

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Badji Mokhtar Annaba University

Université Badji Mokhtar –

Annaba

Faculté de Technologie

Département d'Electromécanique



جامعة باجي مختار –
عنابنة

كلية التكنولوجيا

قسم الكهروميكانيك

Thèse

Présentée pour obtenir le diplôme de

Doctorat LMD

Département : Electromécanique

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Par :

BOUTHIBA Youssouf

Thème :

Optimisation et gestion de l'énergie électrique d'un système hybride (éolienne/photovoltaïque) basée sur la commande optimale

Proposition du Jury :

Qualité	Grade	Nom	Prénom	Rattachement
Président :	Pr	CHEGHIB	Hocine	UBMA
Rapporteur :	Pr	BELHAMRA	Ali	UBMA
Examineur :	MCA	OUADA	Mehdi	UBMA
Examineur :	MCA	DEKHAN	Azzedine	ENSTI- Annaba
Examineur :	MCA	DJEMANA	Mohamed	ENSTI- Annaba

Année Universitaire : 2025 /2026

الملخص

يتمثل العمل المنجز في هذه الأطروحة في دراسة نظامين من أنظمة الطاقة الهجينة المتصلة بالشبكة الكهربائية، بحيث يتكون النظام المقترح الأول من مصادر متجددة (نظام كهروضوئي/طاقة الرياح/خلية الوقود) بالإضافة إلى نظام تخزين الطاقة الهجين (بطارية/المكثف الفائق) و لحماية الأخير من الشحن الزائد تم إدماج نظام حمل التفريغ (حالتنا مقاومة)، أما بالنسبة للنظام المقترح الثاني فيتكون من مصادر متجددة ومصدر تقليدي احتياطي (نظام كهروضوئي/طاقة الرياح/خلية الوقود/مولد الديزل) بالإضافة إلى نظام تخزين الطاقة الهجين (بطارية/المكثف الفائق)، و لإستخراج أقصى قدر من الطاقة من نظام كهروضوئي/طاقة الرياح تم تطبيق تقنية MPPT.

يعتبر نظام إدارة الطاقة في الأنظمة الهجينة أمراً ضرورياً وذلك بسبب التغيرات التي تطرأ عليها، وفي هذا الصدد لتحقيق الإدارة المثلى لكلا النظامين الهجينين وتوفير الطاقة اللازمة للشبكة الكهربائية في ظل التغيرات المناخية والطلب على الطاقة، تم اقتراح و تصميم نظام إدارة الطاقة يعتمد كل منهما على تقنية الذكاء الاصطناعي والتي هي بمثابة المساهمة الرئيسية في هذه الأطروحة، بحيث تمت إدارة الطاقة بالنسبة للنظام المقترح الأول من خلال تصميم إستراتيجيتين و هما إستراتيجية إدارة الطاقة الكلاسيكية (SGEC) و إستراتيجية إدارة الطاقة الذكية (SGEI) التي تعتمد على المتحكم المنطق الغامض (FLC) بحيث تعمل على معالجة عيوب الاستراتيجية الكلاسيكية بالإضافة إلى مقارنتهما و توضيح أوجه الاختلاف بينهما. أما بالنسبة للنظام المقترح الثاني تمت إدارة طاقته من خلال تصميم إستراتيجية إدارة الطاقة الذكية الهجينة (SGEIH) التي تتركب من المتحكم المنطق الغامض ومتحكم الشبكة العصبية الذكية (FLC-ANN).

بالنسبة لجانب الشبكة، لتحسن جودة تدفق الطاقة في الشبكة تم التحكم في الطاقة الفاعلة والمتفاعلة من خلال تطبيق التحكم المباشر للطاقة على أساس تحكم وضع الإنزلاق من الدرجة الثانية (DPC-SOSMC) و التحكم المباشر للطاقة على أساس المتحكم المنطق الغامض (DPC-FLC) على النظام الأول والثاني على التوالي. وفي النهاية تمت محاكاة كلا النظامين في برنامج ماتلاب سيميلينك حيث أظهرت النتائج مدى فعالية وكفاءة المتحكمات المقترحة.

الكلمات المفتاحية: أنظمة الطاقة الهجينة، نظام تخزين الطاقة الهجين، إستراتيجية إدارة الطاقة الكلاسيكية، إستراتيجية إدارة الطاقة الذكية، إستراتيجية إدارة الطاقة الذكية الهجينة، المتحكم المنطق الغامض-متحكم الشبكة العصبية الذكية ، التحكم المباشر للطاقة، تحكم وضع الإنزلاق من الدرجة الثانية، المتحكم المنطق الغامض.

Abstract

The work done in this thesis consists of studying two hybrid energy systems connected to the electrical grid, where the first proposed system consists of renewable sources (photovoltaic/wind/fuel cell) in addition to a hybrid energy storage system (battery/supercapacitor) and to protect the latter from overcharging a dump load (in our case a resistor) was integrated, As for the second proposed system, it consists of renewable sources and a backup conventional source (PV/wind/fuel cell/diesel generator) in addition to a hybrid energy storage system (battery/supercapacitor). To extract the maximum amount of energy from the PV/wind system, MPPT technique was applied.

The energy management system in hybrid systems is essential due to the changes that occur in them. In this regard, to achieve the optimal management of both hybrid systems and provide the necessary energy to the electrical grid in light of climate changes and energy demand, an energy management system was proposed and designed, each of which is based on artificial intelligence technique, which is the main contribution of this thesis. So that the energy management for the first proposed system was done by designing two strategies, namely the classical energy management strategy (CEMS) and the intelligent energy management strategy (IEMS) which is based on the fuzzy logic controller (FLC) in order to address the shortcomings of the classical strategy in addition to comparing them and clarifying the differences between them. As for the second proposed system, its energy was managed by designing a hybrid intelligent energy management strategy (HIEMS) that consists of a fuzzy logic controller and an intelligent neural network (FLC-ANN).

For the grid side, to improve the power flow quality in the grid, the active and reactive power are controlled by applying direct power control based on second-order sliding mode control (DPC-SOSMC) and direct power control based on fuzzy logic controller (DPC-FLC) on the first and second systems respectively. Finally, both systems were simulated in MATLAB Simlink, where the results showed how the effectiveness and efficiency of the proposed controllers.

Keywords: *HES, HESS, CEMS, IEMS, HIEMS, FLC-ANN, DPC, SOSMC, FLC.*

Résumé

Le travail effectué dans cette thèse consiste à étudier deux systèmes des systèmes énergétiques hybrides connectés au réseau électrique, Ainsi le premier système proposé est constitué de sources renouvelables (système photovoltaïque/énergie éolienne/pile à combustible) en plus d'un système de stockage d'énergie hybride (batterie/supercapacité), et pour protéger cette dernière de la surcharge, un système de délestage a été intégrée (notre cas est résistance), Quant au deuxième système proposé, il se compose de sources renouvelables et d'une source de secours traditionnelle (système photovoltaïque/énergie éolienne/pile à combustible/générateur diesel) en plus d'un système de stockage d'énergie hybride (batterie/supercondensateur). Pour extraire un maximum d'énergie d'un système photovoltaïque/éolien, la technique MPPT est appliquée.

Le système de gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides est considéré comme nécessaire en raison des changements qui s'y produisent, À cet égard, pour parvenir à une gestion optimale des deux systèmes hybrides et fournir l'énergie nécessaire au réseau électrique compte tenu des changements climatiques et de la demande énergétique, un système de gestion de l'énergie a été proposé et conçu, chacun basée sur la technique de l'intelligence artificielle, qui sert de principale contribution à cette thèse. Ainsi, la gestion de l'énergie a été réalisée pour le premier système proposé en concevant deux stratégies, qui sont la stratégie de gestion de l'énergie classique (SGEC) et la stratégie de gestion de l'énergie intelligente (SGEI), qui basée sur le contrôleur à logique floue (CLF), vise à combler les lacunes de la stratégie classique en plus de les comparer et de clarifier les différences entre elles. Quant au deuxième système proposé, son énergie a été gérée grâce à la conception d'une stratégie de gestion de l'énergie intelligente hybride (SGEIH), composée d'un contrôleur à logique floue et d'un contrôleur à réseau neuronal intelligent (CLF-CRNA).

