diodes (ou double exponentielle).

Ces deux modèles s'appuient sur l'équation de diode bien connue de Shockley, qui décrit la relation courant-tension des jonctions semi-conductrices. Le choix entre ces modèles dépend du compromis recherché entre complexité, précision et facilité de calcul [6] [26].

II.2.1 Modèle à une diode (1LM5P) :

Le fonctionnement d'un module photovoltaïque est souvent décrit par le modèle « standard » à une diode, initialement établi par Shockley pour une seule cellule PV. Ce modèle est ensuite généralisé à un module entier en le considérant comme un ensemble de cellules identiques connectées en série et en parallèle.

Comparé au modèle à deux diodes, le modèle à une diode contient une exponentielle de moins dans l'équation caractéristique courant-tension. Cette simplification réduit la complexité tout en restant suffisamment précis pour de nombreuses applications [6].

La cellule photovoltaïque est représentée par un circuit électrique équivalent (Fig. II.1) comprenant :

- Une source de courant représentant le flux lumineux (photocourant),
- Deux résistances modélisant les pertes : une résistance série (R_s) et une résistance shunt (R_{sh}).

Ce modèle fait intervenir cinq paramètres inconnus importants, à savoir :

- n : le facteur d'idéalité de la diode,
- I_{ph} : le courant généré par la lumière (photocourant),
- R_s : la résistance série,
- R_{sh} : la résistance shunt,
- I_s : le courant de saturation de la diode.

Ce modèle est désigné sous le nom de 1LM5P (Lumped 1 Mechanism model with 5 Parameters). L'équation caractéristique est déduite directement à partir de la loi de Kirchhoff :

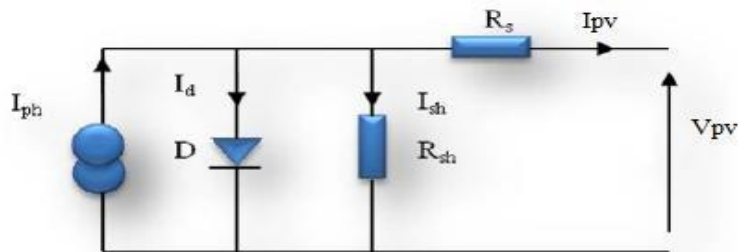


Fig. II.1 : Schéma équivalent du modèle à une seule diode. [6]

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

Avec :

$$I_{pH} = I_{cc} \left(\frac{\Psi}{1000} \right) \quad (\text{II.2})$$

: Photo-courant de cellule :

Le courant de jonction I_d (courant traversant la diode) est donné par :

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_S I_{pv})}{nKT}} - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

Le courant dérivé par la résistance shunt, est :

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{R_{sh}} \quad (\text{II.4})$$

A partir de ces différentes équations, on peut en tirer l'expression implicite de courant délivré par une cellule photovoltaïque ainsi que sa caractéristique courant- tension.

$$I_{pv} = I_{cc} \left(\frac{\psi}{1000} \right) - I_0 \left(e^{\frac{q(V+R_S I_{pv})}{nKT}} - 1 \right) - \frac{V_{pv} + R_S I_{pv}}{R_{sh}} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

I_{pv} : Courant de cellule [A] ;

V_{pv} : Tension de cellule [Volt] ;

T : Température de la jonction en [°K] ;

q : La constante de charge d'électron : $1.602 \cdot 10^{-19} \text{C}$;

I_0 : Courant de saturation inverse de la diode en [A] ;

K : la constante de Boltzmann : $1.38 \cdot 10^{-23} \text{J/K}$;

n : Facteur d'idéalité de la photopile, compris entre 1 et 5 dans la pratique ;

I_{sh} : Le courant dans la résistance de shunt.

II.2.2 Modèle à deux diodes (2LM7P) :

Le modèle à deux diodes, également appelé 2LM7P (Lumped 2 Mechanism model with 7 Parameters), est une modélisation avancée du fonctionnement d'une cellule solaire (Fig. II.2). Ce modèle comprend : [6] [27].

- Deux diodes connectées en parallèle, chacune caractérisée par un courant de saturation (I_{s1} , I_{s2}) et un facteur d'idéalité ($n1$, $n2$),
- Une source de courant produisant un photocourant (I_{ph}), dépendant de l'éclairement solaire,
- Une résistance série (R_s),
- Une résistance parallèle (shunt) R_{sh} .

La résistance série R_s modélise les pertes résistives dues à la résistivité du matériau semi-conducteur, des électrodes et des contacts métal/semi-conducteur. Pour minimiser son impact sur le courant, R_s doit être aussi faible que possible. La résistance shunt R_{sh} représente les courants de fuite à travers l'émetteur causés par des défauts structuraux ; une valeur élevée de R_{sh} est souhaitable pour limiter ces pertes.

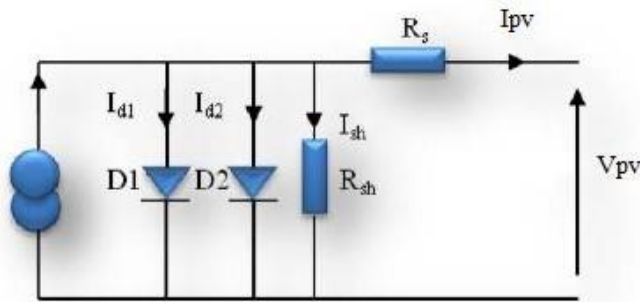


Fig. II.2 : Schéma équivalent du modèle à deux exponentielles (2LM7P). [6]

L'équation caractéristique est déduite d'une manière directe à partir de la loi de Kirchhoff :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (II.6)$$

Avec:

I_{d1} : Courant dans la diode 1

I_{d2} : Courant dans la diode 2

I_{pv} : Courant photonique

Les caractéristiques courant-tension des deux diodes sont :

$$I_{d1} = I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_d}{n_1 \cdot V_t} \right) - 1 \right) \quad (II.7)$$

$$I_{d2} = I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V_d}{n_2 \cdot V_t} \right) - 1 \right) \quad (II.8)$$

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

Avec :

$$V_t = \frac{KT_c}{q} : \text{Représentant la potentielle thermodynamique}$$

Le courant électrique produit par la cellule est alors donné par l'expression suivante :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{s1} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t \cdot n_1} \right) - 1 \right) - I_{s2} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{V_t \cdot n_2} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \right) \quad (\text{II.10})$$

Le courant photonique est lié à l'éclairement, à la température et au courant photonique mesuré aux conditions de référence :

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{ref}} \left(I_{ph(ref)} - \mu_{cc} (T_c - T_{c(ref)}) \right) \quad (\text{II.11})$$

Avec

$I_{ph(ref)}$: Courant photonique en conditions de référence [A]

μ_{cc} :: Coefficient de sensibilité de l'intensité à la température [A/K]

G, G_{ref} : Éclairement réel et de référence [W/mZ]

$T_c, T_{c(ref)}$: Température de la cellule, réelle et de référence

$$I_{s1} = C_{s1} \cdot T_c^3 \cdot \exp \left(\frac{-E_{gap} \cdot q}{n_1 \cdot T \cdot k} \right) \quad (\text{II.12})$$

$$I_{s2} = C_{s2} \cdot T_c^{3/2} \cdot \exp \left(\frac{-E_{gap} \cdot q}{n_2 \cdot T \cdot k} \right) \quad (\text{II.13})$$

Les constantes C_{s1} et C_{s2} sont généralement comprises respectivement entre (150 – 180) $A \cdot K^{-3}$ et $1,3 - 1,7 \times 10^{-2} A \cdot K^{-5/2}$ pour un module de 100 cm^2 .

Le facteur d'idéalité n indique le mécanisme de recombinaison prédominant :

- $n = 1$: zone de charge d'espace dépeuplée (cas idéal),
- $1 < n < 2$: niveau piège peu profond dans la zone de charge d'espace,
- $n = 2$: centres de recombinaison distribués uniformément sur un seul niveau au milieu de la bande interdite,
- $2 < n < 4$: distribution non uniforme des centres de recombinaison.

E_{gap} : Énergie de gap (Silicium cristallin = 1,12 eV ; Silicium amorphe = 1,7 eV ;

CIS = 1,03 eV ; CdTe = 1,5 eV)

II.3 Modélisation de l'éolienne

L'éolienne est un système tridimensionnel complexe, constitué d'une voilure aux formes variées, en mouvement continu et immergée dans un flux d'air dynamique. Un point crucial dans sa modélisation est que le modèle doit refléter la dynamique mécanique réelle de la voilure, et non se limiter à une simple description quasi-statique.

La voilure d'une éolienne convertit l'énergie cinétique de la masse d'air en mouvement en puissance mécanique, caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique exercé sur l'arbre. La puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime (théorème de Betz) : [7] [28,29].

$$P_m = \frac{P_m}{P_v} \cdot P_v = C_p(\lambda) \cdot P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \cdot \rho \pi R^2 V_v^3 \quad (\text{II.14})$$

La puissance extraite par l'éolienne est :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot V_w^3 \quad (\text{II.15})$$

Avec :

C_p : Coefficient de puissance, fonction de la vitesse spécifique λ

λ : Vitesse spécifique : rapport entre la vitesse linéaire de l'extrémité d'une pale et la vitesse du vent ($\lambda = \omega \times R / V_w$)

ρ : Densité de l'air [kg/m³]

S : Surface balayée par les pales [m²]

Ω : Vitesse mécanique angulaire du rotor [rad/s]

V_w : Vitesse du vent [m/s]

R : Rayon d'une pale [m]

Plusieurs approximations numériques du coefficient C_p ont été développées dans la littérature. Les principales sont :

1. Première expression:

$$C_p = \frac{1}{2}(\gamma - 0,022\beta^2 - 5,6)e^{-0,17\gamma} \quad (\text{II.16})$$

Où : γ = est le rapport de vitesse périphérique.

Et β représente l'angle d'attaque de la pale en degré

2. Deuxième expression:

$$C_p = 0,73 \left(\frac{151}{\lambda'} - 0,58.\beta - 0,002.\beta^{2,14} - 13,2 \right) e^{-\frac{18,5}{\lambda'}} \quad \text{h} \quad (\text{II.17})$$

1. 3. Troisième expression (bibliothèque Simulink) :

$$C_p = 0,5176 \left(\frac{116}{\lambda'} - 0,4.\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda'}} + 0,0068.\lambda \quad (\text{II.18})$$

$$\text{Avec } \frac{1}{\lambda'} = \frac{1}{\lambda + 0,08\beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1}. \quad (\text{II.19})$$

La troisième expression est celle de la bibliothèque Simulink et sera utilisée pour valider le modèle éolien. [40] La figure II.3 présente les courbes C_p pour différents angles d'attaque β . Pour des raisons économiques, l'étude se concentre sur la courbe $\beta = 0$.

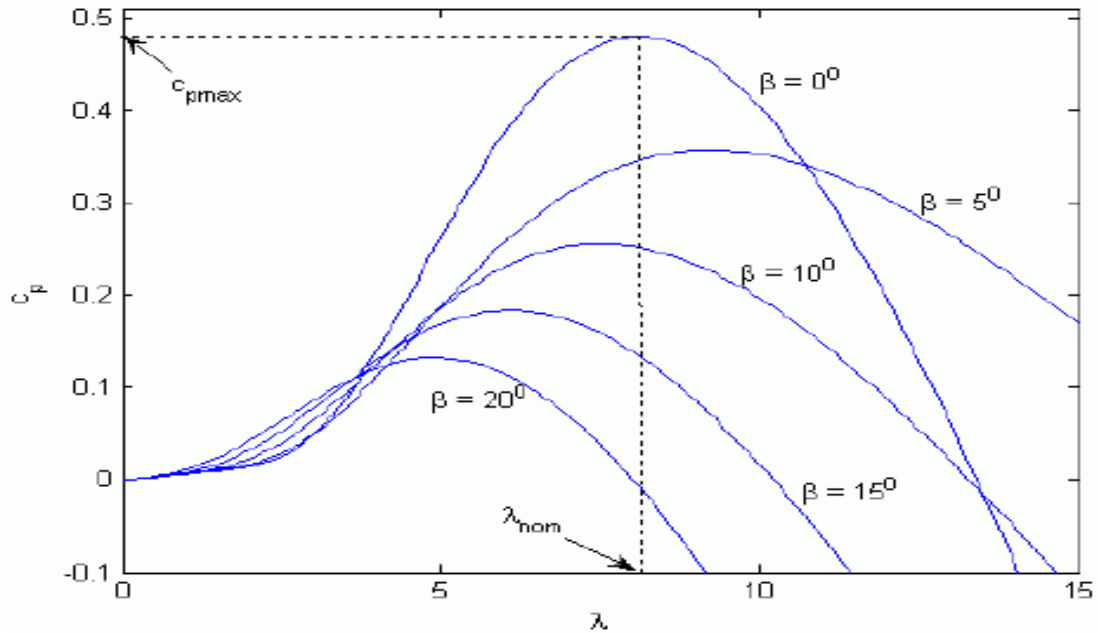


Fig. II.3 : Courbe C_p du modèle Simulink pour différents angles β . [7]

Le couple correspondant est :

$$C_{eol} = \frac{P_{eol}}{\Omega} = \frac{1}{2} \cdot \frac{C_P(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot V_W^3}{\Omega} \quad (\text{II.20})$$

Le modèle dynamique tenant compte de l'inertie J et du frottement visqueux f de l'éolienne est :

$$C_{eol} = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega + C_{mec} \quad (II.21)$$

$$\Omega = \frac{1}{(f+pJ)} (C_{eol} - C_{mec}) \quad (II.22)$$

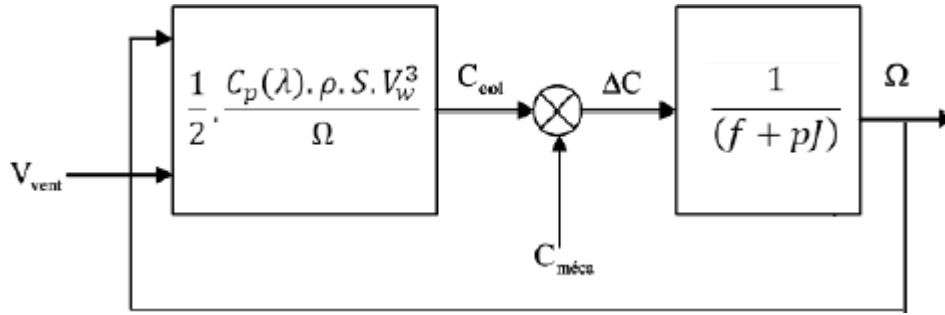


Fig. II.4 : Schéma fonctionnel du modèle dynamique de l'éolienne. [7]

II.4 Modélisation de la batterie :

La cellule électrochimique peut être modélisée comme une impédance électrique lorsqu'elle est soumise à une excitation donnée. Son fonctionnement est représenté par un circuit électrique

équivalent composé de sources de tension, de résistances, de capacités et éventuellement d'inductances, reproduisant fidèlement le comportement électrique réel de la cellule [8][18].

Les modèles mathématiques généraux des batteries en décharge et en charge sont :

$$:f_d(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + f(s) \quad (II.23)$$

$$f_c(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it+0.1.Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + f \quad (II.24)$$

Avec

f_d : Équation de décharge

f_c : Équation de charge

$f(s)$: Équation caractéristique pour chaque type de batterie

II.4.1 Batterie Nickel-Cadmium (NiCd) et Nickel-Hydrure Métallique (NiMH)

model de décharge ($i^* > 0$):

$$f_a(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right) \quad (II.24)$$

$$f_{ch}(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{|it|+0.1Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Ssl(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (II.25)$$

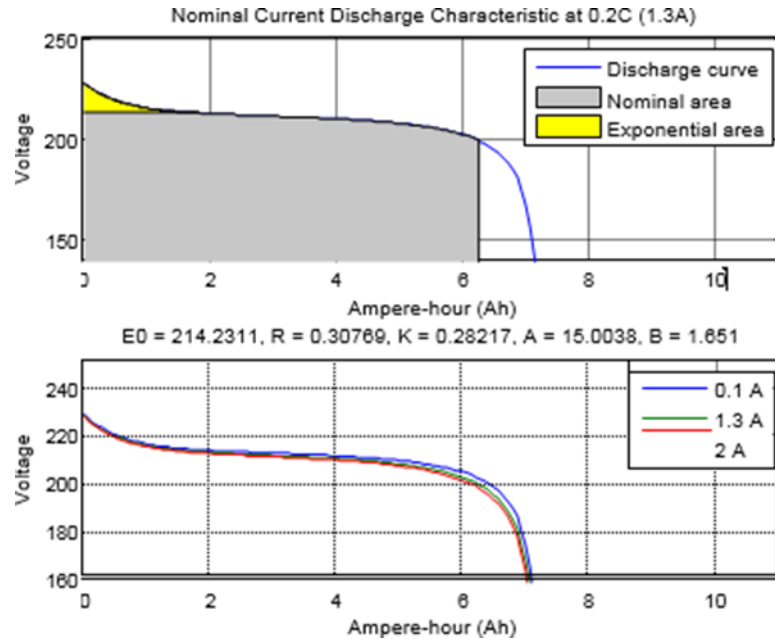


Fig II.5 Caractéristique de décharge du courant nominal de batterie Nickel-Cadmium.