Pour le côté réseau, pour améliorer la qualité du flux d'énergie dans le réseau, la puissance active et réactive a été contrôlée en appliquant un contrôle de puissance direct basé sur un contrôleur à mode glissant de second ordre (DPC-SOSMC) et un contrôle de puissance direct basé sur un contrôleur à logique floue (DPC-FLC) Sur les premier et deuxième systèmes, respectivement. Enfin, les deux systèmes ont été simulés dans Matlab Simlink, et les résultats ont montré quelle l'efficacité et l'efficience des contrôleurs proposés.

Mots clés : *SEH, SSEH, SGEC, SGEI, SGEIH, CLF-CRNA, Contrôle de Puissance Direct, Contrôleur à Mode Glissant de Second Ordre, Contrôleur à Logique Floue*

Dédicace

*Je dédie cette thèse à ma famille, mes professeurs, mes amis
et à tous ceux qui m'ont soutenu dans mon parcours
académique et scientifique*

Remerciements

*A l'occasion de l'achèvement de ce modeste travail de
préparation d'une thèse de doctorat, je voudrais remercier
tous ceux qui m'ont conseillé et guidé dans mon parcours
académique et scientifique*

BOUTHIBA Youssouf

NOMENCLATURE

ACRONYMES

SGEC : Stratégie de Gestion d'Energie
Classique

SGEI : Stratégie de Gestion d'Energie
Intelligente

SGEIH : Stratégie de Gestion d'Energie
Intelligente Hybride

CLF : Contrôle Logique Floue

CRNA : Contrôle Réseau Neuronal
Artificiel

SEH : Système Energétique Hybride

SERH : Système d'Energie Renouvelable
Hybride

SSEH : Système de Stockage d'Energie
Hybride

PV : Système Photovoltaïque

PàC : Pile à Combustible

GD : Générateur Diésel

SC : Supercondensateur

GSAP : Génératrice Synchrone à Aimant
Permanent

FC : Fuel Cell

AC : Alternatif Courent

DC : Direct Curent

SOC : State Of Charge

PWM : Pulse Width Modulation

MPPT : Maximum Power Point Tracking

PPM : Point de Puissance Maximale

TSR : Tip Speed Ratio

P & O : Perturb & Observe

SOSMC : Second Order Sliding Mode
Control

DPC : Dricet Power Control

PI : Proportionnelle Intégrale

ANFIS : Adaptive Neuro-Fuzzy Inference
System

SMC: Sliding Mode Control

MPC : Model Predictive Control

FLC: Fuzzy Logic Control

ANN : Artificial Neural Network

FOPI : Fractional Order Proportional
Integral

THD : Total Harmonic Distortion

Symboles

P_{max} : Puissance Maximale

I_{mp}: Courant de PPM

V_{mp} : Tension de PPM

I_{pv}: Courant généré par la lumière

I₀: Courant de saturation de la diode

R_s: Résistance série de la cellule PV

R_p: Résistance parallèle de la cellule PV

α : Constante de diode
 V_t : Tension de jonction thermique
 N_s : Nombre de la cellule PV en série
 N_{ser} : Nombre de modules en série
 N_{par} : Nombre de modules parallèles
 S : Surface de la cellule solaire
 ϕ : Flux incident
 v : Vitesse du vent
 R : Rayon de la turbine
 $\Omega_{turbine}$: Vitesse de la turbine
 S : Surface circulaire balayée par la turbine
 ρ : Masse volumique de l'air
 λ : Coefficient de vitesse spécifique
 λ_{opt} : Vitesse spécifique optimale du rotor de la turbine
 β : l'angle d'inclinaison de la pale.
 C_t : Coefficient de couple
 C_p : Coefficient de puissance
 J : L'inertie totale ramenée sur l'arbre du générateur.
 J_t : L'inertie de la turbine,
 G : Gain du multiplicateur
 J_g : L'inertie de la génératrice.
 C_{em} : Couple électromagnétique du générateur
 C_g : Couple du multiplicateur
 C_f : Couple de frottement
 T_e : Couple produit par la génératrice électrique
 f : Coefficient de frottement
 φ_f : flux des aimants permanents par pôle
 V_{fc} : Tension de la pile à combustible

i_{fc} : Courant de la pile à combustible
 $I_{éolien}$: Courant du générateur éolien
 I_{pv} : Courant du générateur photovoltaïque
 I_{PaC} : Courant d'une pile à combustible
 I_{GD} : Courant du générateur diesel
 $V_{dc-mesuré}$: Tension mesurée du bus DC
 $V_{dc-référence}$: Tension de référence du bus DC
 i_{net} Courant de net
 $i_{bat-ref}$ Courant de référence de la batterie
 i_{sc-ref} Courant de référence du supercondensateur
 K_d : Commutateur d'un système de délestage
 $K_{rés}$: Commutateur d'un réseau électrique
 $K_{éol}$: Commutateur d'un système éolien
 K_{pv} : Commutateur d'un système photovoltaïque
 K_{GD} : Commutateur générateur diesel
 SOC_{bat} : L'état de charge de la batterie
 SOC_{sc} : L'état de charge du supercondensateur
 $SOC_{bat-max}$: L'état de charge maximale de la batterie
 SOC_{sc-max} : L'état de charge maximale du supercondensateur
 $SOC_{bat-min}$: L'état de charge minimale de la batterie
 SOC_{sc-min} : L'état de charge minimale du supercondensateur
 D : Rapport cyclique
 V_{vent} : Vitesse de vent

P_r : Puissance active de réseau électrique
 Q_r : Puissance réactive de réseau électrique
 $P_{éolien}$: Puissance de système éolien
 P_{pv} : Puissance de système photovoltaïque
 $P_{PàC}$: Puissance d'une pile à combustible
 P_{GD} : Puissance de générateur diesel
 $P_{batterie}$: Puissance de la batterie
 P_{sc} : Puissance du supercondensateur
 $P_{demandée}$: Puissance demandée
 P_{net} : Puissance de net
 $P_{rés}$: Puissance de réseau électrique

List des Figures ET Tableaux

List des Figures

Chapitre I

Fig.I.1. L'énergie éolienne.....	26
Fig.I.2. L'énergie solaire photovoltaïque et solaire thermique.....	27
Fig.I.3. L'énergie d'hydraulique.....	27
Fig.I.4. L'énergie de la biomasse.....	28
Fig.I.5. L'énergie de la géothermie.....	28
Fig.I.6. L'énergie de l'hydrogène.....	29
Fig.I.7. Évolution historique de l'énergie renouvelable	30
Fig.I.8. Système d'énergie hybride	31
Fig.I.9. Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	32
Fig.I.10. Les étapes pour former le champ photovoltaïque	32
Fig.I.11. Étapes de production d'électricité grâce à un système d'énergie éolienne	34
Fig.I.12. Types de système d'énergie éolienne	34
Fig.I.13. Composants de base d'une éolienne à axe horizontal.....	35
Fig.I.14. Générateur diesel.....	37
Fig.I.15. Batterie électrochimique	37
Fig.I.16. Supercondensateur	38
Fig.I.17. Système de volant d'inertie.....	38
Fig.I.18. Différents types de systèmes de stockage d'énergie individuels	39
Fig.I.19. Différents types de systèmes de stockage d'énergie hybrides	39
Fig.I.20. Système d'énergie hybride autonome.....	40
Fig.I.21. Schéma graphique d'un système d'énergie hybride connectée au réseau électrique	41
Fig.I.22. Schéma graphique d'un système d'énergie hybride connectée au réseau électrique et la charge	41
Fig.I.23 Schéma graphique d'un micro-réseau hybride.....	42

Chapitre II

Fig.II.1. La structure du 1 ^{ère} système d'énergie hybride proposée	49
Fig.II.2. La structure du 2 ^{ème} système d'énergie hybride proposée	49
Fig.II.3. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	49
Fig.II.4. Système PV sur Matlab Simlink.....	50
Fig.II.5. Caractéristiques I(V) et P(V) d'un system PV.....	51

Fig.II.6. Caractéristiques I-V d'un system PV ($T = \text{variable}$; $G = 1000 \text{w/m}^2$) et ($T = 25^\circ\text{C}$; $G = \text{variable}$)	52
Fig.II.7. Structure générale du système éolien proposé	52
Fig.II.8. Coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique	54
Fig.II.9. Schéma bloc de la turbine éolienne	55
Fig.II.10. Représentation de la MSAP dans le repère naturel.....	56
Fig.II.11. Représentation de la MSAP dans le repère de Park.....	57
Fig.II.12. Circuit équivalents du MSAP	57
Fig.II.13. Schéma de principe de fonctionnement de la pile à combustible PEM.....	58
Fig.II.14. Schéma équivalent de la pile à combustible	60
Fig.II.15. Système de stockage d'énergie hybride proposé.....	61
Fig.II.16. Circuit équivalent de la batterie	61
Fig.II.17. Circuit équivalent d'un supercondensateur	63
Fig.II.18. Circuit équivalent d'un convertisseur parallèle	64
Fig.II.19. Circuit équivalent d'un convertisseur parallèle en S à l'état fermé.....	65
Fig.II.20. Circuit équivalent d'un convertisseur parallèle en S à l'état ouvert.....	65
Fig.II.21. Circuit équivalent d'un convertisseur bidirectionnel	66
Fig.II.22. Schéma équivalent d'un redresseur triphasé parallèle	67
Fig.II.23. Tension triphasé redressée	67
Fig.II.24. Schéma principale d'un onduleur de tension connecté au réseau électrique	68
Fig.II.25. Schéma équivalent d'un bus continu dans le 1 ^{ère} système proposé	68
Fig.II.26. Schéma équivalent d'un bus continu dans le 2 ^{ème} système proposé	69

Chapitre III

Fig.III.1. Structure de gestion de la 1 ^{ère} system hybride proposé	73
Fig.III.2. Structure de gestion de la 2 ^{ème} system hybride proposé	74
Fig.III.3. Structure générale de contrôle d'un système éolienne	75
Fig.III.4. Caractéristiques de la puissance mécanique générée par la turbine en fonction de la vitesse du rotor.....	75
Fig.III.5. Un diagramme schématique du contrôleur MPPT pour un générateur d'énergie éolienne	76
Fig.III.6. La caractéristique de la fonction C_p par rapport à λ	76
Fig.III.7. Schéma bloc de la commande de la vitesse	77
Fig.III.8. Schéma bloc de la commande de courant.....	77
Fig.III.9. Vitesse du vent.....	78
Fig.III.10. Vitesse mécanique d'un système éolienne	78

Fig.III.11. Vitesse électrique d'un GSAP d'éolienne	78
Fig.III.12. Vitesse spécifique d'un système éolienne	78
Fig.III.13. Coefficient de puissance d'un système éolienne	78
Fig.III.14. Couple d'un système éolienne	78
Fig.III.15. Contrôle du courant d'un système éolienne	79
Fig.III.16. Puissance mécanique d'un système éolienne	79
Fig.III.17. Puissance électrique d'un système éolienne	79
Fig.III.18. Tension triphasé d'un GSAP	79
Fig.III.19. Courant triphasé d'un GSAP	79
Fig.III.20. Tension redressée d'un GSAP	79
Fig.III.21. Structure de contrôle du système PV	80
Fig.III.22. Principe de suivi du point de puissance maximale	81
Fig.III.23. Organigramme de l'algorithme de contrôle P & O	82
Fig.III.24. Irradiation solaire	83
Fig.III.25. Température ambiant	83
Fig.III.26. Tension d'un système PV	83
Fig.III.27. Courant d'un système PV	83
Fig.III.28. Puissance d'un système PV	83
Fig.III.29. Unité de contrôle d'un système pile à combustible	85
Fig.III.30. Organigramme de la stratégie de gestion d'énergie classique	85
Fig.III.31. Le schéma d'une stratégie de gestion d'énergie basée sur un contrôleur classique	86
Fig.III.32. Structure de contrôle du réseau électrique	86
Fig.III.33. Schéma boucle d'un contrôle de puissance active et réactive basée sur DPC-SOSMC	88
Fig.III.34. Schéma boucle d'un contrôle de puissance active et réactive basée sur DPC-FLC	89

Chapitre IV

Fig.IV.1. Profil de la puissance demandée	95
Fig.IV.2. Profil de l'irradiation solaire	96
Fig.IV.3. Profil de la température ambiante	96
Fig.IV.4. Profil de la vitesse du vent	96
Fig.IV.5. Puissance produite par les sources d'un système d'énergie hybride	97
Fig.IV.6. Schéma fonctionnel d'une stratégie de gestion basée sur le contrôle prédictif (MPC)	98

Fig.IV.7. Schéma fonctionnel d'une stratégie de gestion basée sur le contrôle en mode glissant (SMC)	98
Fig.IV.8. Schéma fonctionnel d'une stratégie de gestion basée sur le contrôle logique floue (FLC).....	99
Fig.IV.9. Schéma fonctionnel d'une stratégie de gestion basée sur le réseau neuronal artificiel (ANN)	99
Fig.IV.10. Schéma fonctionnel d'une stratégie de gestion basée sur le système d'inférence neuro-flou adaptatif intelligent (ANFIS)	100
Fig.IV.11. Structure d'une stratégie de gestion de l'énergie basée sur un CLF-FOPI	101
Fig.IV.12. Structure d'une unité de gestion de contrôle de la logique floue	102
Fig.IV.13 Fonctions d'appartenance d'un courant i-net.....	103
Fig.IV.14. Fonctions d'appartenance d'une SOC de la batterie.....	103
Fig.IV.15. Fonctions d'appartenance d'une SOC de la SC	103
Fig.IV.16 Fonctions d'appartenance à la vitesse du vent	104
Fig.IV.17 Fonctions d'appartenance à l'irradiation solaire G	104
Fig.IV.18 Fonctions d'appartenance d'une température T	104
Fig.IV.19. Fonctions d'appartenance d'un courant de référence de la batterie ibat-ref.....	105
Fig.IV.20. Fonctions d'appartenance d'un courant de référence de la SC isc-ref.....	105
Fig.IV.21. Fonctions d'appartenance de l'interrupteur du délestage (K_d)	105
Fig.IV.22. Fonctions d'appartenance de l'interrupteur du réseau électrique (K_rés).....	106
Fig.IV.23. Fonctions d'appartenance de l'interrupteur du éolien (K_éolien).....	106
Fig.VI.24. Fonctions d'appartenance de l'interrupteur du PV (K_pv)	106
Fig.IV.25. Diagramme schématique du contrôle de l'unité FOPID	108
Fig.IV.26. Organigramme proposé du système de gestion intelligente de l'énergie	110
Fig.IV.27. Mode de fonctionnement 1 du SEH proposé.....	111
Fig.IV.28. Mode de fonctionnement 2 du SEH proposé.....	111
Fig.IV.29. Mode de fonctionnement 3 du SEH proposé.....	111
Fig.IV.30. Mode de fonctionnement 4 du SEH proposé.....	111
Fig.IV.31. Mode de fonctionnement 5 du SEH proposé.....	111
Fig.IV.32. Mode de fonctionnement 6 du SEH proposé.....	111
Fig.IV.33. Mode de fonctionnement 7 du SEH proposé.....	112
Fig.IV.34. Mode de fonctionnement 8 du SEH proposé.....	112
Fig.IV.35. Mode de fonctionnement 9 du SEH proposé.....	112
Fig.IV.36. Mode de fonctionnement 10 du SEH proposé.....	112
Fig.IV.37. Puissances du système énergétique hybride.....	114
Fig.IV.38. Puissance d'un système photovoltaïque	117

Fig.IV.39. Puissance d'un système éolien	117
Fig.IV.40. Puissance d'un système pile à combustible.....	117
Fig.IV.41. Puissance de la batterie.....	118
Fig.IV.42. Puissance du supercondensateur	119
Fig.IV.43. Puissance d'un système délestage	119
Fig.IV.44. État de charge de la batterie	119
Fig.IV.45. État de charge du supercondensateur	120
Fig.IV.46. Tension de Bus-DC	120
Fig.IV.47. Puissance active du réseau électrique.....	122
Fig.IV.48. Puissance réactive du réseau électrique.....	122
Fig.IV.49. Courant du réseau électrique et THD pour la phase a.....	123