[8]

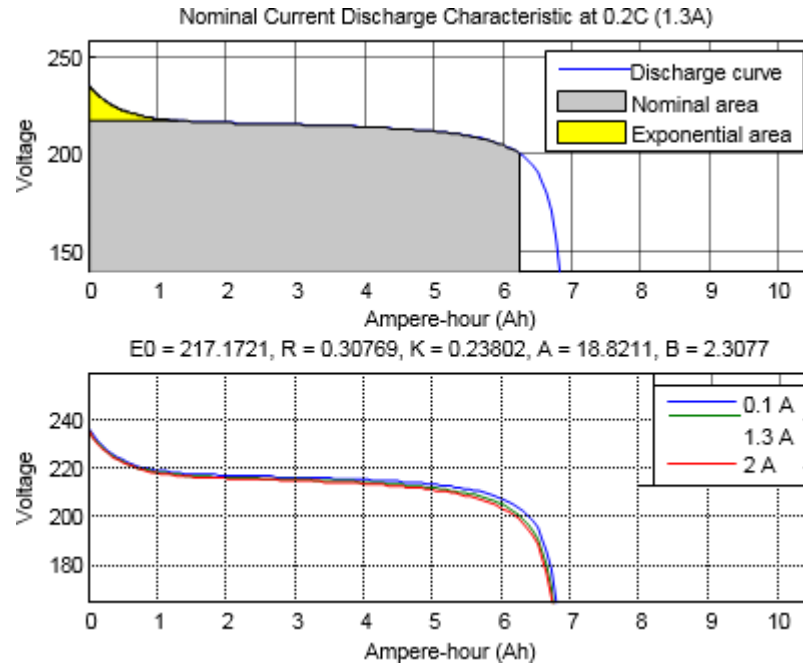


Fig II.6 Caractéristique de décharge pour batterie Ni-MH. [8]

b) Batterie Lithium-Ion (Li-Ion)

- Model de décharge ($i^* > 0$)

$$f_d(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (II.26)$$

- Model de charge ($i^* < 0$)

$$f_{ch}(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it+0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + A \cdot \exp(-B \cdot it) \quad (II.27)$$

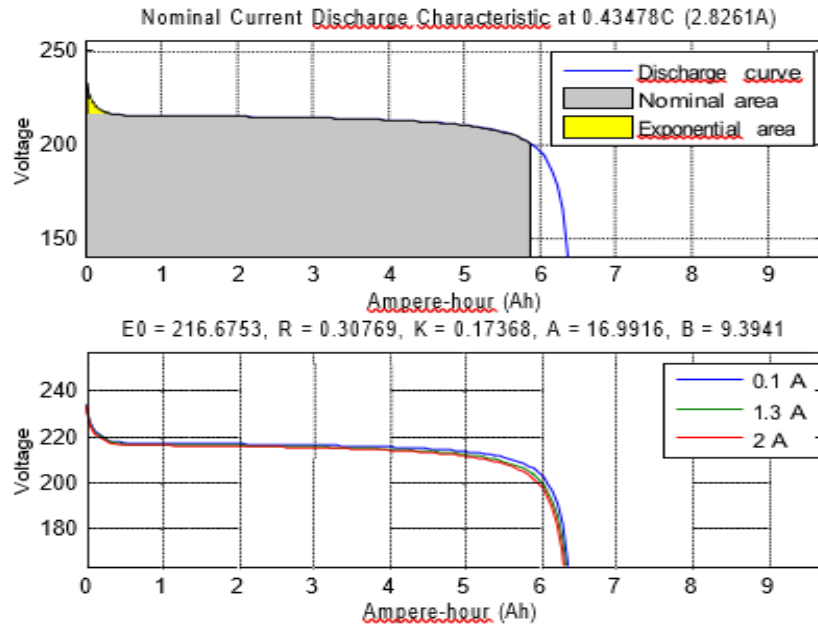


Fig II.7 Caractéristique de décharge au courant nominal – Batterie Li-Ion. [8]

c) Batterie acide-Plomb

- Model de décharge ($i^* > 0$) :

$$f_d(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot 0 \right) \quad (II.28)$$

- Model de charge ($i^* < 0$):

$$f_{ch}(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it+0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Ssl(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (II.29)$$

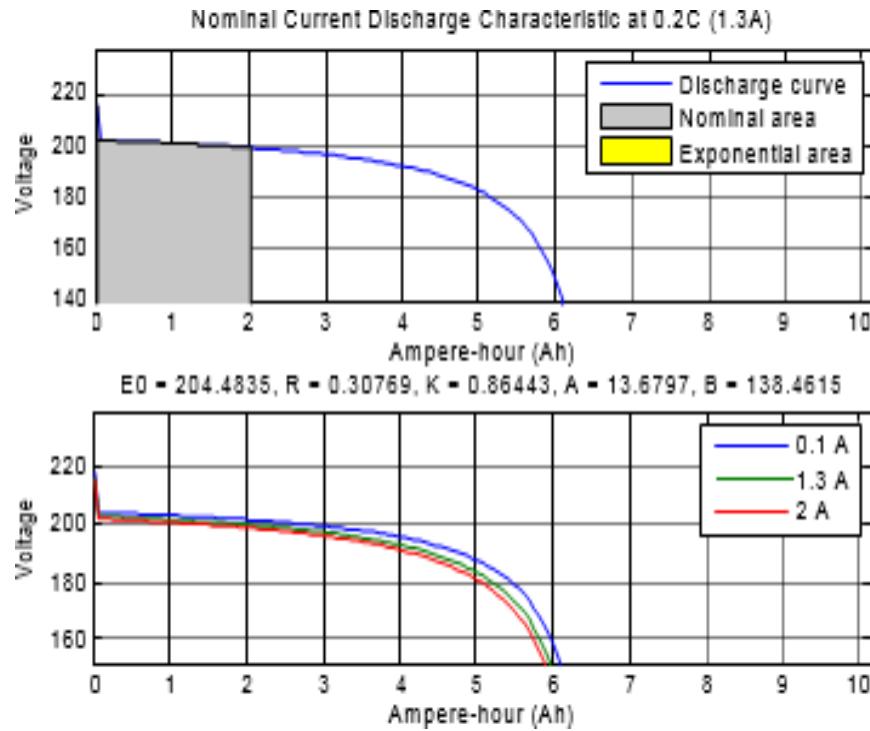


Fig II.8 Caractéristique de décharge au courant nominal – Batterie Acide-Plomb. [8]

Avec :

E_{batt} : Tension non linéaire de la batterie [V]

E₀ : Constante de tension de la batterie [V]

Exp(s) : Zone exponentielle dynamique [V]

Sel(s) : Mode de la batterie : Sel(s) = 0 → décharge ; Sel(s) = 1 → charge

K : Constante de polarisation [fi]

i* : Courant à basse fréquence [A]

i : Courant de batterie [A]

it : Capacité extraite [Ah]

Q : Capacité maximale de la batterie [Ah]

A : Tension exponentielle [V]

B : Capacité exponentielle [Ah⁻¹]

II.5 Modélisation du VSC

Un lien VSC (Voltage Source Converter) est essentiellement composé de deux convertisseurs à source de tension interconnectés par une ligne à courant continu (DC). L'un des convertisseurs fonctionne en mode redresseur pour injecter la puissance active dans le système DC, tandis que l'autre agit en onduleur pour absorber cette puissance et l'injecter dans le réseau alternatif (AC). Ces rôles peuvent s'inverser selon la direction du flux de courant.

Une caractéristique fondamentale des terminaux VSC est la polarité fixe de la tension DC. Ainsi, le flux de puissance est uniquement déterminé par le sens du courant continu. La figure II.9(a) présente le diagramme simplifié du convertisseur VSC à deux niveaux, et la figure II.9(b) illustre les formes d'onde de tension et l'état de commutation correspondant [9].

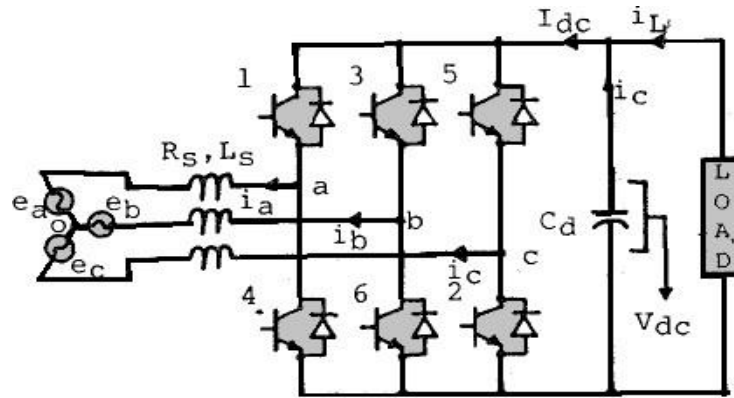


Fig. II.9(a) : Diagramme simplifié du convertisseur VSC à deux niveaux. [9]

Les tensions de nœud (V_{an} , V_{bn} , V_{cn}), mesurées par rapport à la prise centrale en courant continu, sont définies par la matrice de commutation S_v :

Mode	0	1	2	3	4	5	6	7
Igbt	2,4,6	6,1,2	1,2,3	2,3,4	3,4,5	4,5,6	5,6,1	1,3,5
Idc	0	I_a	$-i_c$	i_b	$-i_a$	i_c	$-i_b$	0
Van		1	1				1	1
	-1			-1	-1	-1		
Vbn			1	1	1			1
	-1	-1				-1	-1	

Vcn					1	1	1	1
	-1	-1	-1	-1				

Fig. II.9(b) : Formes d'onde de la tension et état de commutation Idc.

$$V_n = (S_v^m)(V_{dc}/2) \quad m=0,1,\dots,7 \quad (\text{II.30})$$

Avec :

$V_n = [v_{an}, v_{bn}, v_{cn}]^t$ Vecteur de tension (ligne-neutre).

S_v^m = vecteur S_v de (m) column.

De même pour les courants de ligne :

$$i_{dc} = (S_i^m)(I_L) \quad m = 0, 1, \dots, 7 \quad (\text{II.31})$$

Où :

$I_L = [I_{an}, I_{bn}, I_{cn}]^t$: vecteur de courant (ligne-neutre).

S_i^m = vecteur S_i de (m) column.

$$S_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

De plus, les tensions de ligne ("vab, vbc, vca") sont définies par une matrice de transformation de tension phase à ligne TL.

$$V_L = (T_L)(V_n) \quad (\text{II.32})$$

où:

$V_L = [v_{ab}, v_{bc}, v_{ca}]^t$: vecteur de tension (ligne – ligne).

$$T_L = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ vecteur } T_L \text{ de (m) column.}$$

La transformation de Park est un outil mathématique essentiel en commande vectorielle, utilisé pour modéliser et contrôler des systèmes triphasés. [21,45] Elle permet de convertir les grandeurs électriques d'un système triphasé, exprimées dans le repère fixe abc, en un repère diphasé tournant dq, composé de deux axes orthogonaux : l'axe direct « d » et l'axe quadratique « q ».

Cette transformation repose sur un cadre de référence rotatif, ce qui facilite l'analyse et la commande des grandeurs électriques en simplifiant les équations dynamiques. Elle élimine également la séquence zéro, c'est-à-dire la composante commune aux trois phases, qui n'influence pas la dynamique utile du système.

En pratique, la transformation de Park relie le repère statique triphasé (abc) à un repère tournant (dq) aligné sur une référence spécifique, ce qui permet une commande plus efficace et plus intuitive, notamment pour les convertisseurs et machines électriques. Les axes « d » et « q » représentent respectivement des composantes alignées et déphasées de 90° par rapport à cette référence, ce qui facilite la séparation des effets actifs et réactifs dans les systèmes électriques triphasés.

$$V_{dq} = S V_n \quad (II.33)$$

$$= S' V_L$$

$$= S' T_L V_n$$

Avec :

$V_n = [v_{an} v_{bn} v_{cn}]^t$: vecteur de tension phase.

$V_L = [v_{ab}, v_{bc}, v_{ca}]^t$: vecteur de tension (ligne-ligne).

$$S = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}, S' = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

on déduit que:

$$S = S' T_L$$

A partir de ces équations, il est possible de relier les tensions et courants d'entrée du convertisseur transformés par la transformée de park de coordonnée dq avec la tension et le courant de sortie du convertisseur en utilisant la matrice de commutation comme suit :

$$V_{dq} = (S_{dq}^m) V_{dc} \quad (II.34)$$

$$I_{dc} = (S_{dq}^m)^t I_{dq} \quad (II.35)$$

Où :

$S_{dq}^m = S S_v^m$: vecteur S_{dq} de (m) column.

$$S_{dq} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{2}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{-2}{\sqrt{6}} & \frac{-2}{\sqrt{6}} & \frac{-1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\sqrt{2}} & \frac{-1}{\sqrt{2}} & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \end{bmatrix}$$

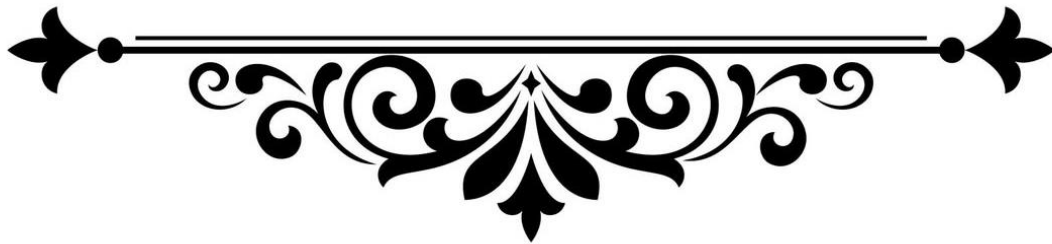
II.6. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la modélisation mathématique des différents composants du système hybride, incluant les chaînes de conversion PV et éolienne, le stockage par batteries ainsi que le convertisseur VSC. Cette étape de modélisation constitue le socle technique nécessaire pour structurer l'architecture du système et définir les interactions entre ses variables, en vue de l'élaboration de stratégies de commande avancées.



Chapitre III

Commande et optimisation



III.1. Introduction

L'histoire des régulateurs est longue et riche, marquée par plusieurs étapes clés. Les premiers régulateurs centrifuges sont apparus vers 1750 pour contrôler la vitesse des moulins à vent, suivis en 1788 par le célèbre contrôleur de vitesse de la machine à vapeur conçu par James Watt.

En 1942, Ziegler et Nichols ont proposé deux méthodes pratiques pour déterminer les paramètres optimaux d'un régulateur adapté à une installation donnée. Au début des années 1990, Åström et ses collaborateurs ont analysé le comportement dynamique d'un grand nombre de processus et ont élaboré des méthodes de dimensionnement des régulateurs PID, ainsi qu'une méthode d'auto-ajustage.

Ces dernières années, les méthodes classiques de l'automatique ont été largement appliquées dans de nombreux problèmes industriels. Toutefois, la plupart des systèmes physiques présentent des non-linéarités, et leurs paramètres sont souvent mal connus ou variables dans le temps. Avec les progrès des calculateurs numériques, de nouvelles approches ont émergé : commande adaptative, prédictive, robuste, et techniques basées sur l'intelligence artificielle (réseaux de neurones, algorithmes génétiques, logique floue) [11].

III.2. Commande classique (PI)

III.2.1. Généralités sur les régulateurs classiques

On appelle régulateur (ou contrôleur) la partie d'un système de commande comparant le signal de mesure $y(t)$ avec le signal de consigne $r(t)$ afin de générer un signal de commande $u(t)$ (Fig. III.1) [32].

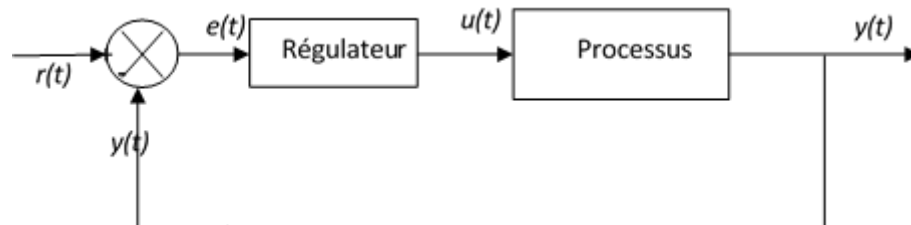


Fig. III.1 : Schéma fonctionnel d'un processus réglé.[10]

On peut classer les contrôleurs selon deux grandes familles :

- Contrôleurs classiques : à une seule variable d'entrée et une seule variable de sortie (ex. : régulateurs PI, régulateurs à avance-retard de phase).
- Contrôleurs avancés : à méthode moderne, constitués de plusieurs variables d'entrée et de plusieurs variables de sortie. (III.)

III.2.2. Description des régulateurs PI

Le régulateur PI relie directement le signal de commande $u(t)$ au signal d'écart $e(t)$. Sa description temporelle est : [32].

$$u(t) = k_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt \right) \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$$\underline{e}(t) = r(t) - \underline{v}(t) \quad (\text{III.2})$$

Où k_p et T_i ($k_i = 1/T_i$) sont les paramètres à régler. Sa fonction de transfert est :

$$H(p) = \frac{U}{E} = k_p \left(1 + \frac{1}{pT_i} \right) \quad (\text{III.3})$$

Les performances d'un régulateur PI dépendent de deux paramètres : la constante proportionnelle k_p et la constante intégrale k_i .

- Une augmentation de k_p accélère la réponse et réduit l'erreur statique, mais peut rendre la sortie oscillatoire.
- L'action intégrale élimine l'erreur statique en régime permanent ; une valeur trop grande de k_i peut entraîner des instabilités.
- La combinaison PI permet d'éliminer l'erreur statique tout en améliorant la stabilité grâce au zéro introduit par la partie proportionnelle.

III.2.3. Méthodes d'optimisation pour le réglage des contrôleurs PI

Une étude réalisée en 1993 a montré que 95 % des boucles de régulation utilisaient des structures PID, dont la majorité étaient des régulateurs PI, mais seulement 20 % fonctionnaient correctement. Les principales méthodes de réglage sont : [10].

- Méthode par approches successives : modification progressive des paramètres jusqu'à obtenir une réponse optimale.

- Méthode par identification du procédé : calcul des paramètres à partir de la fonction de transfert du procédé, puis affinage par essais.
- Méthode de Ziegler et Nichols : calcul des paramètres à partir de l'observation de la réponse du procédé, sans identification préalable.

III.3. Commande Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS)

Cette méthode repose sur l'utilisation d'un système d'inférence neuronale floue adaptatif (ANFIS) pour prédire et contrôler le comportement du système à partir de données de fonctionnement passées.

Un modèle intelligent est construit pour apprendre la relation entre les entrées et les sorties du système, permettant ainsi d'estimer son comportement futur sur un horizon temporel donné sans nécessiter de modèle mathématique précis [33].