Chapitre V

Fig.V.1. Profil de la puissance demandée.....	126
Fig.V.2. Profil de l'irradiation solaire	126
Fig.V.3. Profil de la température ambiante.....	126
Fig.V.4. Profil de la vitesse du vent.....	126
Fig.V.5. Puissance produite par les sources d'un système d'énergie hybride	127
Fig.V.6. Diagramme représentant une stratégie de gestion de l'énergie basée sur un CLF-CRNA (FLC-ANN)	128
Fig.V.7. première unité de gestion (FLC).....	129
Fig.V.8 Les fonctions d'appartenance de la puissance nette.....	130
Fig.V.9. Fonctions d'appartenance au SOC de la batterie et SC	130
Fig.V.10. Fonctions d'appartenance de $K_{M_{1,2,3,4,5,6,7}}$	130
Fig.V.11. Principe de fonctionnement du réseau de neurones artificiels.....	132
Fig.V.12. Structure de l'unité CRNA proposé.....	133
Fig.V.13. L'étape d'entraînement (formation) de l'unité CRNA.....	133
Fig.V.14. Performances de régression et validation de l'unité CRNA	134
Fig.V.15 Organigramme proposé du système de gestion intelligente hybride (CLF-CRNA) de l'énergie.....	135
Fig.V.16. Mode de fonctionnement 1 du SEH proposé.....	136
Fig.V.17. Mode de fonctionnement 2 du SEH proposé.....	136
Fig.V.18. Mode de fonctionnement 3 du SEH proposé.....	136
Fig.V.19. Mode de fonctionnement 4 du SEH proposé.....	136
Fig.V.20. Mode de fonctionnement 5 du SEH proposé.....	136
Fig.V.21. Mode de fonctionnement 6 du SEH proposé.....	136

Fig.V.22. Mode de fonctionnement 7 du SEH proposé.....	137
Fig.V.23. Puissances du système énergétique hybride	139
Fig.V.24. Puissances net	139
Fig.V.25. État de charge de la batterie.....	139
Fig.V.26. État de charge du supercondensateur.....	139
Fig.V.27. Tension de Bus-DC.....	139
Fig.V.28. Puissance de la batterie	140
Fig.V.29. Puissance du supercondensateur.....	140
Fig.V.30. Puissance active du RE.....	140
Fig.V.31. Puissance réactive du RE.....	140
Fig.V.32. Phase a de courant du RE	141
Fig.V.33. THD de la phase a de courant du RE.....	141

List des Tableaux

Chapitre I

Tableau.I.1. Types de cellules photovoltaïques	32
Tableau.I.2. Les avantages et les inconvénients des éoliennes à axe vertical à axe horizontal	34
Tableau.I.3. Différents types de piles à combustible et leurs caractéristiques	36
Tableau.I.4. Classification des SEH par gamme de puissance	40
Tableau.I.5. Projets programmées d'énergie solaire hybride en Algérie	44
Tableau.I.6. Diverses technologies d'énergies renouvelables hybrides et leurs applications ..	44

Chapitre III

Tableau III.1. Règles CLF appliquées au MPPT-PV.....	82
Tableau III.2. Règles CLF appliquées au DPC.....	90

Chapitre IV

Tableau IV.1 Ensemble typique de règles de contrôleur à logique floue conçues pour SERH	107
Tableau IV.2 Règles pour plusieurs modes de fonctionnement du SEH proposé	112
Tableau IV.3 Comparaison des processus de temps de charge et de décharge SSEH utilisant SGEC (Classique-PI) et SGEI (CLF-FOPI)	120
Tableau IV.4 Analyse des avantages et des inconvénients de chaque approche (SGEC et SGEI) en termes de performances et de complexité.....	121

Chapitre V

Tableau V.1. Règles utilisées dans l'unité CLF	131
--	-----

Table des Matières

المُلخَص	1
Abstract.....	2
Résumé	3
Dédicace	4
Remerciements	4
NOMENCLATURE.....	5
List des Figures ET Tableaux	8
Table des Matières	14

Introduction Générale

0. Introduction Générale	21
0.1 Contexte	21
0.2 Problématique.....	21
0.3 L'objectif de la recherche	22
0.4 Structure de la thèse	23

Chapitre I : Etat de l'art et contexte de l'étude

I.1 Introduction	25
I.2 La diversité des sources d'énergie	25
I.2.1 Les énergies non-renouvelables [I.5]	25
I.2.2 Les énergies renouvelables	26
I.2.2.1 Définition des énergies renouvelables.....	26
I.2.2.2 Les différents types d'énergies renouvelables	26
I.2.3 Évolution historique de l'énergie renouvelable [I.19].....	29
I.2.4 Intermittence et prévision des sources d'énergie renouvelables	30
I.3 Introduction à l'énergie hybride.....	30
I.3.1 Définitions et Concepts Fondamentaux	30
I.4 Principaux Composants des Systèmes Hybrides	31
I.4.1 Générateurs d'énergie renouvelable	31
I.4.1.1 Générateur photovoltaïque	31
I.4.1.2 Générateur éolien	33
I.4.1.3 Pile à combustible	36
I.4.2 Générateurs d'énergie conventionnelle	36

I.4.2.1 Générateur diesel [I.13].....	36
I.4.3 Stockage d'énergie	37
I.4.3.1 Différents types de Stockage d'énergie	37
I.4.3.2 Systèmes de stockage d'énergie individuels et hybrides	38
I.5 Technologies et Architectures des Systèmes Energétiques Hybrides.....	40
I.5.1 Système d'énergie hybride autonome	40
I.5.2 Système d'énergie hybride connectée au réseau.....	41
I.5.3 Micro-réseaux hybride	41
I.6 Avantages et Enjeux associés aux Systèmes Hybrides	42
I.6.1 Avantages associés aux Systèmes Hybrides	42
I.6.2 Enjeux associés aux Systèmes Hybrides.....	42
I.7 Transition Énergétique et potentiels de l'Énergie Hybride en Algérie.....	43
I.7.1 L'Adoption de l'Énergie Hybride en Algérie [I.45].....	43
I.7.2 Comment l'Algérie Embrasse l'Énergie Hybride [I.46]	44
I.8 Réglementations, politiques et incitations	44
I.8.1 Initiatives gouvernementales et internationales [I.47]	44
I.8.1.1 Création et application	44
I.8.1.2 Renforcer la sensibilisation	45
I.8.2 Normes et protocoles pour l'intégration hybride.....	46
I.9 Conclusion	46

Chapitre II : Modélisation des composants du système hybride

II.1 Introduction	48
II.2 Descriptions des composantes les deux systèmes hybrides étudiés.....	48
II.3 Modélisation d'un système photovoltaïque.....	49
II.3.1 Modèle d'une cellule solaire photovoltaïque à une seule diode	49
II.3.3. Rendement énergétique maximum [II.4]	50
II.3.4 Simulation d'un système PV	50
II.3.4.1. Caractéristique I (V) et P(V).....	51
II.3.4.2. Influence de la température et du rayonnement sur les modules PV	51
II.4. Modélisation de générateur éolien	52
II.4.1. Composition du système de production éolienne	52
II.4.2. Générateurs utilisé dans le système d'éolien	52
II.4.3. Modèle d'éolienne.....	53
II.4.3.1. Le coefficient de puissance (power coefficient) C_p	53
II.4.3.2. Le coefficient de couple (torque coefficient) C_t	54

II.4.3.3. Modélisation de l'arbre.....	54
II.4.3.4. Modélisation de la turbine éolienne.....	55
II.4.4. Modélisation de la machine synchrone a aimant permanent.....	55
II.4.4.1. Équations électriques dans un repère naturel.....	55
II.4.4.2. Passage au repère de Park.....	56
II.4.4.3. Équation mécanique.....	57
II.5. Modélisation de la pile à combustible.....	57
II.5.1. Modélisation des réactions électrochimiques.....	57
II.5.2. Modélisation électrique.....	58
II.6. Modélisation de générateur diesel.....	61
II.7 Modélisation d'un system de stockage hybride (Batterie/SC).....	61
II.7.1 Modélisation de la batterie.....	61
II.7.1.1 L'état de charge de la batterie (SOC).....	62
II.7.2 Modélisation du Supercondensateur.....	63
II.7.2.1 L'état de charge du supercondensateur (SOC).....	64
II.8 Modélisations des convertisseurs de puissance.....	64
II.8.1. Modélisation du hacheur élévateur (Boost).....	64
II.8.2. Modèle du convertisseur bidirectionnel.....	66
II.8.3. Modélisation d'un redresseur triphasé à diodes non commandées.....	67
II.8.4. Modélisation de l'onduleur triphasé.....	68
II.9 Modélisation du bus continu.....	68
II.10. Modélisation du filtre de tension Rf -Lf.....	69
II.11 Modélisation d'un réseau électrique.....	70
II.12 Conclusion.....	70

Chapitre III : Description des approches de commande pour les deux SEHs «PV/éolienne / PàC/SSEH » et « éolienne /PV/PàC/GD/SSEH » connectée aux réseaux électrique

III.1. Introduction.....	72
III.2 Description du contrôle global des deux systèmes énergétiques hybrides proposés.....	72
III.2.1. Partie contrôle de la source.....	72
III.2.2. Partie contrôle de la gestion d'énergie.....	72
III.2.3 Partie contrôle du réseau électrique.....	73
III.3. Description de Stratégie de Commande pour le Système Hybride Éolien/Photovoltaïque basée sur un contrôleur classique.....	74
III.3.1. Approche de Commande pour le Système Éolien.....	74

III.3.1.1. Suivi du point de puissance maximale (MPPT) d'un system éolien [III.2]	75
III.3.1.2. Les défèrent Technique MPPT	76
III.3.1.3. MPPT par la méthode de lambda optimal (TSR)	76
III.3.1.4. Contrôle de la vitesse et du courant d'un système éolien.....	77
III.3.1.5 Résultats de simulation.....	77
III.3.2. Approche de Commande pour le Système Photovoltaïque.....	79
III.3.2.1. Suivi du point de puissance maximale (MPPT)	80
III.3.2.2 Les défèrent Technique MPPT	81
III.3.2.3. Technique de perturbation et d'observation (P & O).....	81
III.3.2.4.Technique de CLF	82
III.3.2.5. Résultats de simulation.....	83
III.4. Stratégies de commande du system de stockage d'énergie hybride et du bus continu. ..	84
III.4.1. Commande d'un system de stockage d'énergie hybride (Batterie/SC)	84
III.4.1.1. Commande de la batterie et du SC	84
III.4.2. Contrôleur du bus continu	84
III.4.2.1. Cas de stratégie classique de gestion d'énergie	84
III.4.2.2. Cas de stratégie intelligente de gestion d'énergie	84
III.5. Description de la stratégie de gestion d'énergie classique (SGEC)	85
III.6. Contrôle du convertisseur DC/AC côté réseau basée sur deux techniques	86
III.6.1.Description Contrôle du convertisseur DC/AC côté réseau basée sur technique DPC-SOSMC	87
III.6.1.1. Conception d'un contrôleur de la puissance active et réactive basé sur DPC-SOSMC.....	87
III.6.2. Description Contrôle du convertisseur DC/AC côté réseau basée sur technique DPC-FLC	89
III.6.2.1. Conception d'un contrôleur CLF	89
III.7. Conclusion	90
Chapitre IV : Simulation et Optimisation de gestion énergétique d'un 1^{ère} SEH proposé basé sur une stratégie d'intelligence artificielle	
IV.1. Introduction.....	92
IV.2. Critères d'optimisation du système hybride [IV.1]	92
IV.2.1. Coût de l'énergie	92
IV.2.2. Coût du cycle de vie (Life Cycle Cost (LCC))	93
IV.2.3. Probabilité de perte source d'énergie (Loss of Power Supply Probability (LPSP)).	93
IV.2.4. Probabilité de perte de charge (Loss of Load Probability (LOLP)).....	94
IV.3. Procédure de dimensionnement d'un système hybride proposée	95

IV.3.1. Profil de la charge	95
IV.3.2. Profil de rayonnement, de température et de vitesse du vent.....	95
IV.3.3. Energie produite par le système hybride.....	96
IV.6. Développement des stratégies de commande optimale de gestion d'énergie électrique adaptée au système hybride	97
IV.6.1. Stratégie de gestion basée sur le contrôle prédictif (MPC) [IV.4]	97
IV.6.2. Stratégie de gestion basée sur le contrôle en mode glissant (SMC) [IV.5]	98
IV.6.3. Stratégie de gestion basée sur le contrôle logique floue (FLC) [IV.6]	98
IV.6.4. Stratégie de gestion basée sur le réseau neuronal artificiel (ANN) [IV.7]	99
IV.6.5. Stratégie de gestion basée sur le système d'inférence neuro-flou adaptatif intelligent (ANFIS) [IV.8].....	99
IV.7. Élaboration d'une stratégie d'optimisation basée sur le contrôle logique floue pour la gestion de l'énergie électrique du 1 ^{er} système hybride proposé	100
IV.7.1. Identification des variables d'entrée et de sortie avec des fonctions d'appartenance pour l'unité de gestion CLF proposée.....	101
IV.7.2. Définition des règles floues pour la prise de décision	107
IV.7.3. Unité de contrôle FOPID	108
IV.8. Conception d'un algorithme de gestion de l'énergie pour le système hybride basé sur le contrôle logique flou (CLF)	109
IV.8.1. Adaptation de l'algorithme proposé pour tenir compte des variations des conditions météorologiques et des besoins du réseau électrique selon les différents modes de fonctionnement.....	111
IV.9. Implémentation des algorithmes d'optimisation dans un environnement de simulation « MATLAB SIMULINK »	113
IV.9.1. Identification des améliorations potentielles du système basées sur les résultats de la simulation	113
IV.9.2. Comparaison les résultats des deux approches proposées de gestion d'énergie électrique	116
IV.9.2.1. Section 1 : Côté Générateurs	116
IV.9.2.2. Section 2 : Côté Gestion (distribution et équilibre énergétique)	117
IV.9.3 Analyse des avantages et des inconvénients de chaque approche en termes de performances et de complexité côté gestion d'énergie électrique	121
IV.9.4 Analyse les résultats de la simulation côté réseaux électrique.....	122
IV.10. Conclusion	123
Chapitre V : Simulation et Optimisation de gestion énergétique d'un 2^{ème} SEH proposée basé sur une stratégie d'intelligence artificielle hybride	
V.1. Introduction.....	125
V.2. Procédure de dimensionnement d'un 2 ^{ème} système hybride proposée	125

V.2.1. Profil de la charge.....	125
V.2.2. Profil de rayonnement, de température et de vitesse du vent.....	126
V.2.3. Energie produite par le système hybride	126
V.3. Élaboration d'une (stratégie) technique hybride d'optimisation basée sur Contrôle Logique Floue (CLF)- Contrôle Réseau Neuronal Artificiel (CRNA) pour la gestion de l'énergie électrique du 2 ^{ème} système hybride proposé	127
V.3.1. Identification des variables d'entrée et de sortie avec des fonctions d'appartenance pour l'unité de gestion CLF proposée.....	129
V.3.2. Définition des règles floues pour la prise de décision.....	131
V.3.3 Contrôle de Réseau Neuronal Artificiel (CRNA) [V.1].....	131
V.3.3.1 Unité de CRNA proposé.....	132
V.3.3.2 Entraînement d'unité de CRAN proposé	133
V.3.3.3 Résultats de la formation CRAN	133
V.4. Conception d'un algorithme de gestion de l'énergie pour le système hybride basé sur le contrôle logique flou- Contrôle Réseau Neuronal Artificiel (CLF-CRNA)	134
V.4.1. Adaptation de l'algorithme proposé pour tenir compte des variations des conditions météorologiques et des besoins du réseau électrique selon les différents modes de fonctionnement.....	136
V.5. Implémentation du algorithme d'optimisation proposée dans un environnement de simulation « MATLAB SIMULINK »	137
V.5.1 Analyse les résultats de la simulation côté gestion d'énergie électrique	137
V.5.2 Analyse les résultats de la simulation côté réseaux électrique	140
V.6 Conclusion	141
Conclusion Générale.....	143
Références bibliographiques	145
ANNEXE.....	156

Introduction Générale

0. Introduction Générale

0.1 Contexte

L'augmentation significative de la consommation d'énergie au cours des dernières décennies a grandement contribué aux impacts environnementaux tels que la pollution, les émissions de gaz à effet de serre de dioxyde de carbone et le réchauffement climatique [0.1]. Près des trois quarts (75 %) de l'énergie utilisée dans le monde pour produire de l'électricité provient de combustibles fossiles, notamment le charbon, le pétrole et le gaz naturel [0.2]. Ce qui a provoqué un besoin croissant de sources d'énergie alternatives [0.3]. Qui sont représentées par des sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie de la biomasse, l'énergie hydraulique, l'énergie hydro-éolienne et l'énergie géothermique [0.4]. Cependant, il est difficile de maintenir une source d'électricité fiable grâce à ces sources renouvelables au fil du temps en raison de la demande énergétique variable et de sa nature imprévisible [0.5], entraînant des problèmes de qualité de l'énergie et un déséquilibre de tension dans le réseau [0.6]. Par conséquent, les sources d'énergie individuelles ne peuvent pas garantir un approvisionnement énergétique continu à la charge, et pour relever ce défi, un système hybride peut être créé en combinant deux ou plusieurs sources d'énergie (renouvelables/non renouvelables) [0.7]. Pour contrôler les systèmes énergétiques hybrides, une unité de gestion de l'énergie est intégrée à ces systèmes. L'objectif est de contrôler la distribution de l'énergie entre les éléments du système hybride, y compris les sources, les systèmes de stockage et de charge. L'application des techniques d'intelligence artificielle a été un domaine activement actif pour résoudre ces problèmes en raison de sa flexibilité et de sa capacité à gérer facilement des systèmes complexes [0.8].