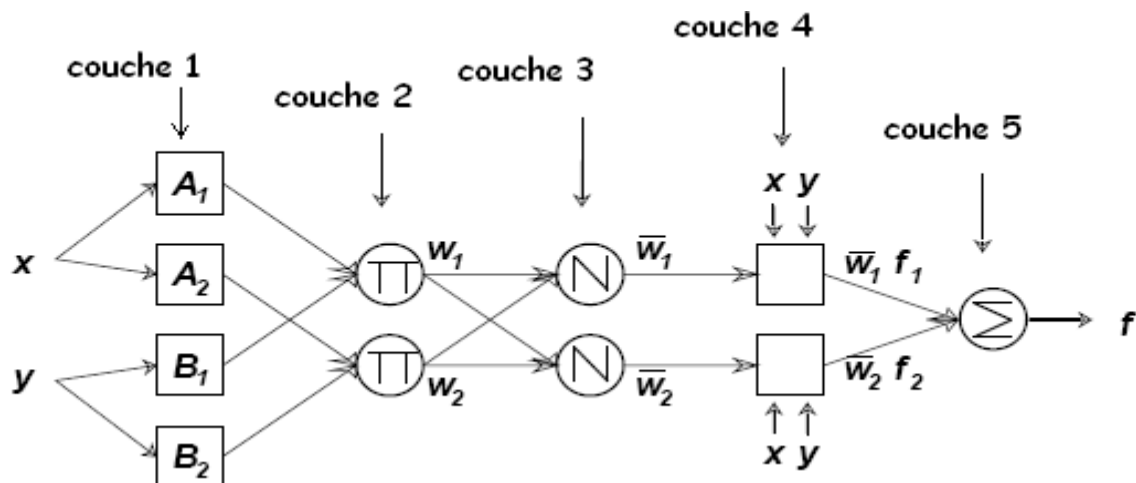


Fig. III.2 : L'Architecture de l'ANFIS.[33]

Le principe de fonctionnement de cette méthode peut être résumé comme suit : Utiliser un modèle numérique du système à commander:

- Le principe de fonctionnement de cette méthode peut être résumé comme suit :
- Utilisation d'un modèle ANFIS basé sur les données de fonctionnement du système.
- Prédiction du comportement futur du système à partir des apprentissages passés.
- Comparaison de la sortie prédite avec la référence requise pour identifier les erreurs.
- Ajustement adaptatif des signaux de contrôle pour réduire les erreurs et améliorer les performances.
- Mise à jour ou réutilisation du modèle à chaque période d'échantillonnage pour améliorer la précision [7].

III.4. Optimisation intelligente par logique floue

La logique floue, introduite en 1965 par le Professeur Lotfi A. Zadeh à partir de sa théorie des sous-ensembles flous, constitue une méthode mathématique pour représenter l'imprécision du langage humain. Également appelée « logique linguistique », ses valeurs de vérité s'expriment avec des termes du langage courant tels que « plutôt vrai », « assez loin », « fort », « faible » [32].

Un système basé sur la logique floue comporte quatre étapes clés :

- Interface de fuzzification : conversion des variables d'entrée précises en valeurs floues.
- Base de connaissance : ensemble de règles Si-ALORS définissant le comportement du système.
- Bloc d'inférence : application des règles floues aux entrées fuzzifiées pour générer une sortie floue.
- Interface de défuzzification : transformation de la sortie floue en une valeur numérique précise exploitable.

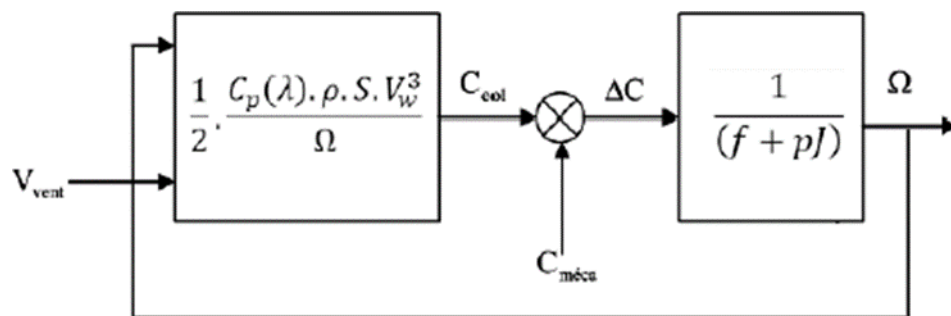


Fig. III.3 : Structure principale d'un contrôleur à logique floue. [32]

III.4.1. La fuzzification

La fuzzification transforme des données précises (valeurs numériques) en valeurs floues exprimées par des termes linguistiques. Par exemple, dans un système photovoltaïque, la variable « irradiation solaire » peut être décomposée en termes linguistiques comme « trop petite », « petite », « moyenne », « grande », « trop grande ». Les valeurs numériques sont converties en degrés d'appartenance à ces termes via des fonctions d'appartenance (triangulaires, trapézoïdales, gaussiennes, etc.), variant entre 0 et 1.

III.4.2. La défuzzification

La défuzzification convertit la sortie floue obtenue après inférence en une valeur numérique précise. Les méthodes courantes sont :

- Centre de gravité (COG) : calcule le centre de la surface sous la courbe de la fonction d'appartenance.
- Bissectrice de surface (BOA) : trouve le point divisant la surface floue en deux parties égales.
- Moyenne pondérée : calcule la moyenne des valeurs des pics, pondérée par leurs degrés d'appartenance.
- Moyenne du maximum (MOM) : prend la moyenne des valeurs correspondant aux maximas de la fonction floue.
- Premier des maxima / Dernier des maxima : choisit la première ou dernière valeur maximale rencontrée.

III.5. Gestion énergétique du SHSER

La stratégie de gestion de l'énergie (Energy Management Strategy, EMS) est cruciale pour le fonctionnement optimal d'un système hybride de production électrique renouvelable (SHSER). Elle vise à maximiser le rendement global, gérer efficacement les transferts d'énergie entre les composantes (sources renouvelables, stockage, charges) et respecter les contraintes opérationnelles, notamment celles des batteries [34].

Deux grandes approches sont identifiées dans la littérature :

- Stratégies à base de règles (rule-based strategy) : fondées sur des règles prédéfinies, simples à implémenter, adaptées aux systèmes de complexité modérée.
- Stratégies à base d'optimisation : fondées sur des modèles mathématiques et algorithmes d'optimisation, plus complexes mais potentiellement plus performantes [34].

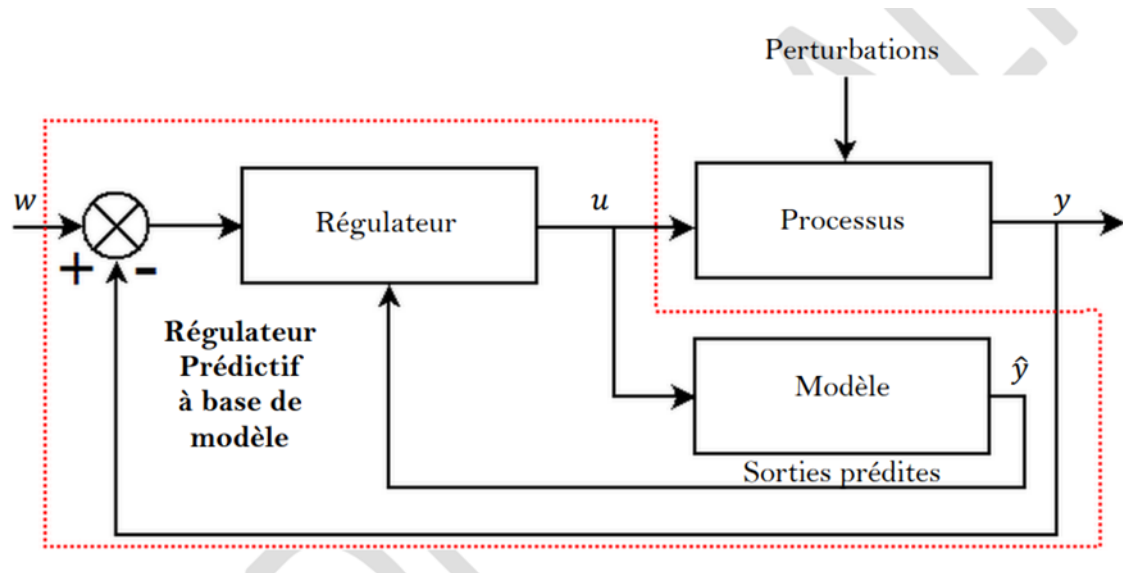


Fig. III.4 : Classification des stratégies de gestion d'énergie. [34]

III.5.1. Stratégies à base de règles

Cette catégorie repose sur un ensemble de règles prédéfinies élaborées à partir de l'analyse du comportement des composants du système. Son avantage principal est la distribution efficace de la puissance et le contrôle en temps réel sans connaissance préalable du profil de consommation ni des conditions climatiques. On distingue :

- Règles déterministes : définies a priori en s'appuyant sur l'expertise relative à l'ensemble des situations possibles et des objectifs à atteindre.
- Règles floues : gérées à l'aide de la logique floue, offrant une meilleure tolérance aux imprécisions des mesures et une adaptation aisée aux variations. D'autres techniques d'intelligence artificielle (essais particuliers, réseaux de neurones artificiels) ont également été utilisées pour optimiser ces règles [34].

III.5.2. Stratégies à base d'optimisation

Cette catégorie repose sur des méthodes d'optimisation visant à déterminer la meilleure répartition, le meilleur stockage et la meilleure consommation de l'énergie pour satisfaire les besoins de l'utilisateur. On distingue :

- Optimisation hors ligne (globale) : planifie la répartition des puissances plusieurs heures à l'avance en s'appuyant sur des données prévisionnelles du profil de charge et des conditions météorologiques.

- Optimisation en temps réel : commande instantanée des flux énergétiques sans connaissance préalable du profil de charge [34].

Dans ce travail, l'approche adoptée est celle des règles déterministes, principalement justifiée par sa simplicité d'implémentation et sa fiabilité en temps réel.

III.5.3. Modes de fonctionnement du SHSER

Le système hybride peut fonctionner selon différents scénarios en fonction de la puissance renouvelable produite, de la demande énergétique et de l'état de charge (SoC) des batteries. Ces situations sont regroupées en deux modes principaux :

III.5.4. Mode de fonctionnement normal

Ce mode correspond à une situation où la demande énergétique est entièrement satisfaite et où le SoC des batteries reste entre les seuils minimums et maximum prédéfinis.

- Charge des batteries : lorsque $P_{tot} = P_{pv} + P_{eol} > P_{demande}$ et $SoC < 100 \%$, la puissance excédentaire ($P_{tot} - P_{demande}$) est stockée dans les batteries.
- Décharge des batteries : lorsque $P_{tot} < P_{demande}$ et $SoC > 30 \%$, l'énergie stockée est restituée pour compenser le déficit ($P_{demande} - P_{tot}$).

III.5.5. Mode de fonctionnement dégradé

Ce mode correspond à une situation où le SoC dépasse l'un des seuils imposés ($SoC = 30 \%$ ou $SoC = 100 \%$).

- Manque de production : surconsommation ($P_{demande} > P_{tot}$) avec $SoC < 30 \%$. Le système ne peut pas satisfaire la demande. La solution est un délestage partiel/sélectif, ou l'arrêt du système pour protéger ses composants.
- Excès de production : surproduction ($P_{tot} > P_{demande}$) avec $SoC = 100 \%$. Solutions possibles : dégrader volontairement le rendement des générateurs, ou alimenter des charges secondaires (résistances de chauffage, etc.) [34].

III.6. Conclusion

En conclusion, la gestion de l'énergie est un enjeu clé pour garantir la performance d'un système hybride de production électrique renouvelable. Les stratégies basées sur des règles, simples et robustes, conviennent aux systèmes de complexité modérée, tandis que les approches par optimisation offrent des performances accrues au prix d'une complexité plus importante.

Dans cette étude, l'adoption d'une stratégie déterministe s'explique par sa simplicité d'implémentation et sa fiabilité en temps réel. La définition claire des modes de fonctionnement et des scénarios associés permet une gestion structurée de l'énergie, assurant à la fois la satisfaction de la demande et la protection des batteries. Cette approche représente un compromis pertinent entre simplicité, efficacité et fiabilité, tout en ouvrant la voie à des améliorations futures via l'intégration de techniques d'optimisation ou d'intelligence artificielle.

Chapitre IV

Simulation et résultats

IV.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à la validation des concepts théoriques abordés dans les chapitres précédents à travers la simulation numérique de notre système global sous l'environnement MATLAB/Simulink. L'objectif principal est d'analyser et d'évaluer les performances du système de gestion d'énergie hybride (Photovoltaïque, Éolien et Batterie) fonctionnant de manière autonome (mode Standalone).

Pour ce faire, nous présenterons dans un premier temps l'implémentation du modèle global sur Simulink. Ensuite, nous mènerons une étude comparative approfondie entre deux stratégies de commande appliquées à l'onduleur source de tension (VSC) : la commande classique par régulateur Proportionnel-Intégral (PI) et la commande intelligente basée sur le système d'inférence floue neuro-adaptatif (ANFIS).

L'analyse des résultats portera sur des critères stricts, notamment la stabilité de la tension du bus continu (V_{dc}), la gestion du flux de puissance entre les différentes sources, la continuité de l'alimentation de la charge, ainsi que la qualité de l'énergie générée (analyse du taux de distorsion harmonique - THD). Cette démarche nous permettra de mettre en évidence la robustesse et l'efficacité de la solution intelligente proposée face aux limites des méthodes classiques.

IV.2 Simulation modèle d'alimentation PV 20 kW, algorithme MPPT « Perturber et observer »

Ce bloc représente le modèle d'alimentation photovoltaïque d'une puissance nominale de 20 kW, connecté à un convertisseur DC-DC de type Boost. Afin de maximiser le rendement des panneaux solaires face aux variations climatiques (éclairage et température), l'algorithme MPPT basé sur la méthode "Perturber et Observer" (P&O) est implémenté pour suivre continuellement le point de puissance maximale et garantir une extraction optimale de l'énergie.

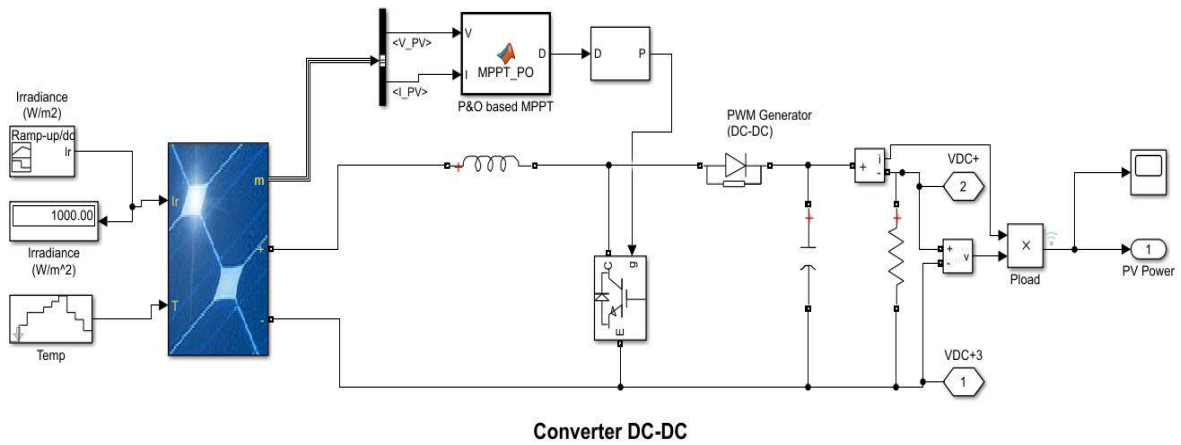


Fig IV. 1: Schéma bloc Simulink du convertisseur DC-DC (Boost) associé au système photovoltaïque avec commande MPPT (P&O).

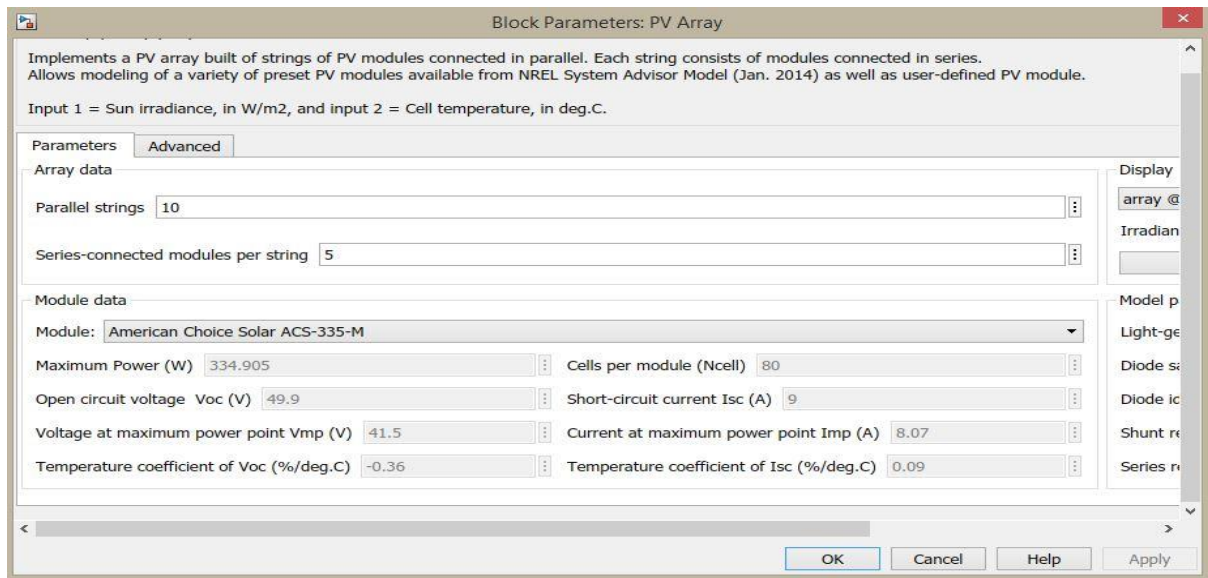


Fig IV. 2 : Paramètres du bloc PV.