0.2 Problématique

Fournir de l'énergie électrique aux régions éloignées ou au réseau grâce aux énergies renouvelables reste nécessaire afin de réduire la dépendance aux énergies fossiles. L'un des défis auxquels est confrontée l'exploitation de ces énergies, comme l'énergie solaire et éolienne, est le caractère aléatoire de la production d'énergie en raison des conditions climatiques à travers une source unique. La question est : comment résoudre le problème de l'intermittence de ces sources et assurer la continuité de l'approvisionnement en énergie de la charge ou du réseau ?

Pour résoudre le problème posé ci-dessus, deux ou plusieurs sources renouvelables/non renouvelables peuvent être combinées en plus des systèmes de stockage, formant ainsi un système hybride. Dans cette thèse, deux systèmes hybrides sont proposés, chacun étant connecté au réseau. Le premier système est constitué des éléments suivants ***PV/éolien/PàC/SSEH (Batterie/SC)***. Quant au deuxième système, il est constitué d'***éolien/PV/PàC/GD/SSEH (Batterie/SC)***

La question posée, considérée comme le cœur de cette thèse : Comment parvenir à une gestion optimale de ces deux systèmes malgré le changement climatique et la demande énergétique ?

La conception du système de gestion de l'énergie pour le système hybride fait partie des défis fondamentaux liés à l'exploitation optimale de l'énergie de ce dernier, afin que le système de gestion de l'énergie travaille à atteindre une répartition optimale de l'énergie entre les éléments du système énergétique hybride.

0.3 L'objectif de la recherche

L'objectif principal de cette thèse est de contribuer à parvenir à une gestion optimale en appliquant des techniques d'intelligence artificielle aux deux systèmes hybrides proposés comme suit :

- Pour le premier système, une gestion classique et une gestion intelligente basée sur ***CLF-FOPI (FLC-FOPI)*** ont été appliquées et comparées
- Pour le deuxième système, une gestion intelligente a été appliquée stratégie hybride qui basée sur ***CLF-CRNA (FLC-ANN)***

L'objectif de l'application des techniques d'intelligence artificielle proposées pour la gestion du flux d'énergie pour les deux systèmes est la suivante :

- Contrôler la charge et la décharge du système de stockage hybride de manière intelligente, ce qui ne peut être réalisé avec la technique classique.
- Assurer la continuité de l'approvisionnement en énergie du réseau électrique malgré les changements survenant dans le système (Changements dans la production et la demande d'électricité)
- Atteindre l'équilibre énergétique dans les deux systèmes en chargeant l'énergie en cas de surplus de production et en la déchargeant en cas de manque de production.
- Protéger le système de stockage hybride contre les décharges profondes et les surcharges.

0.4 Structure de la thèse

Le travail présenté dans cette thèse est divisé en cinq chapitres en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale, comme suit :

- **Chapitre I :** aborde l'Etat de l'art et contexte de l'étude en présentant quelques concepts généraux sur les énergies renouvelables ainsi que l'énergie hybride en plus des systèmes énergétiques hybrides...etc., et discutée également l'étude de la transition énergétique et le potentiel de l'énergie hybride en Algérie.
- **Chapitre II :** Ce chapitre aborde la modélisation des éléments des deux systèmes hybrides, tous deux connectés au réseau, de sorte que ces éléments incluent le système éolien, le système photovoltaïque, la pile à combustible et le générateur diesel comme sources d'énergie, la batterie et le supercondensateur comme système de stockage hybride, et le réseau électrique comme consommateur d'énergie, en plus des éléments de conversion d'énergie électrique (hacheurs, redresseur non commandée(AC/DC), convertisseur bidirectionnels (DC/DC)).
- **Chapitre III :** Ce chapitre discutée de la description des approches de contrôle appliquées aux composants des deux systèmes proposée, y compris le contrôle des sources, le système de stockage d'énergie hybride, la tension du bus DC et le réseau électrique, en plus du système de gestion de l'énergie basé sur la technique classique.
- **Chapitre IV :** Ce chapitre présente la simulation et l'optimisation de la gestion d'énergie pour un système hybride basée sur la stratégie d'IA en concevant une stratégie de gestion de l'énergie pour 1^{er} système hybride proposée (éolien/PV/PàC/batterie/SC) basé sur le contrôle de logique floue et l'intégration proportionnelle d'ordre fractionnaire (CLF-FOPI) pour obtenir une gestion optimale de l'énergie et comparé à la stratégie classique, en plus de discuter des résultats obtenus en contrôlant les deux côté (gestion et réseau).
- **Chapitre V :** Ce chapitre présente une stratégie hybride de gestion d'énergie basée sur l'intelligence artificielle, qui combine un Contrôleur Logique Flou (CLF) avec Réseau Neuronal Artificiel (CRNA)- (FLC-ANN) afin d'obtenir une gestion énergétique optimale pour le 2^{ème} système hybride proposé (éolienne / photovoltaïque / PàC /GD/batterie / SC), en plus de simuler le système proposé et de discuter des résultats obtenus à travers au contrôle côté gestion et contrôle côté réseau.

Chapitre I : Etat de l'art et contexte de l'étude

I.1 Introduction

La majorité de l'énergie dans le monde est actuellement produite à partir de combustibles fossiles via des centrales électriques, mais celles-ci ont des impacts négatifs sur l'environnement, notamment en contribuant au réchauffement climatique [I.1, I.2]. Afin de remédier à cette problématique, il est impératif de développer des sources d'énergie alternatives, telles que les énergies renouvelables. Ces dernières sont considérées comme des sources d'énergie propres, dépendant principalement de facteurs naturels tels que le soleil, le vent, etc., pour la production d'électricité.

Cependant, les sources d'énergie individuelles ne peuvent garantir un approvisionnement continu en raison de la demande énergétique variable et imprévisible et de sa nature imprévisible, pour résoudre ce problème, la création d'un système hybride est envisageable, impliquant la combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergie (renouvelables/non renouvelables) [I.3, I.4].

Dans ce chapitre, nous présenterons quelques concepts généraux sur les énergies renouvelables ainsi que sur l'énergie hybride. Nous examinerons ensuite les systèmes d'alimentation électrique hybrides, en explorant leurs différentes configurations qui alimentent le réseau électrique ou la charge, nous discutons également de l'étude de la transition énergétique et du potentiel de l'énergie hybride en Algérie.

I.2 La diversité des sources d'énergie

I.2.1 Les énergies non-renouvelables [I.5]

L'énergie fossile est le dépôt de matières organiques enfouies sous terre pendant une durée allant de 100 à 300 millions d'années sous forme d'hydrocarbures. De plus, cette énergie n'est pas renouvelable et se concentre sur trois sources principales :

- **Pétrole** : Il est formé par le dépôt de matières organiques présentes dans le milieu marin, notamment le plancton et les algues, de sorte qu'à une température comprise entre 50°C et 60°C, le kérogène résultant de l'influence des bactéries anaérobies de ces matières est partiellement transformé en huile, appelée pyrolyse.
- **Charbon** : Il s'agit de kérogène pyrolyse, composé principalement de carbone, mais pauvre en hydrogène. Elle est plus répandue dans les niveaux sédimentaires terrestres et est constituée uniquement de biomasse végétale (fougères, arbres, etc.).

- **Gaz naturel** : le gaz naturel est produit en convertissant la matière organique déposée dans le milieu marin sous des pressions et des températures plus élevées en kérogène, et la fermentation des bactéries présentes dans les sédiments organiques peuvent également produire du gaz naturel « biogénique » à faible profondeur.

I.2.2 Les énergies renouvelables

I.2.2.1 Définition des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables sont décentralisées et inépuisables, contrairement aux énergies fossiles qui sont limitées [I.6]. De plus, elles sont gratuites et disponibles sans limite, tout en étant respectueuses de l'environnement (énergie propre) [I.7]. Cela englobe toute l'énergie produite à partir du vent, du soleil, etc [I.7].

I.2.2.2 Les différents types d'énergies renouvelables

I.2.2.2.1 Energie éolienne

L'énergie éolienne fait partie des énergies renouvelables résultant du mouvement des masses d'air dans l'atmosphère [I.6], permettant la conversion de l'énergie du vent en énergie électrique par le biais d'un système d'énergie éolienne, lequel comprend des éléments de base tels qu'une turbine éolienne et un générateur électrique [I.8]. La Figure.I.1 présente comment produire de l'énergie électrique à partir d'un système d'énergie éolienne.

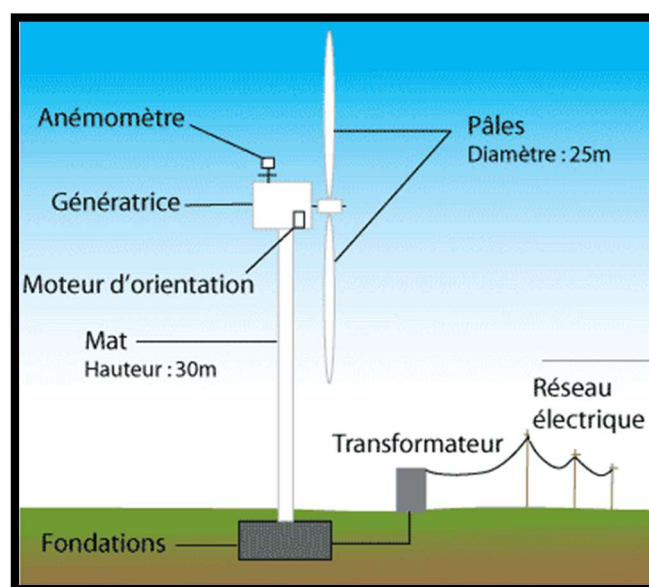


Fig.I.1. L'énergie éolienne [I.9].

I.2.2.2.2 Energie solaire

Le soleil fait partie des sources d'énergie, car il émet de l'énergie sous forme de rayonnement estimé à 90×10^{15} gigawatts [I.10]. Cette énergie peut être utilisée sous forme d'énergie solaire photovoltaïque et d'énergie solaire thermique, et il est important de souligner que cette énergie est une forme d'énergie renouvelable non polluante [I.7]. La Figure.I.2 montre comment exploiter respectivement l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie solaire thermique.

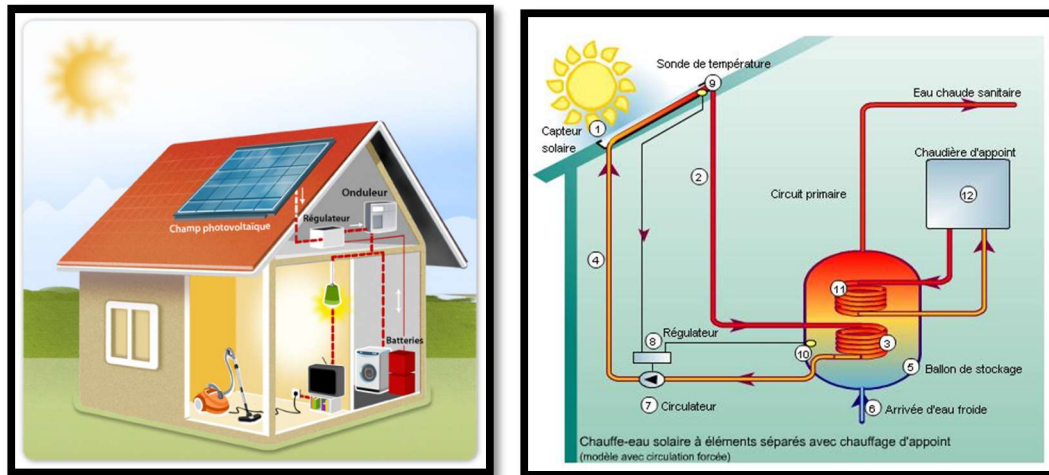


Fig.I.2. L'énergie solaire photovoltaïque et solaire thermique [I.11] [I.12].

I.2.2.2.3 Energie hydraulique

L'énergie hydraulique est considérée comme une source d'énergie propre, car sa production dépend de la conversion de l'énergie cinétique de l'eau derrière les barrages en énergie électrique, et la quantité de production de cette énergie est directement liée à la hauteur de la chute et au volume d'eau disponible [I.13]. Le principe de génération de cette énergie peut être illustré selon la Figure.I.3.

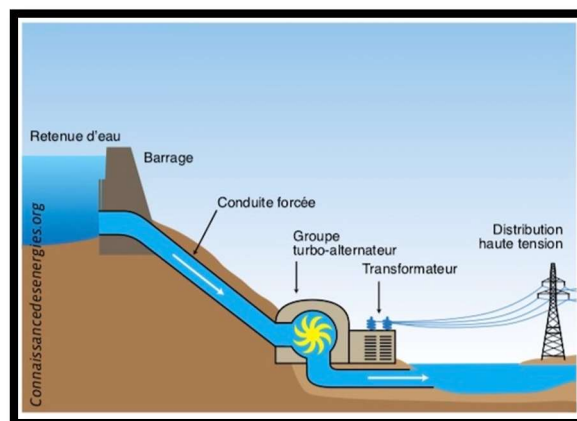


Fig.I.3. L'énergie d'hydraulique [I.14].

I.2.2.2.4 Energie Biomasse

La biomasse est considérée parmi les sources d'énergie renouvelables, constituée de matières organiques d'origine animale ou végétale (par exemple : déchets agricoles, bois, déjections animales) permettant de produire de l'électricité et de la chaleur, comme c'est le cas avec une chaudière à bois, grâce à sa combustion [I.15]. La Figure.I.4 présente comment produire de l'énergie électrique à partir de l'énergie de la biomasse.

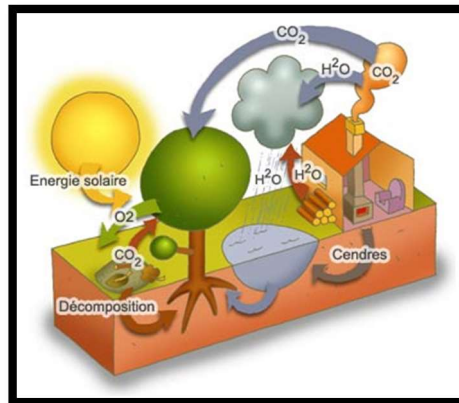


Fig.I.4. L'énergie de la biomasse [I.16].

I.2.2.2.5 Energie géothermie

La géothermie est une source d'énergie qui peut être utilisée pour produire de l'électricité ou pour le chauffage en puisant les calories existantes à l'intérieur de la terre ou des roches et en les amenant vers la surface [I.13]. La production d'énergie à partir de cette source est gratuite et ne dépend pas des facteurs climatiques, mais son installation est coûteuse [I.7]. La Figure.I.5 montre comment l'énergie géothermique est générée.

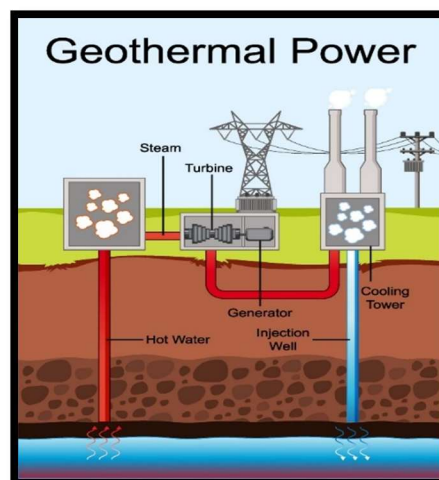


Fig.I.5. L'énergie de la géothermie [I.17].

I.2.2.2.6 Energie d'hydrogène

L'hydrogène est considéré comme une source d'énergie propre, car il peut être produit à partir de sources d'énergie respectueuses de l'environnement et peut être stocké et utilisé via des piles à combustible pour produire de l'énergie électrique, ce qui peut potentiellement remplacer les combustibles fossiles [I.13]. La Figure.I.6 représente la manière dont l'énergie électrique est générée à partir de l'hydrogène.