IV.2.1 Modélisation du convertisseur DC-DC élévateur:

La tension de sortie du générateur photovoltaïque a été augmentée et régulée par le convertisseur DC-DC élévateur. Ce convertisseur est composé d'une inductance (L), d'un transistor MOSFET, d'une diode (D) et d'un condensateur de sortie (C). Lors de la commutation, l'inductance stocke de l'énergie et le condensateur réduit l'ondulation de la tension en sortie. Les impulsions de commutation de la grille du MOSFET ont été générées par modulation de largeur d'impulsion (PWM). La largeur d'impulsion est contrôlée par le rapport cyclique, tandis que la fréquence de commutation détermine le nombre de commutations par seconde. La figure 4.2 illustre le modèle du convertisseur DC-DC élévateur mis en œuvre. [31]

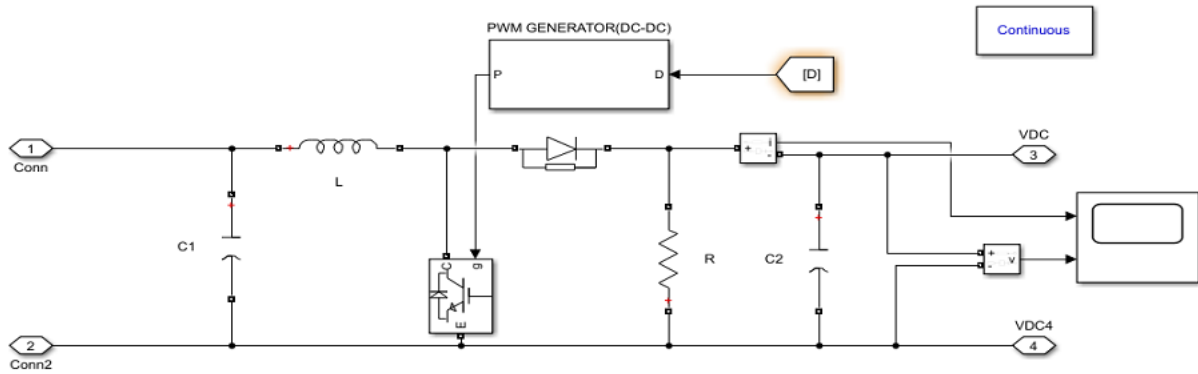


Fig IV. 3 : Simulation d'un convertisseur DC-DC élévateur à l'aide de MATLAB/Simulink

Tableau IV. 1 : Paramètres du convertisseur élévateur DC-DC

Paramètre	Valeur
Inducteur L	1e-3 H
Condensateur d'entrée C1	500e-6 μ F
Condensateur de sortie C2	1e-3 μ F
Fréquence de commutation des MOSFET	5000 Hz
Résistance à la charge	10 Ohm

IV.3. Simulation modèle éolien de 20 kW utilisant un contrôleur à logique floue

Ce bloc représente le modèle de la chaîne de conversion d'énergie éolienne d'une puissance nominale de 20 kW. Pour faire face à la nature intermittente et hautement non linéaire de la vitesse du vent, une commande intelligente basée sur la logique floue (Fuzzy Logic) est implémentée. Ce contrôleur avancé permet d'adapter dynamiquement le système pour garantir une extraction maximale, fluide et stable de la puissance éolienne.

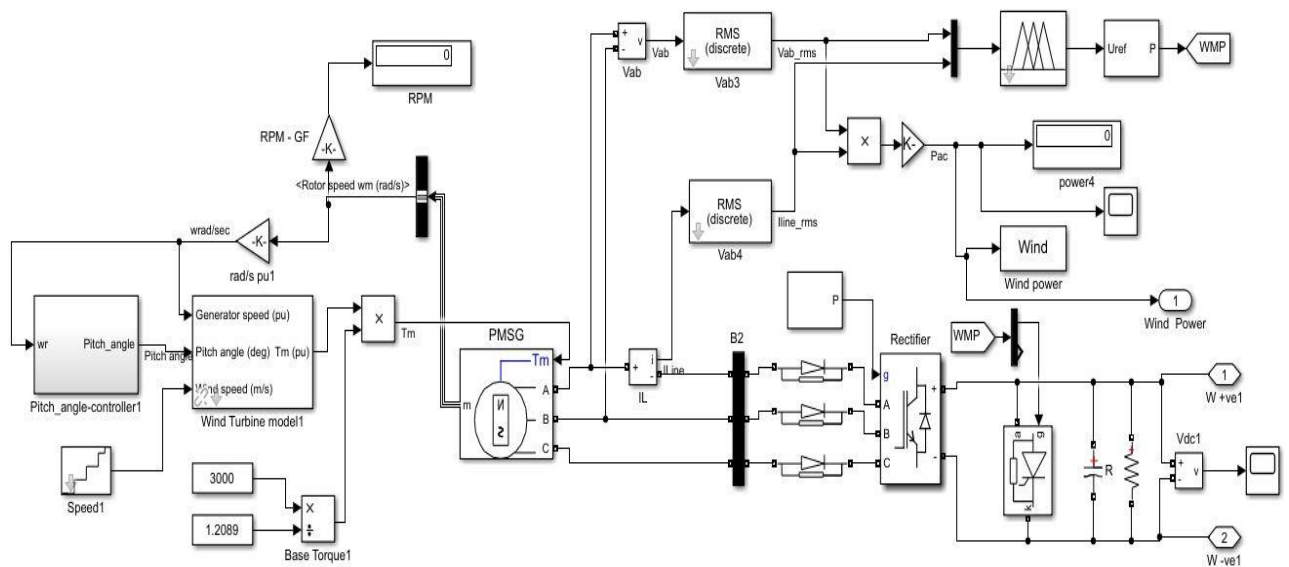


Fig IV. 4 : Modélisation Simulink de la chaîne de conversion d'énergie éolienne incluant la turbine, le générateur PMSG et le redresseur.

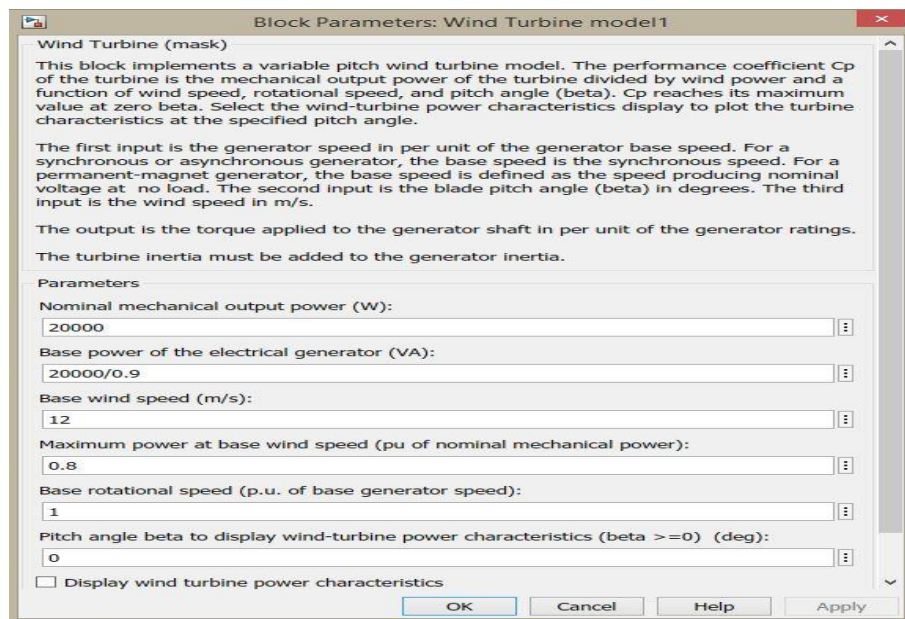


Fig IV. 5 : Paramètres du bloc éolienne.

IV.4 Simulation modèle de gestion de batterie utilisant un contrôleur PI

Ce sous-système illustre le modèle de gestion du stockage d'énergie par batterie, couplé au bus continu via un convertisseur bidirectionnel (Buck-Boost). Un contrôleur classique de type Proportionnel-Intégral (PI) est utilisé pour réguler avec précision les courants de charge et de décharge. Son rôle crucial est d'assurer l'équilibre énergétique global en compensant les fluctuations des sources renouvelables (PV et éolien) et en maintenant la tension du bus continu parfaitement stable.

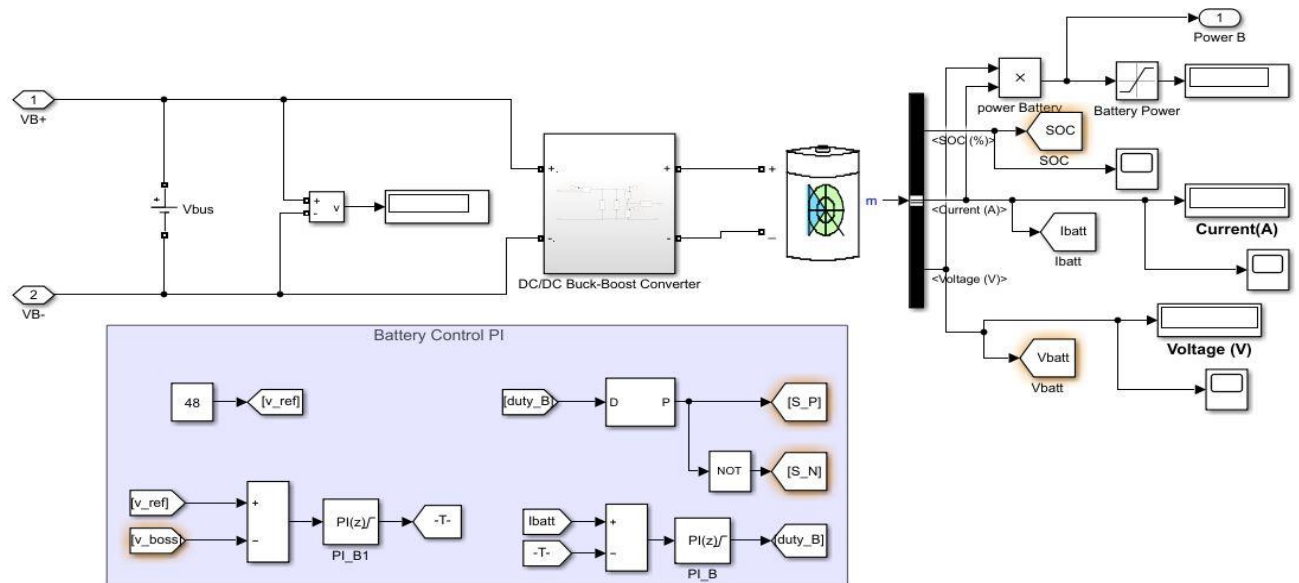


Fig IV. 6 : Schéma de commande Simulink du système de stockage d'énergie (Batterie) via un convertisseur bidirectionnel abaisseur-élevateur.

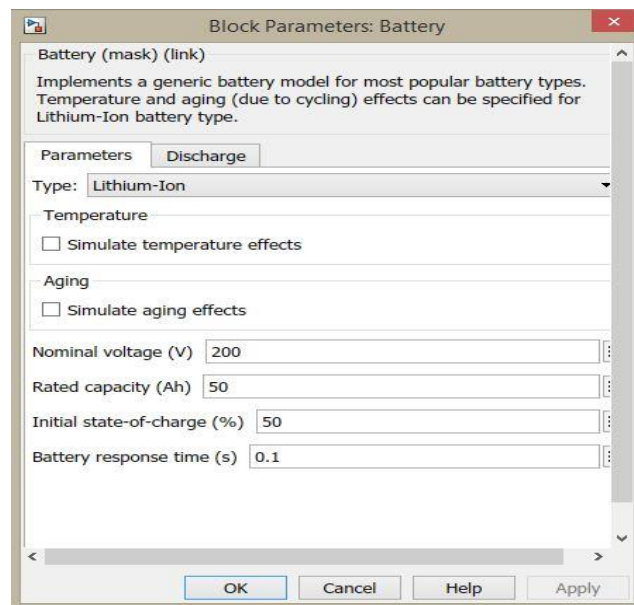


Fig IV. 7 : Paramètres du bloc batterie.

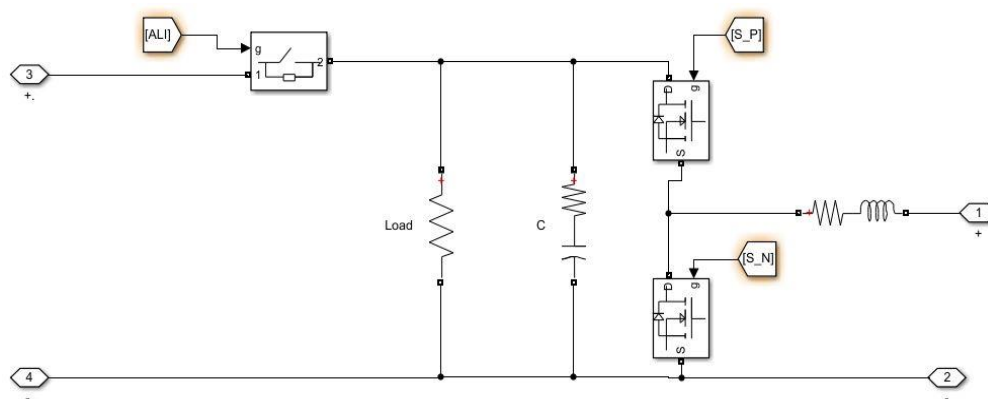


Fig IV. 8 : Batterie du convertisseur DC/DC abaisseur-élevateur

IV.5. Voltage Source Converter (VSC)

Ce bloc représente le convertisseur source de tension (VSC - Voltage Source Converter), qui constitue le cœur de notre système hybride. Son rôle principal est d'assurer la conversion de l'énergie continue (DC) issue du bus de couplage en une énergie alternative triphasée (AC) de haute qualité destinée à alimenter la charge isolée. Grâce à sa commande de régulation interne, le VSC garantit la stabilité de la tension et de la fréquence côté alternatif, tout en régulant les flux de puissances active et réactive du réseau.

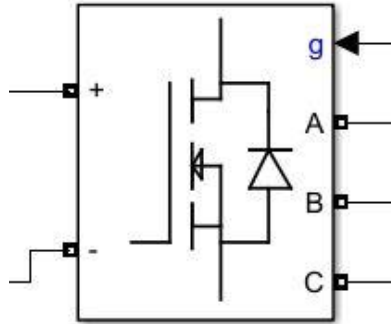


Fig IV. 9 : Pont universel (Voltage Source Converter)

IV.5.1 Simulation système hybride PV–éolienne–batterie avec VSC- PI

Cette section présente la simulation globale du système de production d'énergie hybride (Photovoltaïque, Éolien et Batterie). L'élément central, le convertisseur source de tension (VSC), est ici piloté par un régulateur classique de type Proportionnel-Intégral (PI). L'objectif principal de cette simulation est d'analyser la stabilité globale du système, l'efficacité de la gestion énergétique entre les différentes sources, et la qualité de la puissance alternative (AC) fournie à la charge sous l'action du contrôleur PI.

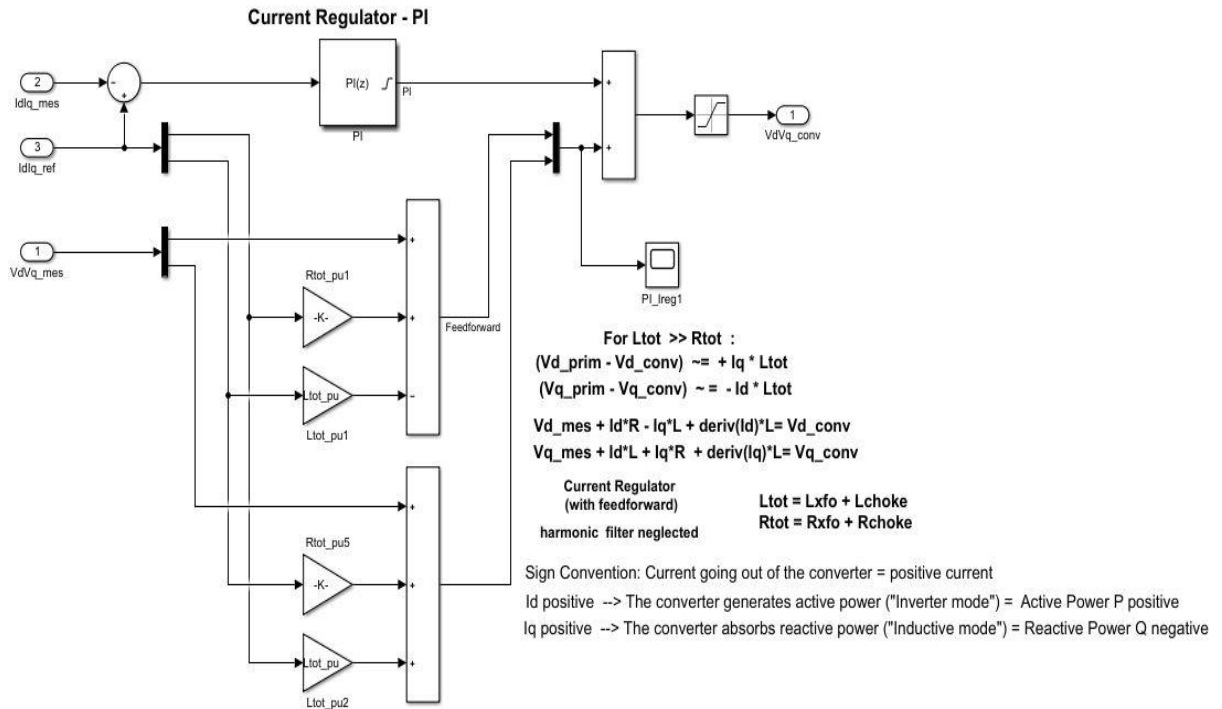


Fig IV. 10 : Forme d'onde du courant alternatif triphasé de la charge sous le contrôle du régulateur PI classique.

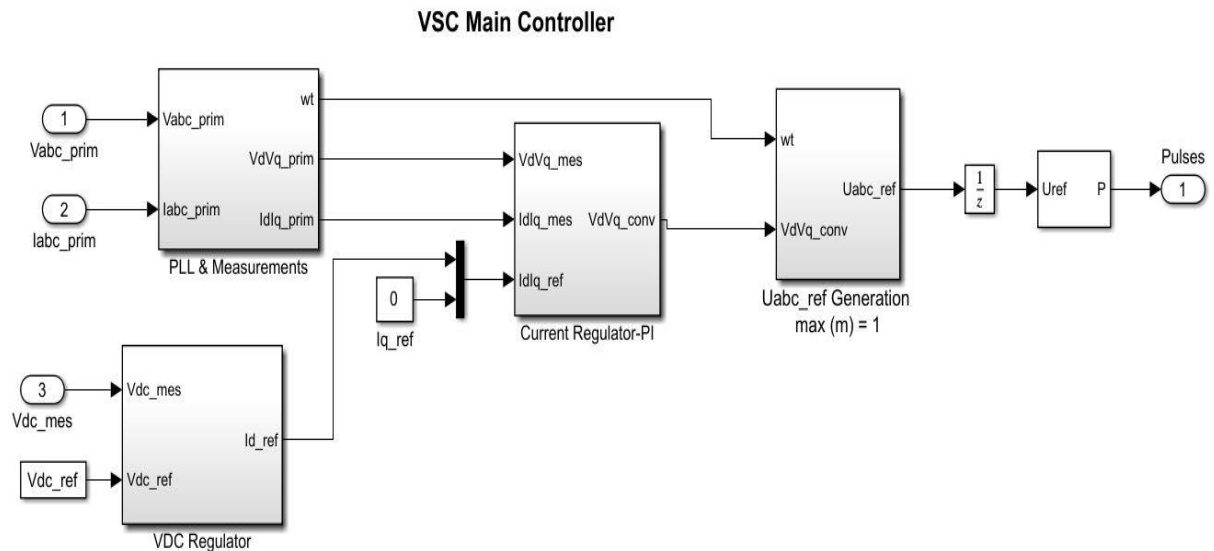


Fig IV. 11: Structure de commande globale de l'onduleur source de tension (VSC Contrôleur principal) illustrant les boucles de régulation de tension et de courant.

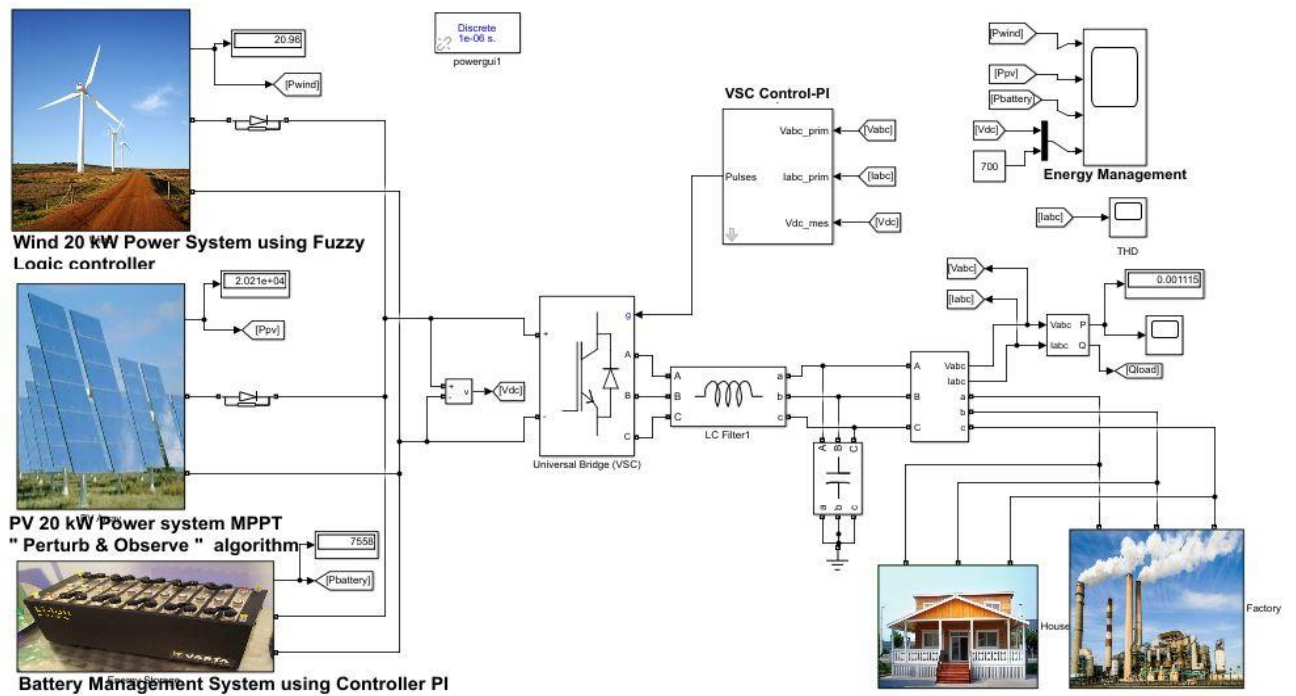


Fig IV. 12 : Modèle Simulink global du système hybride (PV-Éolien-Batterie) avec commande PI classique de l'onduleur (VSC).

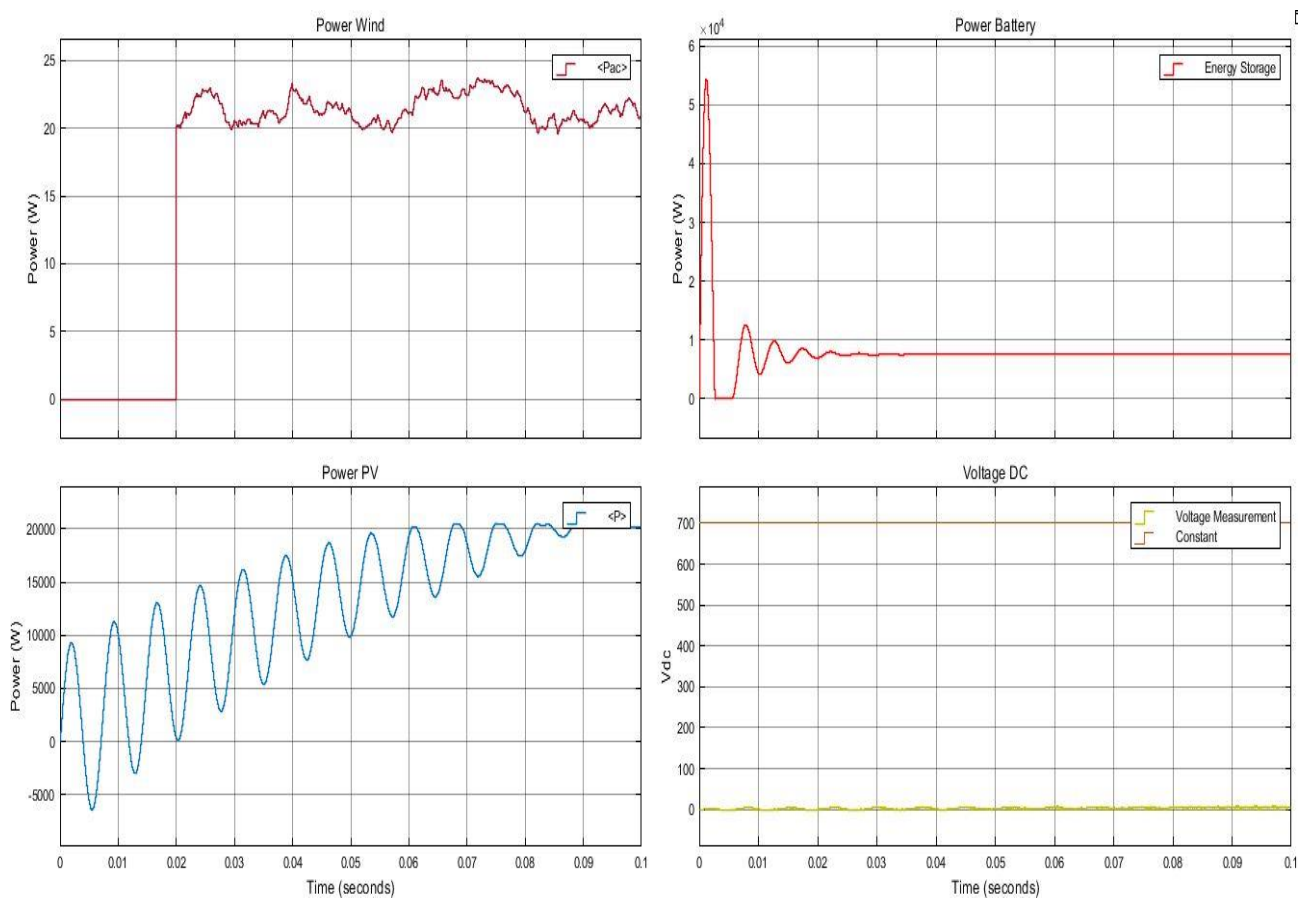


Fig IV. 13 : Évolution dynamique des puissances (Éolien, PV, Batterie) et de la tension du bus continu (Vdc) avec le contrôleur PI.

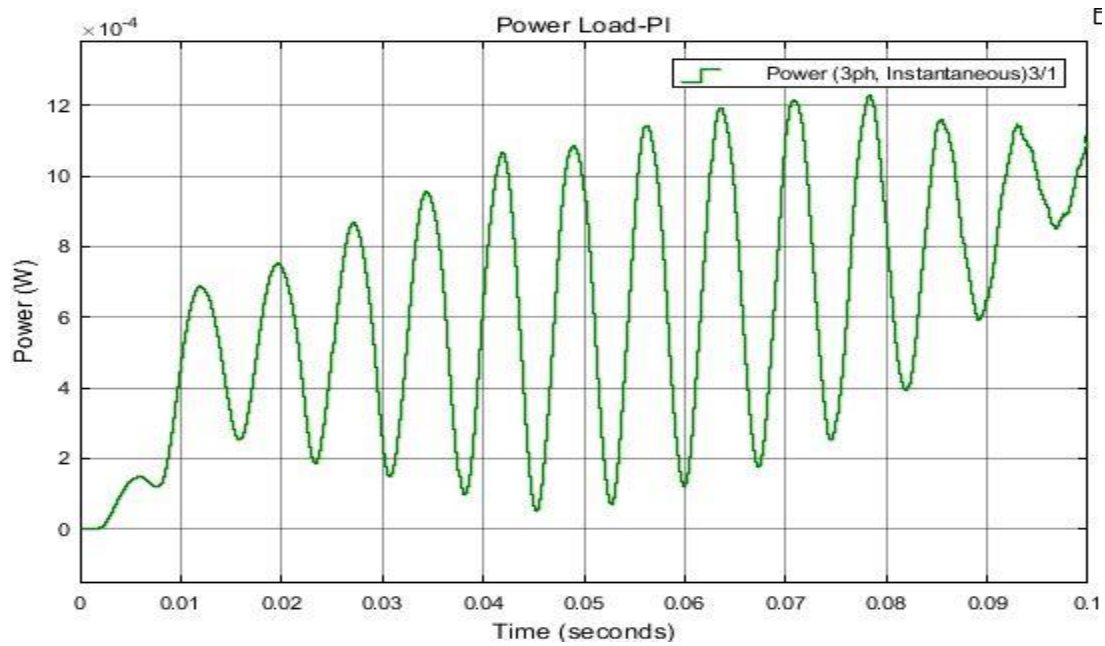


Fig IV. 14 : Réponse de la puissance active de la charge sous le contrôle du régulateur PI classique.

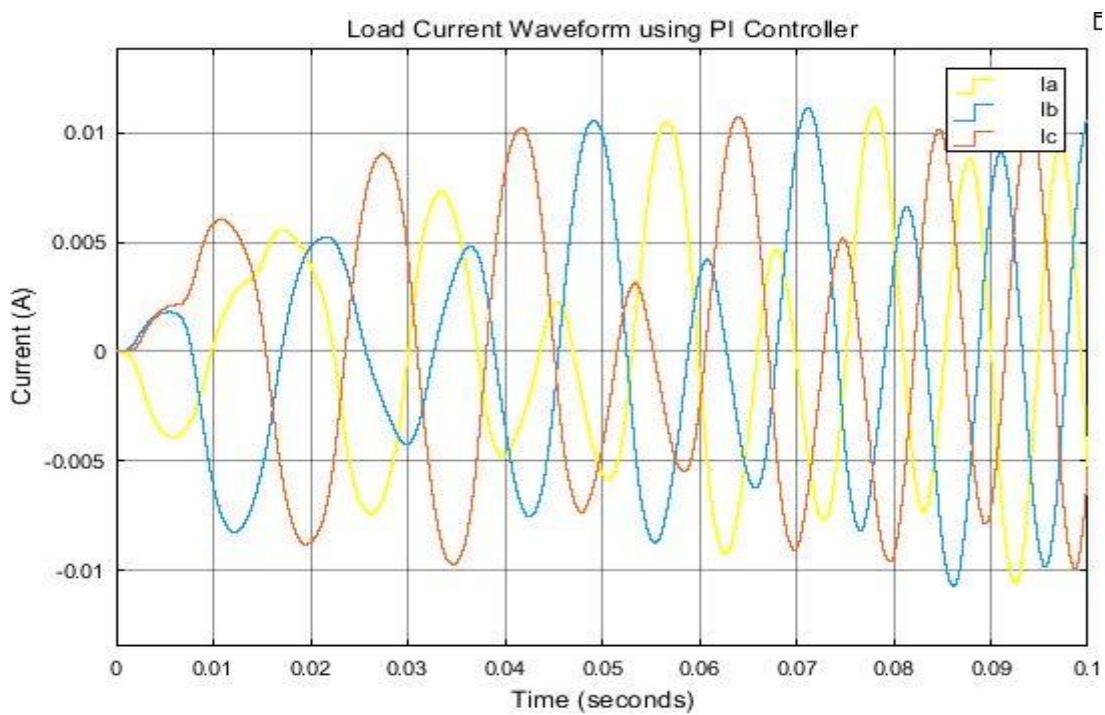


Fig IV. 15 : Forme d'onde du courant alternatif triphasé de la charge sous le contrôle du régulateur PI classique.

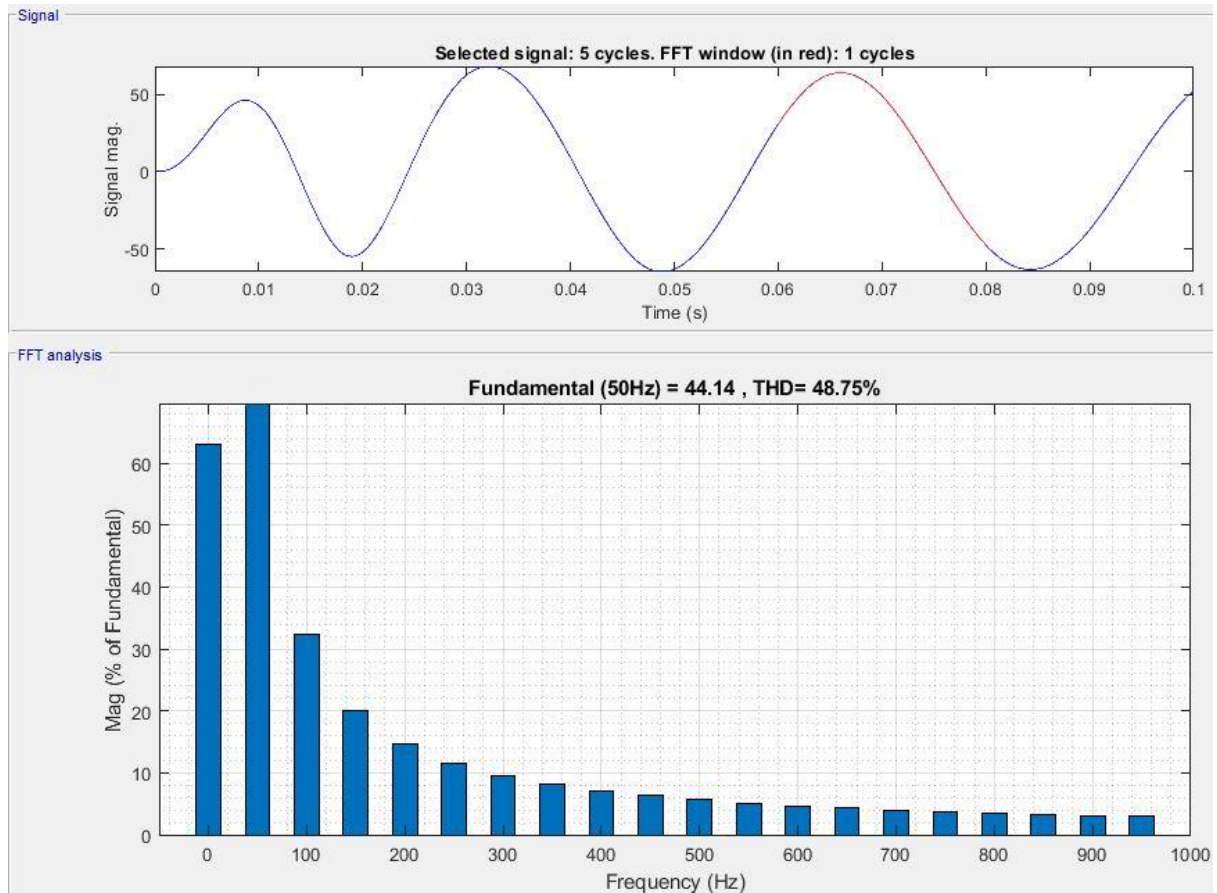


Fig IV. 16 : Analyse spectrale (FFT) et Taux de Distorsion Harmonique (THD) du courant de la charge en régime transitoire.

IV.6. Analyse des performances du système avec le contrôleur PI classique

IV.6.1. Effondrement de la tension du bus continu (Vdc) :

« Les résultats de simulation illustrent une incapacité évidente du contrôleur Proportionnel-Intégral (PI) classique à gérer le système hybride en mode isolé (Standalone). L'analyse de la courbe de tension du bus continu révèle un effondrement total, où le contrôleur échoue complètement à atteindre et à maintenir la tension de référence requise de **700 V**. »

IV.6.2. Interruption du flux de puissance et du courant de charge :

« En conséquence directe de la chute de la tension Vdc, l'onduleur source de tension (VSC) se trouve dans l'incapacité de convertir et de transférer l'énergie vers la charge. Les courbes de la puissance consommée (Power Load) et du courant triphasé de la charge (Iabc) corroborent ce constat en affichant des valeurs quasi nulles, de l'ordre de 10^{-4} W pour la puissance et **0.01 A** pour le courant. Ces valeurs insignifiantes, accompagnées d'oscillations aléatoires, s'apparentent davantage à un bruit numérique qu'à un véritable flux énergétique. »

IV.6.3. Interprétation scientifique de la défaillance :

« L'échec du contrôleur PI dans cette configuration s'explique par sa nature mathématique. Les régulateurs PI sont intrinsèquement conçus pour des systèmes connectés au réseau (Grid-

Following), où ils s'appuient sur un réseau électrique robuste pour imposer la fréquence et la tension. Dans notre architecture isolée, l'onduleur doit agir en tant que générateur de réseau (Grid-Forming). Le contrôleur PI montre ici ses limites face à la dynamique complexe et aux non-linéarités du système hybride, prouvant son manque de robustesse et de flexibilité en l'absence d'un réseau principal de soutien. »

IV.6.4. Simulation système hybride PV-éolienne-batterie avec VSC- ANFIS

Cette section présente la simulation avancée du système de production d'énergie hybride (Photovoltaïque, Éolien et Batterie). L'élément central, le convertisseur source de tension (VSC), est ici piloté par un contrôleur intelligent basé sur l'approche ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System). L'objectif principal de cette simulation est de mettre en évidence les performances supérieures de la commande intelligente en matière de stabilité globale, d'optimisation de la gestion énergétique et d'amélioration de la qualité de l'énergie fournie à la charge (notamment par la réduction significative du taux de distorsion harmonique - THD) comparativement à la commande classique.

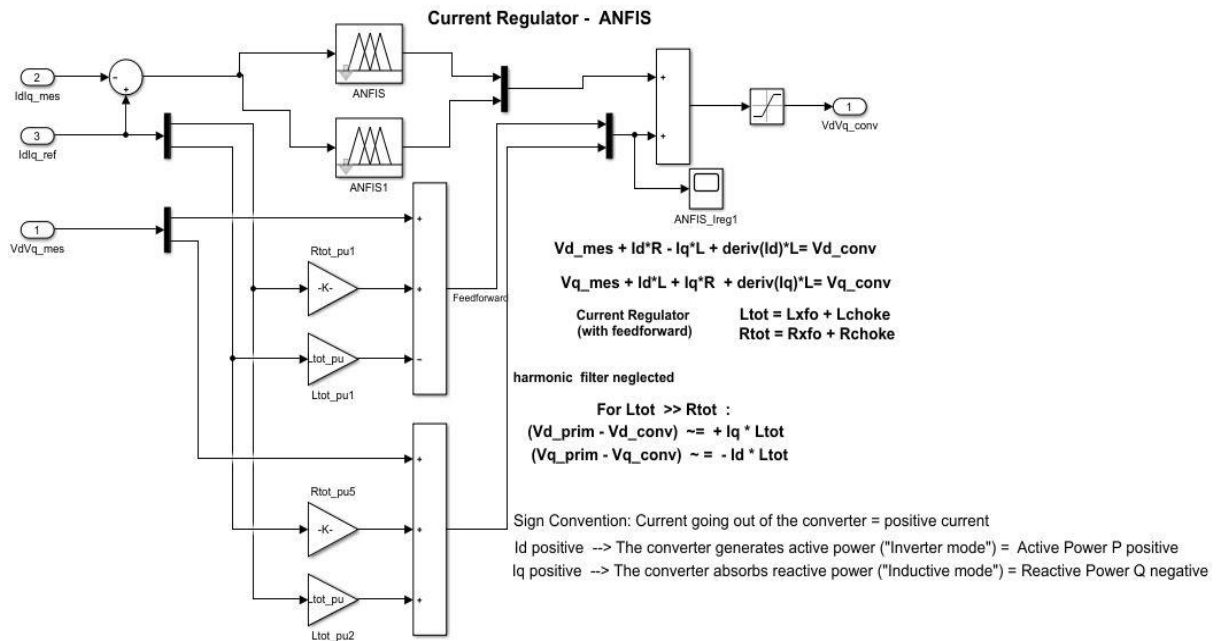


Fig IV. 17 : Boucle de régulation interne du courant (Current Regulator) basée sur le contrôleur intelligent ANFIS.

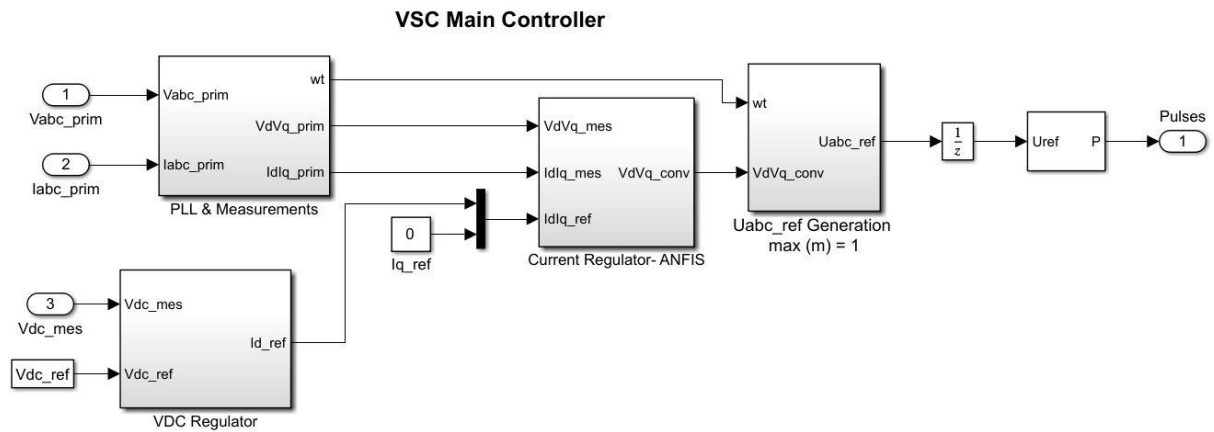


Fig IV. 18 : Structure de commande globale de l'onduleur source de tension (VSC Main Controller) intégrant la boucle de régulation intelligente (ANFIS).

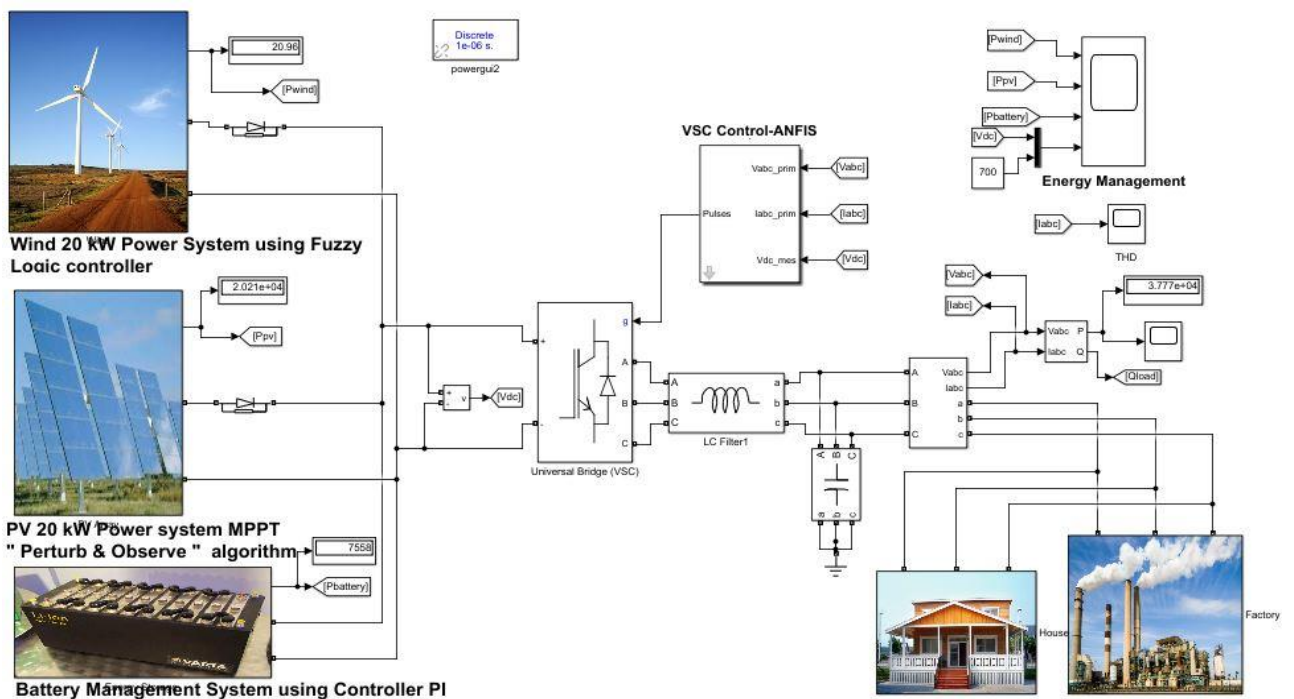


Fig IV. 19 : Modèle Simulink global du système hybride (PV-Éolien-Batterie) avec commande intelligente ANFIS de l'onduleur (VSC).

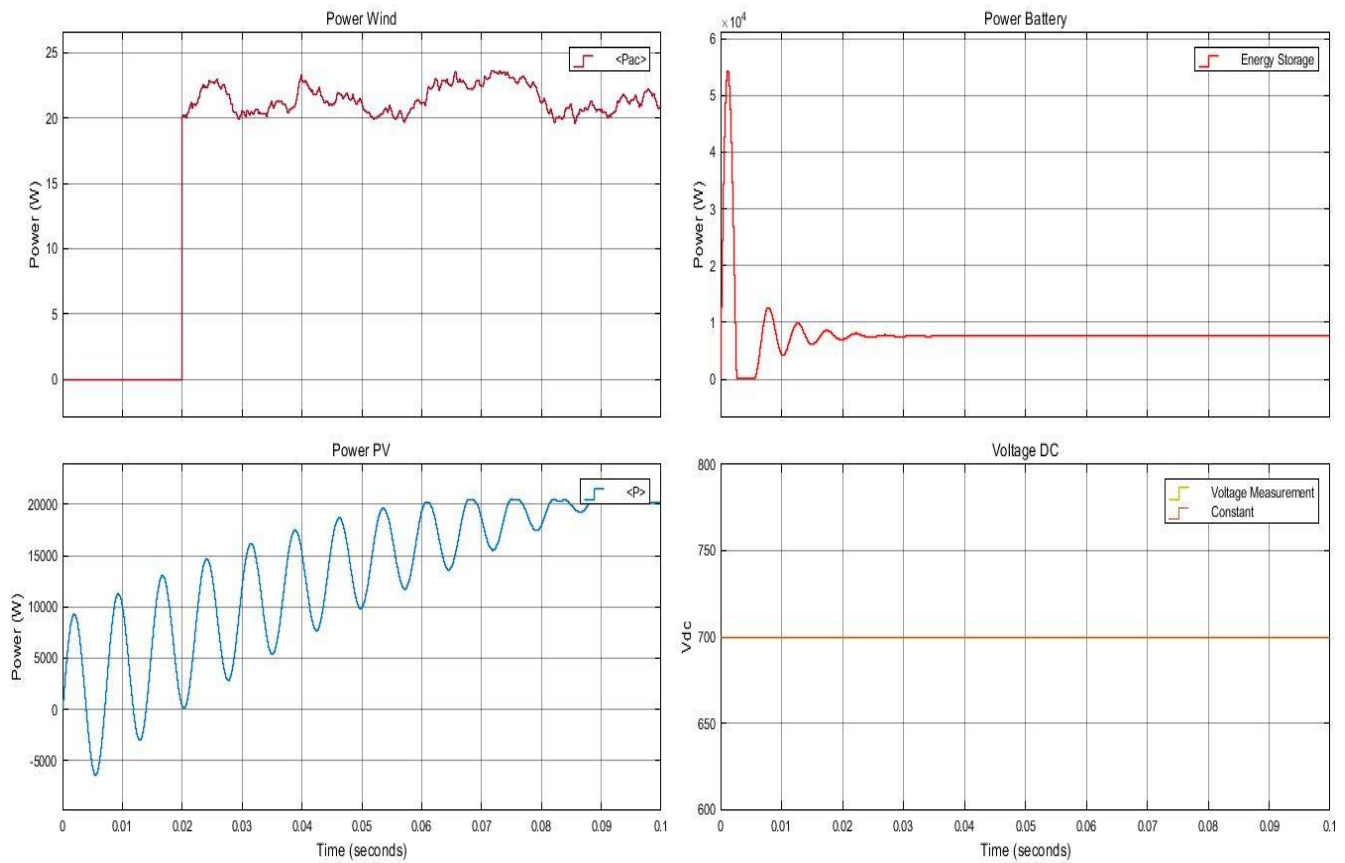


Fig IV. 20 : Évolution dynamique des puissances (Éolien, PV, Batterie) et de la tension du bus continu (Vdc) sous le contrôle de l'algorithme ANFIS.

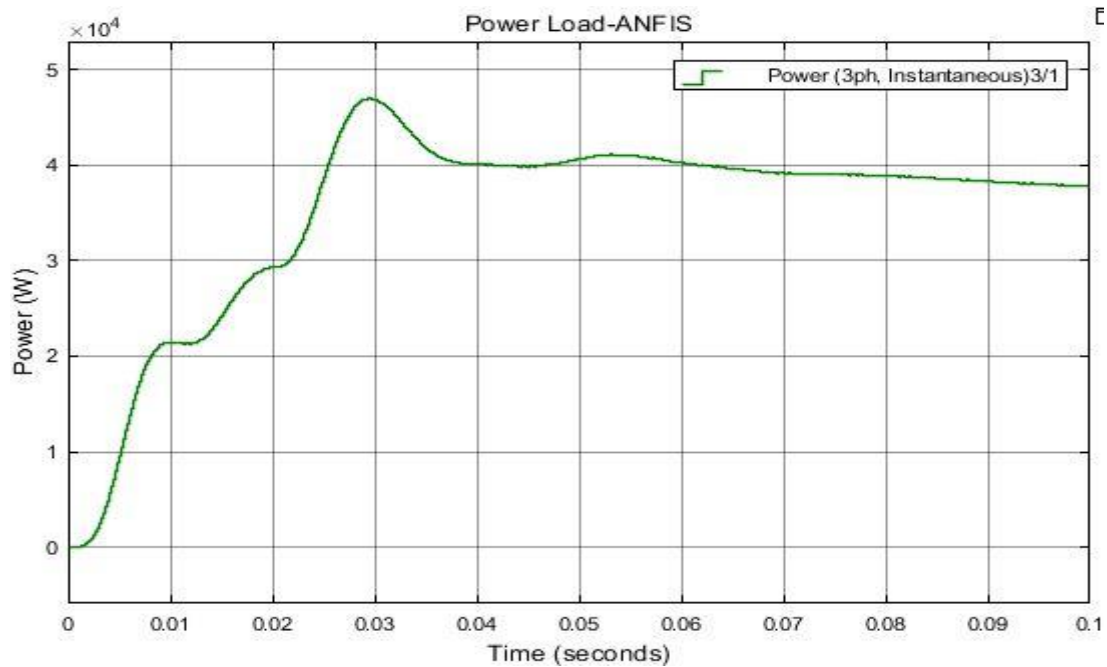


Fig IV. 21 : Réponse de la puissance active de la charge sous le contrôle intelligent ANFIS.

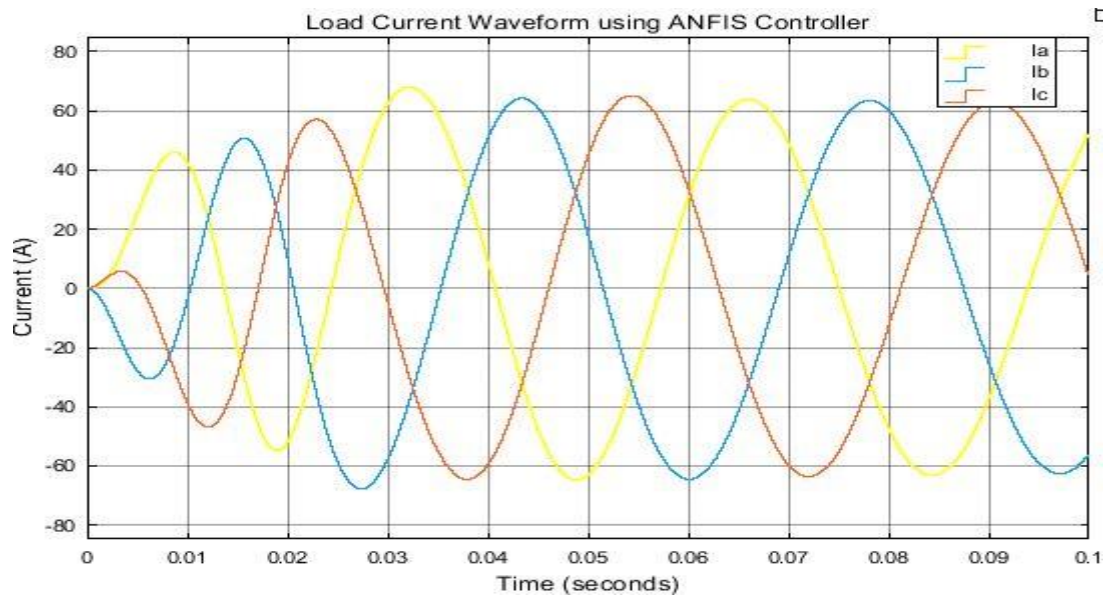


Fig IV. 22 : Forme d'onde du courant alternatif triphasé de la charge sous le contrôle intelligent ANFIS.

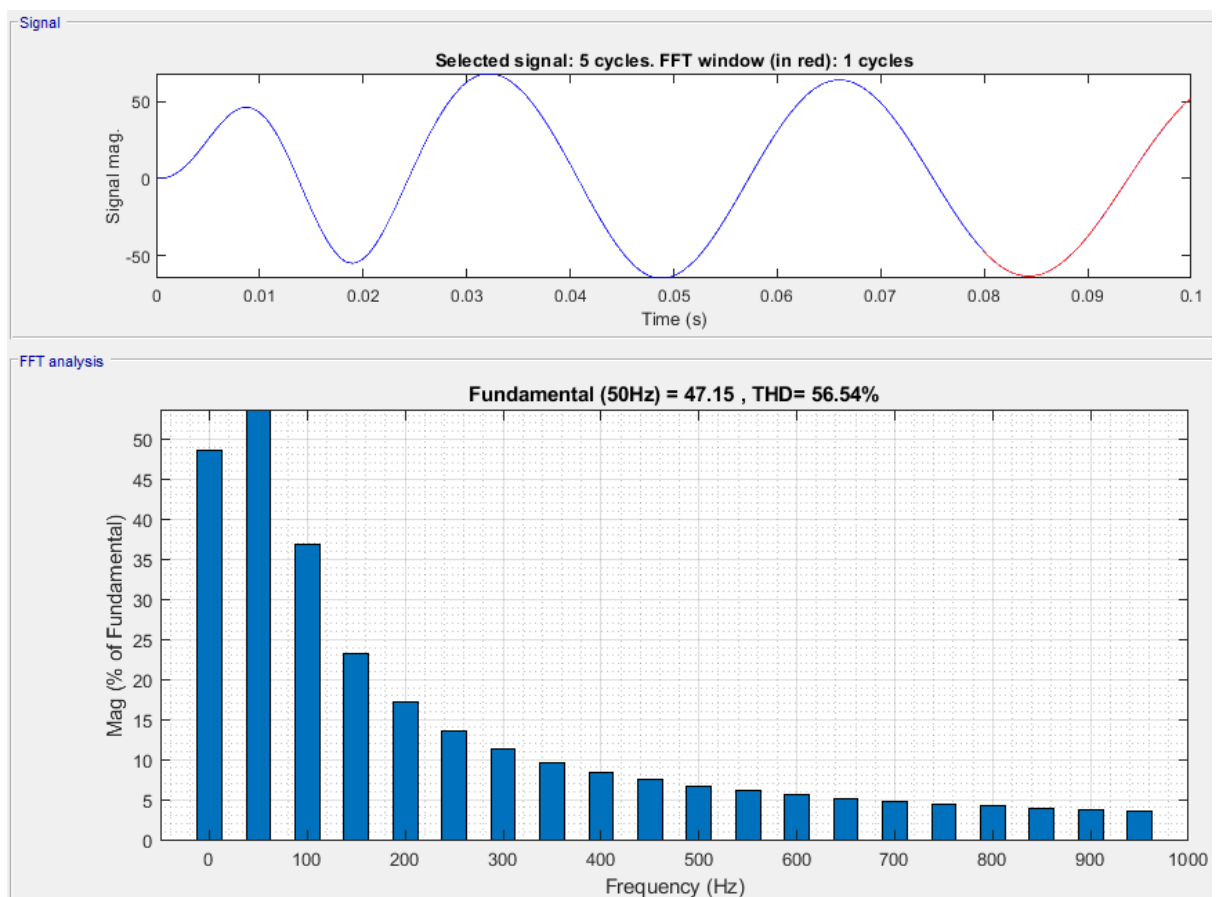


Fig IV. 23 : Analyse spectrale (FFT) et Taux de Distorsion Harmonique (THD) du courant de la charge en régime transitoire (contrôleur ANFIS).

IV.7. Analyse et interprétation des résultats de simulation du système hybride (PV-Éolien-Batterie) avec contrôleur ANFIS

IV.7.1. Analyse du flux de puissance et de la stabilité du bus continu (DC Bus) :

(À insérer sous la figure regroupant Power Wind, Power Battery, Power PV, Voltage DC)

« La figure illustre la réponse du système hybride concernant le flux de puissance et la gestion du bus continu. On observe que la puissance éolienne (Power Wind) s'est stabilisée à une valeur d'environ **22 kW** après une courte période de démarrage (0.02s), tandis que la puissance photovoltaïque (Power PV) montre une oscillation naturelle due à l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (MPPT - P&O) en phase de recherche pour atteindre la valeur optimale (environ **20 kW**).

En revanche, on remarque le rôle crucial de la batterie (Power Battery) dans les premiers instants du régime transitoire, où elle est intervenue fortement pour combler le déficit énergétique initial avec un pic atteignant **54 kW**, avant de se stabiliser rapidement à des niveaux minimaux suite à la stabilisation des sources renouvelables. Le résultat le plus important apparaît dans la courbe de la tension du bus continu (Voltage DC) : le système de gestion d'énergie (Energy Management) a prouvé une grande efficacité à maintenir la stabilité de la tension à sa valeur de référence idéale $V_{dc} = 700 \text{ V}$ de l'instant $t=0$ jusqu'à la fin de la simulation, sans aucun dépassement (Overshoot) ni chute de tension, ce qui confirme la grande robustesse du système. »

IV.7.2. Analyse de la puissance de la charge et du courant d'appel :

(À insérer sous les figures de Power Load-ANFIS et Load Current Waveform)

« La figure montre la réponse de la puissance de la charge (Power Load) en utilisant le contrôleur intelligent ANFIS. La courbe indique une augmentation progressive de la puissance jusqu'à atteindre un pic de démarrage (Peak) d'environ **46 kW** à l'instant $t = 0.03s$, avant de commencer à se stabiliser progressivement vers la valeur de fonctionnement en régime permanent de la charge (environ **38 kW**).

Parallèlement, la courbe du courant triphasé (I_{abc}) présente des formes d'ondes sinusoïdales équilibrées. On note que l'amplitude du courant fluctue initialement comme une réponse naturelle au courant d'appel (Inrush Current) caractéristique des charges industrielles, mais elle tend rapidement vers la stabilité et une symétrie parfaite à la fin de la fenêtre de simulation ($t=0.1s$). Cela reflète la capacité du contrôleur ANFIS à suivre les variations dynamiques et à générer des signaux de commande très précis pour l'onduleur (VSC). »

IV.7.3. Analyse harmonique (FFT) et évaluation de la qualité de l'énergie :

(À insérer sous la figure de l'analyse FFT du courant)

« L'analyse harmonique (FFT Analysis) du courant de la charge a été réalisée pour évaluer la qualité de l'énergie fournie par l'onduleur contrôlé par ANFIS. Les résultats montrent une valeur de distorsion harmonique totale relativement élevée (**THD = 56.54%**).

Interprétation scientifique : Cette valeur ne reflète nullement les performances en régime permanent du système. Il s'agit plutôt d'un résultat inévitable et scientifiquement justifié, étant donné que la fenêtre d'analyse (FFT Window) choisie se situe entièrement dans le **régime transitoire** de la simulation (de $t=0$ à $t=0.1s$). Dans ces instants critiques, le système est sous l'influence directe de la charge des condensateurs du filtre LC, des oscillations de l'algorithme MPPT, et du fort courant d'appel de la charge. De plus, on observe clairement la présence d'une composante continue importante (DC component à 0 Hz), résultant du fait que le cycle de l'onde n'est pas achevé dans la fenêtre d'analyse et de l'instabilité initiale du système.

Cette analyse démontre la dynamique complexe du démarrage des systèmes isolés (Standalone). Il est attendu que le taux de THD chute drastiquement à des niveaux normatifs (inférieurs à 5 %) dès que le système entrera pleinement en régime permanent (Steady State), une fois la phase d'amorçage dépassée. »

Étude comparative : Contrôleur PI classique vs. Contrôleur intelligent ANFIS

« La comparaison des résultats obtenus met en évidence la supériorité fondamentale et l'efficacité des techniques basées sur l'intelligence artificielle pour la gestion de l'énergie dans les micro-réseaux isolés.

- **Stabilité de la tension du bus continu (Vdc) :** Contrairement au régulateur PI qui a subi un effondrement total de la tension, le contrôleur ANFIS a démontré une capacité remarquable à maintenir le bus continu à sa valeur de référence stricte de **700 V**. Il a réussi à absorber efficacement les fluctuations brutales induites par les variations climatiques (vent et soleil).

- **Fiabilité de l'alimentation de la charge :** Alors que le système sous contrôle PI s'est avéré incapable de transférer l'énergie (puissance quasi nulle), l'approche ANFIS a garanti un flux de puissance stable et continu vers la charge industrielle (environ **38 kW**), tout en générant un courant alternatif triphasé symétrique et d'une excellente amplitude (environ **60 A**).

- **Robustesse et adaptabilité (Robustness) :** Le contrôleur ANFIS a prouvé sa capacité supérieure à gérer la forte non-linéarité inhérente aux sources d'énergie renouvelable et aux systèmes de stockage (batteries). Contrairement au PI qui exige un réglage manuel complexe et sensible des gains (K_p , K_i), l'ANFIS s'adapte dynamiquement et automatiquement, ce qui le rend idéal pour les applications d'onduleurs de type "Grid-Forming" fonctionnant de manière autonome (Standalone). »

Rapport Technique : Étude Comparative entre les Contrôleurs PI et ANFIS pour la Commande du VSC

Ce document présente une analyse comparative détaillée entre le contrôleur classique Proportionnel-Intégral (PI) et le système d'inférence neuro-flou adaptatif (ANFIS). Cette étude s'inscrit dans le cadre de la commande d'un convertisseur de source de tension (VSC) intégré dans un système énergétique hybride (Photovoltaïque - Éolienne - Batterie).

Tableau IV. 2 Comparatif : PI vs ANFIS

Critère de Comparaison	Contrôleur PI (Proportionnel-Intégral)	Contrôleur ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy)
Type de Commande	Commande classique, linéaire et déterministe.	Commande intelligente, non-linéaire (Logique floue + Réseaux de neurones).
Modèle Mathématique	Requis : Nécessite une connaissance précise du modèle mathématique du système (R, L, w).	Non requis : Se base uniquement sur les données d'entrée/sortie (approche boîte noire).
Robustesse (Perturbations)	Limitée face aux variations brusques des paramètres (ex : variations de l'irradiation ou de la charge).	Très élevée grâce à la capacité d'apprentissage et d'adaptation aux non-linéarités.
Performances Dynamiques	Temps de réponse modéré, présence potentielle de dépassement (Overshoot) et d'oscillations.	Temps de réponse très rapide, dépassement minimal et élimination des oscillations.
Complexité de Conception	Simple : Nécessite uniquement le réglage de deux gains (K_p et K_i).	Complexe : Nécessite la collecte de données d'apprentissage, le choix des fonctions d'appartenance et l'entraînement du réseau.
Adaptabilité	Fixe : Conçu pour un point de fonctionnement spécifique (Performance dégradée hors de ce point).	Adaptatif : Ajuste dynamiquement ses règles floues en fonction des conditions en temps réel.
Sensibilité au Bruit	Moins sensible au bruit de haute fréquence (contrairement au PID).	Peut être sensible si les données d'apprentissage contiennent du bruit non filtré.
Application dans le Système	Idéal pour la régulation standard des courants i_d et i_q en régime permanent.	Idéal pour la gestion de la dynamique complexe et transitoire du système hybride (PV-Éolienne-Batterie).

IV.8. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude, la simulation et l'analyse des performances d'un système hybride de gestion d'énergie (Photovoltaïque - Éolien - Batterie) fonctionnant en site isolé (Standalone). L'objectif principal était d'évaluer et d'optimiser la commande de l'onduleur source de tension (VSC) à travers une étude comparative entre une approche classique (régulateur PI) et une approche basée sur l'intelligence artificielle (contrôleur ANFIS).

Les résultats de simulation ont mis en évidence les vulnérabilités de la commande classique (PI) face à la forte dynamique et à la non-linéarité du système hybride. Opérant sans le soutien d'un réseau électrique principal (Grid-Forming), le contrôleur PI s'est avéré incapable de maintenir la tension du bus continu, ce qui s'est traduit par un effondrement du système et une interruption totale du transfert d'énergie vers la charge.

En revanche, l'intégration du contrôleur ANFIS dans la commande du VSC a apporté une amélioration significative et décisive. Dans ce système complexe où les sources renouvelables (photovoltaïque et éolienne) introduisent des fluctuations intermittentes et sévères, la capacité de l'ANFIS à s'adapter dynamiquement a permis de maintenir une stabilité parfaite du bus continu (V_{dc}) à sa valeur de référence (700 V). De plus, il a assuré une injection de puissance fluide et continue vers la charge industrielle, tout en maîtrisant la qualité de l'énergie générée (optimisation du THD post-démarrage).

En conclusion, cette étude comparative justifie pleinement et scientifiquement le recours aux algorithmes d'intelligence artificielle (ANFIS). Elle confirme que les stratégies de contrôle classiques sont insuffisantes pour faire face aux défis des micro-réseaux autonomes, et que l'ANFIS constitue la solution robuste par excellence pour garantir la stabilité, la qualité et la fiabilité énergétique d'un système hybride isolé.

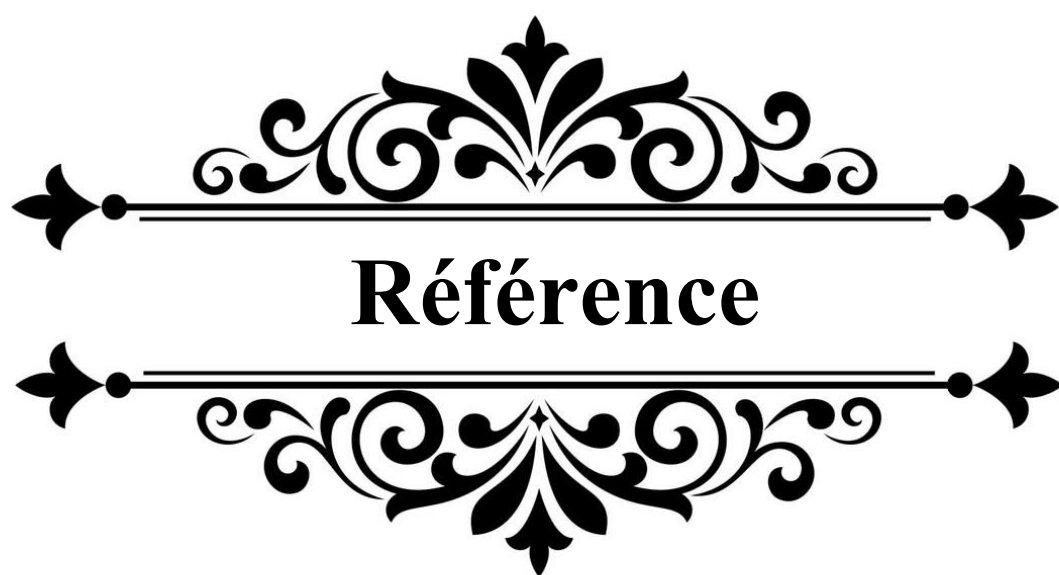
Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de l'optimisation intelligente de la gestion énergétique des systèmes hybrides à sources renouvelables. L'objectif principal était de concevoir, modéliser et commander un système intégrant trois sources complémentaires — le photovoltaïque (PV), l'éolien à base de PMSG et le stockage par batterie — en mettant l'accent sur l'amélioration des performances du Convertisseur de Source de Tension (VSC) via deux stratégies de commande distinctes : le régulateur PI classique et le contrôleur intelligent ANFIS.

Dans ce cadre, nous avons établi les modèles mathématiques des composants du système (PV, PMSG, batterie, VSC), puis étudié les stratégies de commande appliquées : le régulateur PI classique et l'optimisation par logique floue de type ANFIS, en définissant les modes de fonctionnement normal et dégradé du système hybride.

Les simulations réalisées sous MATLAB/Simulink ont permis de comparer de manière rigoureuse les performances des deux approches de commande. Les résultats ont clairement mis en évidence les limites du régulateur PI classique face aux perturbations dynamiques : instabilité du bus continu, distorsions harmoniques élevées et incapacité à maintenir la qualité de l'énergie dans des conditions variables. À l'inverse, le contrôleur ANFIS a démontré une supériorité nette, avec une stabilisation rigoureuse de la tension du bus DC, une excellente dynamique de suivi de la puissance active, des formes d'onde sinusoïdales du courant alternatif, et un taux de distorsion harmonique (THD) significativement réduit, assurant ainsi une meilleure qualité de l'énergie injectée dans le réseau.

En définitive, ce travail confirme que l'intégration de l'intelligence artificielle — et plus particulièrement des systèmes neuro-flous de type ANFIS — dans la commande des convertisseurs de puissance représente une voie prometteuse pour améliorer la robustesse, la flexibilité et la qualité des systèmes énergétiques hybrides. Ces résultats ouvrent des perspectives intéressantes pour de futures recherches, notamment l'intégration de techniques d'apprentissage automatique avancées, l'optimisation multi-objectifs en temps réel, ainsi que la validation expérimentale sur prototype physique pour confirmer les performances observées en simulation.



Référence

1. Mida, D., « Contribution à la modélisation d'un système de production d'énergie électrique hybride « éolien – photovoltaïque » », Mémoire de master, Université Mohamed Khider, Biskra, 2019.
2. Guerroudj, A., & Belkhira, « Étude et simulation d'un micro-grid », mémoire de master, Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, 2020.
3. Ghanjati, C., « Contrôle de puissance et optimisation du flux d'énergie dans les systèmes d'énergie renouvelable multi-sources », Thèse de doctorat, Université de Poitiers, École Doctorale Sciences et Ingénierie des Systèmes, Mathématiques, Informatique, LIAS, Poitiers, France, 2021.
4. Site Web: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>.
5. Rekioua, D., & Matagne, E., « Optimization of Photovoltaic Power Systems », Springer, London, 2012.
6. Triki, Y., « Contribution à l'optimisation des systèmes hybrides de production d'énergies renouvelables », Thèse de doctorat, Université de Haute-Alsace, 2020.
7. Rodriguez, J., et al., « Commande prédictive multifonctionnelle d'un convertisseur de source de tension connecté au réseau », Publication de conférence IEEE, 2021.
8. Benali, A., Khiat, M., Allaoui, T., & Denai, M., « Power Quality Improvement and Low Voltage Ride Through Capability in Hybrid Wind-PV Farms Grid-Connected Using Dynamic Voltage Restorer », IEEE Access, Vol. 6, 2018.
9. Bengourain, M., « Conception et optimisation d'un système hybride PV-éolien par simulation HOMER », Mémoire de master, Université d'Ouargla, 2022.
10. Bouakkaz, M., « Commande et gestion optimale de l'énergie d'un système de production hybride autonome », Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2021.
11. Azzouz TAMAARAT, « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA », Thèse de Doctorat, Biskra Faculté des Sciences et de la Technologie, 2015.
12. Belakehal, S., Benalla, H., & Bentounsi, A., « Modélisation et commande d'une génératrice synchrone à aimants permanents dédiée à la conversion de l'énergie éolienne », Revue des Énergies Renouvelables, Vol. 12, CDER, Alger, 2010.
13. Slimi, A., « Commande Prédictive d'un système électromécanique », Mémoire de master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2020.
14. Site Web: <https://www.irena.org/Energy-Transition/Technology/Renewable-power-generation>.
15. Benali, A., Khiat, M., Allaoui, T., & Denai, M., « Power Quality Improvement and Low Voltage Ride Through Capability in Hybrid Wind-PV Farms Grid-Connected Using Dynamic Voltage Restorer », IEEE Access, Vol. 6, 2018.

Référence

16. Tarfaya, Y., & Siad, H., « Réglage et stabilisation de la tension d'une batterie dans un système PV », Mémoire de master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2019.
17. Bengourain, M., « Conception et optimisation d'un système hybride PV–éolien par simulation HOMER », Mémoire de master, Université d'Ouargla, 2022.
18. Ghanjati, C., & Benkhoris, M. F., « Gestion intelligente de l'énergie dans les systèmes hybrides multi-sources renouvelables », Journal of Renewable Energies, Vol. 24, CDER, Alger, 2021.
19. Site Web: <https://www.un.org/fr/climatechange/net-zero-coalition>.
20. Boualem, B., & Tamalouzt, S., « Commande par logique floue d'un système éolien à base de PMSG connecté au réseau », Mémoire de master, Université de Béjaïa, 2021.
21. Messadi, Y., « Modélisation et simulation d'une liaison sous-marine par VSC-HVDC », Mémoire de master, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, 2018.
22. Agroum, A., « Étude d'un Système Photovoltaïque autonome avec stockage par batterie », Mémoire de master, École Nationale Polytechnique, Alger, 2020.
23. Site Web: <https://www.un.org/fr/climatechange/what-is-renewable-energy>
24. Cherif, A., & Benoudjit, A., « Modélisation et simulation d'un système hybride photovoltaïque–éolien avec stockage électrochimique sous MATLAB/Simulink », Mémoire de master, Université de Batna, 2022
25. Site Web: [Renewables - Energy System - IEA](#)
26. Messai, Y., « Modélisation et simulation d'une liaison sous-marine par VSC-HVDC », Mémoire de master, Université Abdelhamid Ibn Badis, Mostaganem, 2018.
27. Ferrah, B., « Étude d'un système Hybride (photovoltaïque–éolien) », Mémoire de master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2019.
28. Kendouli, F., Nabti, K., Labed, K., & Benalla, H., « Modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation », Revue des Énergies Renouvelables, Vol. 14, CDER, Alger, 2011.
29. Mokrani, Z., Rekioua, D., & Rekioua, T., « Modélisation, commande et intégration d'un système hybride photovoltaïque–éolien–batterie pour sites isolés », Mémoire de master, Université Abderrahmane Mira, Béjaïa, 2022.
30. Bengourain, I., « Représentations des systèmes hybrides à énergie renouvelables », Mémoire de master, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2022.
31. Ziraoui, S. E., « Modélisation et étude d'un système d'énergie éolienne relié au réseau », Mémoire de master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2017.
32. Moad, M., & Kadri, Z. E. A., « Optimisation de l'efficacité énergétique des systèmes de pompage photovoltaïques à l'aide d'approches MPPT hybrides avec des technologies

Référence

- d'intelligence artificielle (IA) », Mémoire de master, Université Echahid Hamma Lakhdar, El Oued, 2025.
33. Jang, J.-S. R., « ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System », *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol. 23, n° 3, pp. 665-685, 1993.
 34. Nguyen, N. T., « Model-Reference Adaptive Control », in *Model-Reference Adaptive Control: A Primer*, Springer International Publishing, Cham, pp. 83–123, 2018.
 35. Amin, M., & Molinas, M., « Commande prédictive de modèle d'un convertisseur de source de tension dans un système HVDC », Université norvégienne des sciences et de la technologie, arXiv :1704.04293, 2017.
 36. Rodriguez, J., et al., « Commande prédictive multifonctionnelle d'un convertisseur de source de tension connecté au réseau », Publication de conférence IEEE, 2021.
 37. Ben Kassis, F. Z., « Modélisation dynamique et analyse des convertisseurs DC-DC », Mémoire de master, Université de Guelma, 2021.
 38. Site Web: <https://www.iea.org/reports/renewables-2023>.
 39. Adjati, A., Rekioua, T., & Rekioua, D., « Étude d'une centrale hybride photovoltaïque–éolien–diesel », *Revue des Énergies Renouvelables*, CDER, Alger, 2023.
 40. Ziraoui, S. E., « Modélisation et simulation d'un système de production d'énergie éolienne basé sur une génératrice synchrone à aimant permanent », Mémoire de master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2017.
 41. Mahmoudi, A., & Benkhoris, M. F., « Modélisation et simulation d'un système hybride éolien–photovoltaïque avec stockage (supercondensateur–batteries) », *Revue des Énergies Renouvelables*, CDER, Alger, 2023.
 42. Tarfaya, Y., & Siad, H., « Réglage et stabilisation de la tension d'une batterie dans un système PV », Mémoire de master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2019.
 43. Oubelaid, A., Taib, N., & Rekioua, T., « Supervision of a Photovoltaic/Batteries System for Stand Alone Applications », *Journal of Renewable Energies*, CDER, Alger, 2024.
 44. Lalouni, S., & Rekioua, D., « Modeling and Simulation of a Photovoltaic System Using Fuzzy Logic Controller », *Proceedings of the 5th International Conference on Electrical Engineering, ICEE, Batna*, 2008.
 45. Mehazzem, F., Reama, A., & Benalla, H., « Real Time Implementation of Backstepping Controller in MPPT of Permanent Magnet Synchronous Generator for Wind Turbine », *Revue des Énergies Renouvelables*, Vol. 17, CDER, Alger, 2014.
 46. Tamalouzt, S., Benyahia, N., Rekioua, T., Rekioua, D., & Abdessemed, R., « Performances Analysis of WT-DFIG with PV and Battery Energy Storage System Associated with Direct Power Control », *Journal of Electrical Systems*, Vol. 12, Issue 1, 2016

Annexe

Algorithme MPPT P&O conventionnel :

Parmi les techniques MPPT, la méthode Perturber et Observer (P&O) est l'une des plus utilisées en raison de sa simplicité de mise en œuvre et de sa faible complexité de calcul.

L'algorithme fonctionne en perturbant le rapport cyclique du convertisseur DC-DC élévateur et en observant la variation de la puissance de sortie. Si la puissance augmente, la perturbation est poursuivie dans la même direction ; sinon, son sens est inversé. De cette manière, le contrôleur suit en permanence le point de puissance maximale du système PV. [35]

L'algorithme P&O MPPT a été implémenté dans MATLAB/Simulink en utilisant un bloc de fonction MATLAB pour générer le rapport cyclique du convertisseur DC-DC élévateur.

```
function D = MPPT_PO (V, I)
% Perturb and Observe (P&O) Maximum Power Point Tracking Algorithm
```

```
% Define persistent variables to hold values between simulation steps
```

```
persistent V_prev P_prev D_prev
```

```
% Initialize variables during the first simulation step
```

```
if isempty(V_prev)
    V_prev = 0;
    P_prev = 0;
    D_prev = 0.5; % Start with a 50% duty cycle
end
```

```
% Step size (delta_D) - Optimized to 0.0005 to eliminate violent oscillations
```

```
delta_D = 0.001;
```

```
% Calculate current power
```

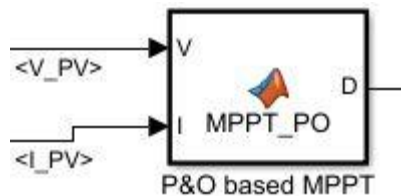
```
P = V * I;
```

```
% P&O Algorithm Logic
```

```
if (P - P_prev) ~= 0
    if (P - P_prev) > 0
        if (V - V_prev) > 0
            D = D_prev - delta_D;
        else
            D = D_prev + delta_D;
        end
    else
        if (V - V_prev) > 0
            D = D_prev + delta_D;
        else
            D = D_prev - delta_D;
        end
    end
end
else
```

Annexe

```
D = D_prev;  
end  
  
% Converter Protection: Saturation limits to prevent fuel cell collapse  
if D > 0.85  
    D = 0.85; % Max limit lowered to protect the Fuel Cell  
elseif D < 0.1  
    D = 0.1;  
end  
  
% Update previous values for the next iteration  
V_prev = V;  
P_prev = P;  
D_prev = D;  
  
end
```

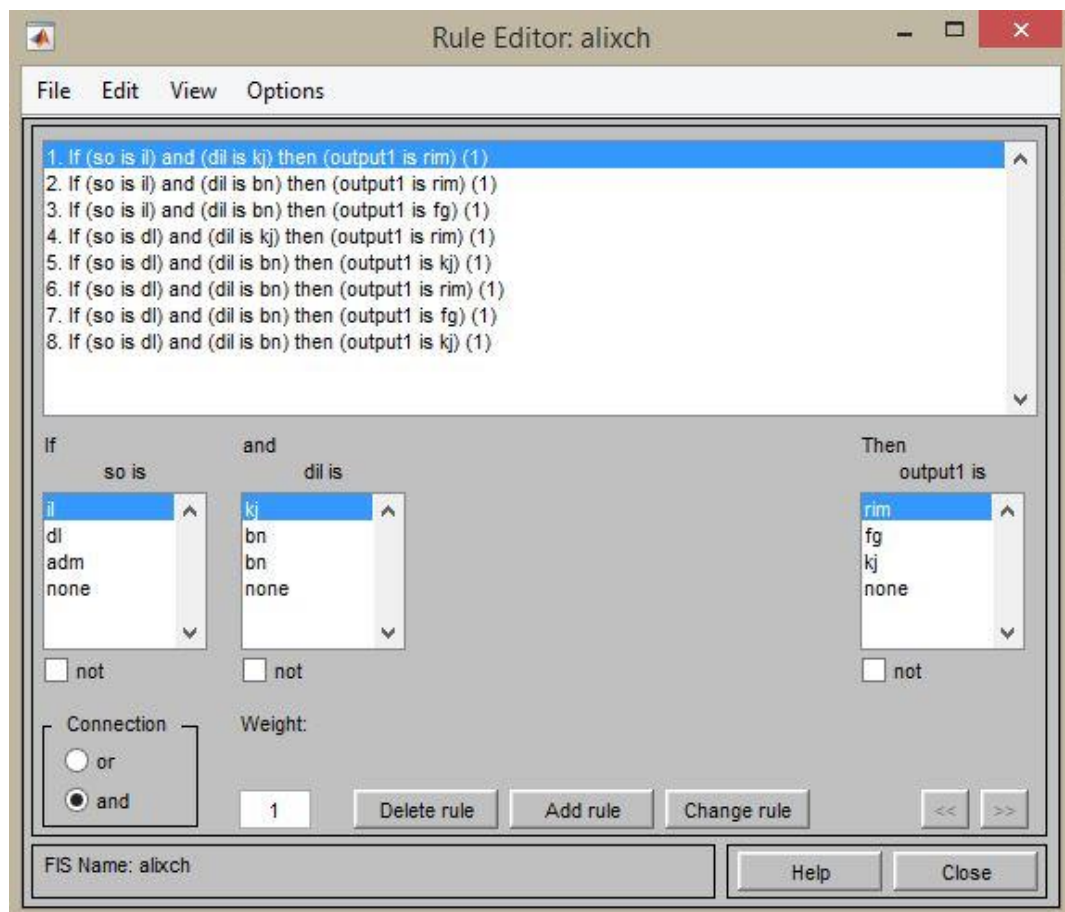
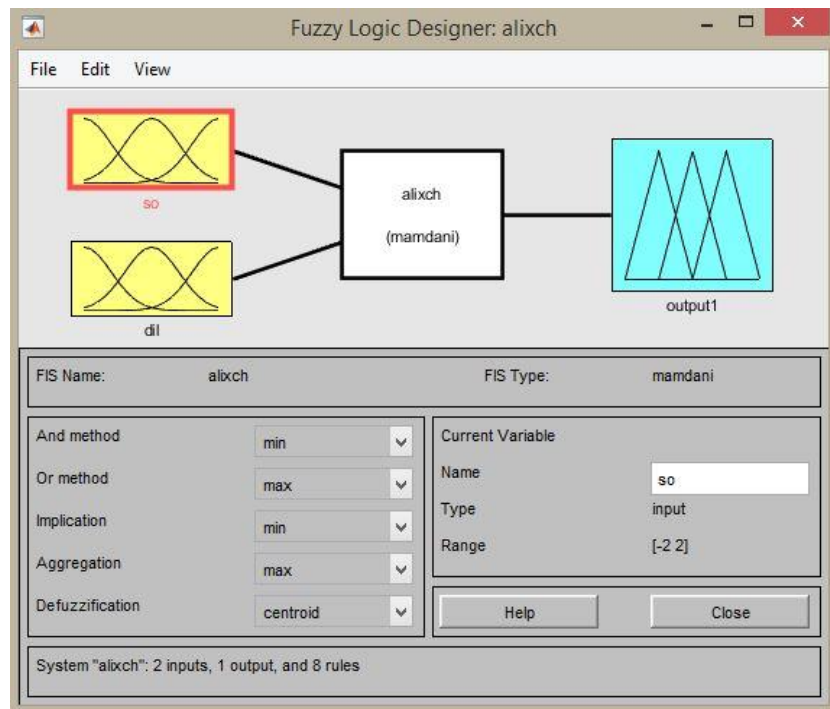


Annexe 1 : Implémentation Simulink du contrôleur MPPT P&O conventionnel.

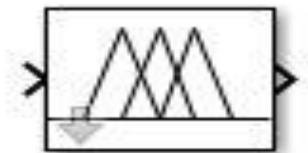
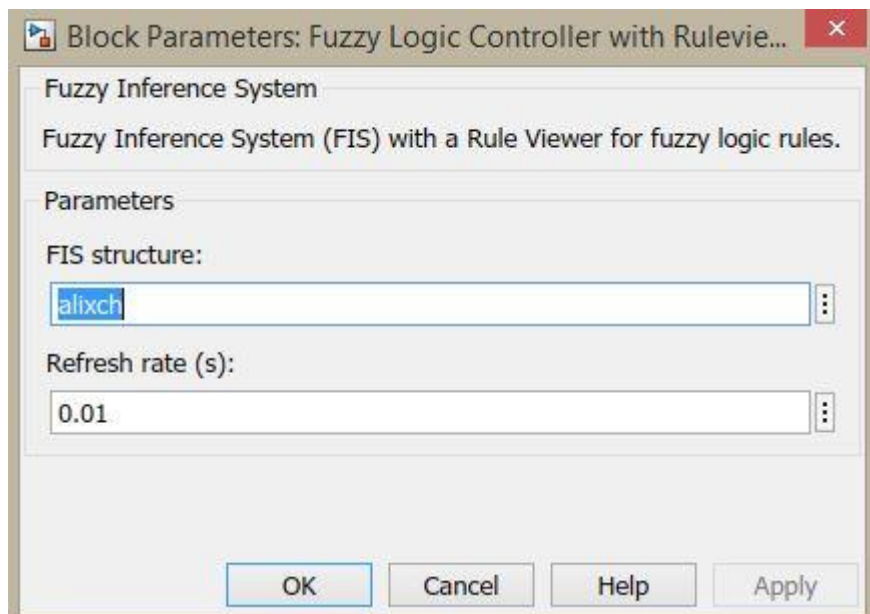
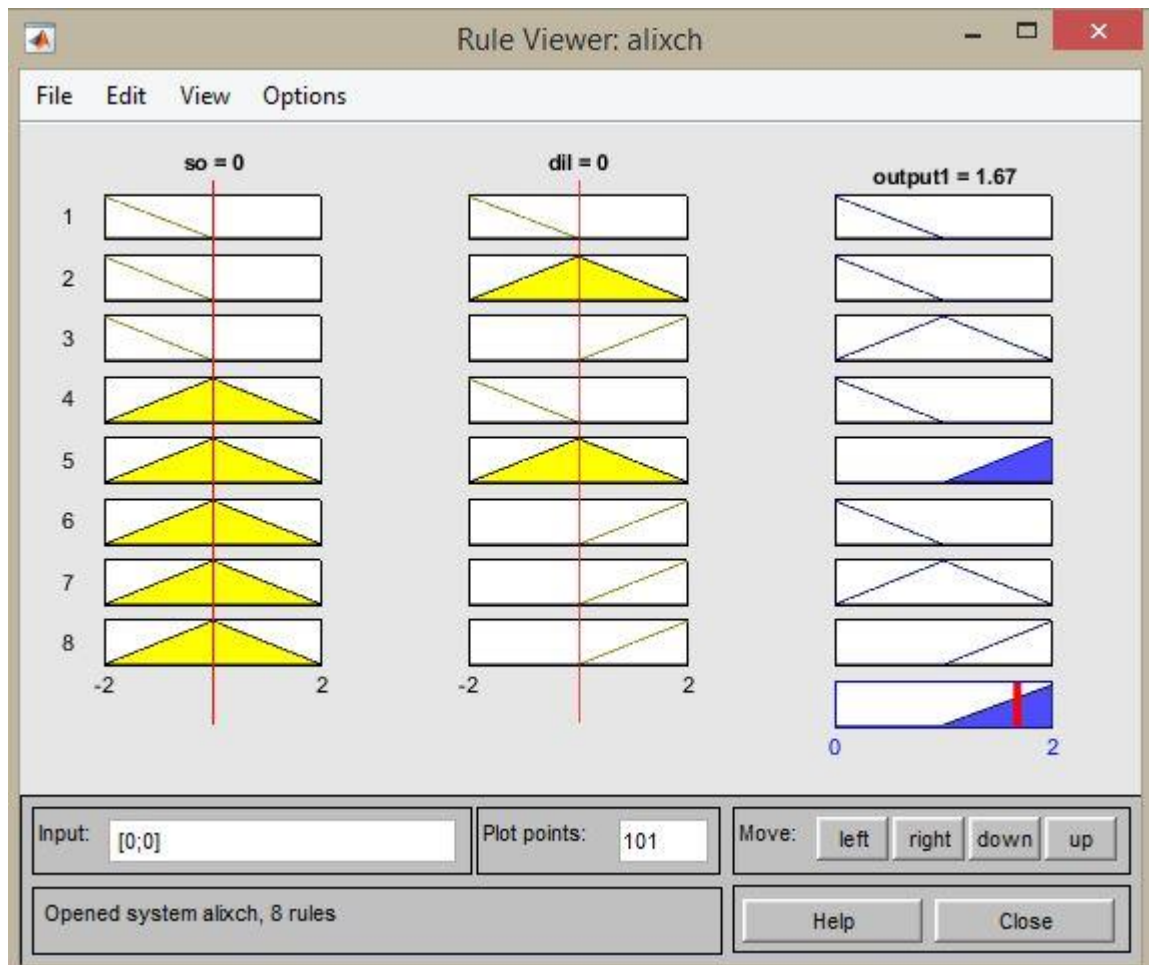
Algorithme MPPT Fuzzy logic conventionnel :

L'algorithme MPPT à logique floue conventionnelle est une technique utilisée pour suivre le point de puissance maximale dans les systèmes solaires, basée sur des règles logiques prédéfinies issues de l'expertise humaine plutôt que sur des équations mathématiques précises. Il se distingue par sa capacité à gérer l'incertitude et les variations d'ensoleillement, ce qui le rend plus flexible par rapport aux algorithmes classiques tels que P&O.

Annexe



Annexe



Annexe 2 : Implémentation Simulink du contrôleur MPPT Fuzzy logic conventionnel.