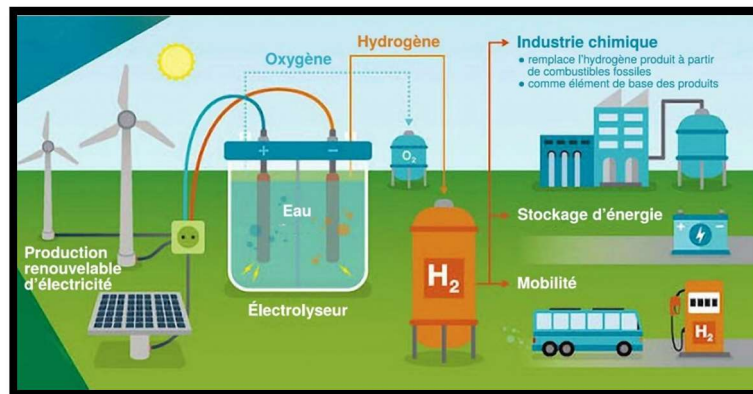


Fig.I.6. L'énergie de l'hydrogène [I.18].

I.2.3 Évolution historique de l'énergie renouvelable [I.19]

A travers le Programme des énergies renouvelables, l'Algérie cherche à consolider sa position dans les secteurs de l'énergie photovoltaïque et éolienne en utilisant la cogénération, la biomasse et l'énergie géothermique. Ces secteurs liés à l'énergie serviront de catalyseurs de croissance à long terme et créeront un nouveau modèle d'expansion économique.

D'ici 2030, 27 % de l'électricité produite pour la consommation nationale et 37 % de la capacité installée proviendront de sources renouvelables. L'énergie solaire représentant une grande partie du potentiel énergétique renouvelable du pays, l'Algérie considère cette énergie comme un instrument de développement économique et social, mais cela n'exclut pas la réalisation de projets pilotes liés à la géothermie, à la biomasse et à la cogénération, ainsi que le lancement de plusieurs propositions (Projets) Parc éolien.

L'approche de l'Algérie dans ce domaine vise à promouvoir un véritable secteur des énergies renouvelables, et le programme devrait répondre aux besoins en électricité du marché national. Le programme d'énergies renouvelables qui doit être mis en œuvre sur le marché national de 2015 à 2030 se caractérise par une capacité cible fixe de 22 mille mégawatts, répartie entre différents secteurs comme indiqué ci-dessous :

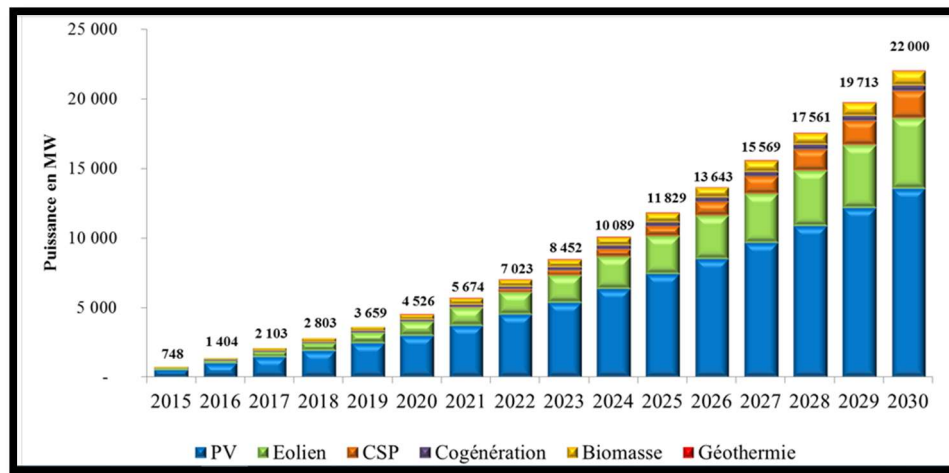


Fig.I.7 Évolution historique de l'énergie renouvelable

I.2.4 Intermittence et prévision des sources d'énergie renouvelables

Les changements climatiques font partie des défis auxquels sont confrontées les sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie éolienne et solaire, car ces changements entraînent une production d'énergie intermittente et non continue pour ces sources. Pour obtenir une production d'énergie continue et atténuer ce défi, certaines méthodes peuvent être utilisées, dont certaines sont mentionnées comme suit :

- **Prévision météorologique :** Dans le secteur de l'énergie solaire et éolienne, la prévision de la production s'appuie sur les données climatiques, afin que dans lequel est utilisé des prévisions à très court terme allant de quelques minutes à plusieurs jours pour dimensionner et la gestion des réseaux électriques et d'optimiser les transactions sur les marchés de l'électricité ainsi que les réserves [I.20] .
- **Hybridation des sources renouvelables :** L'objectif de la création d'un système énergétique hybride est d'assurer la continuité de l'énergie pour le consommateur sans interruption, ce système pouvant être connecté au réseau électrique ou indépendant de celui-ci [I.21].
- **Stockage d'énergie :** Le stockage d'énergie est important pour les sources d'énergies renouvelables en raison de leur nature relativement intermittente [I.22].

I.3 Introduction à l'énergie hybride

I.3.1 Définitions et Concepts Fondamentaux

Pour résoudre le problème de l'électricité intermittente et imprévisible produite par des sources d'énergie renouvelables, il est possible de connecter les sources d'approvisionnement et de créer ce que l'on appelle le système hybride (SH) pour assurer une production continue d'électricité en réalisant une optimisation du système de production d'électricité lorsque plusieurs sources

conventionnels et les sources renouvelables sont combinées - généralement des générateurs diesel [I.10][I.23]. La conception, qui concerne la taille et le type de composants, ainsi que l'architecture, ont un impact sur l'efficacité, les performances et la durée de vie du SHE [I.7].

Les systèmes d'énergie hybrides fonctionnent indépendamment comme des unités autonomes, fournissant de l'énergie aux zones isolées ou se connectant au réseau principal, ils peuvent également être interconnectés entre eux pour créer un micro-réseau [I.24]. La Figure.I.8 montre un schéma d'un système énergétique hybride composé d'une source renouvelable (PV) et d'une source conventionnelle (générateur diesel), combinées à des systèmes de stockage (batteries et ultra-condensateur) ainsi que les charges à alimenter en énergie nécessaire.

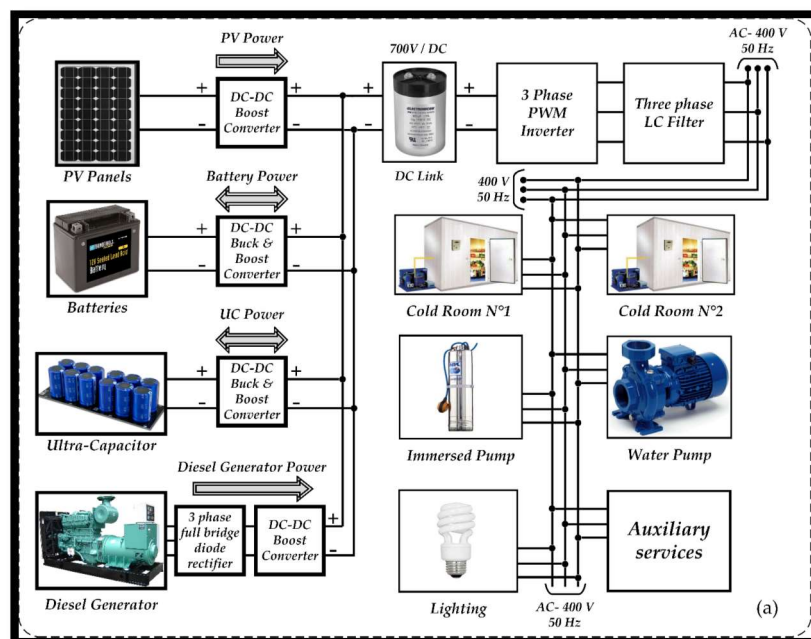


Fig.I.8 Système d'énergie hybride [I.25]

I.4 Principaux Composants des Systèmes Hybrides

Les systèmes hybrides peuvent être constitués de sources renouvelables (Générateur éolien, Générateur photovoltaïque, etc.) et de sources conventionnelles (Générateur diesel, etc.) ainsi que de systèmes de stockage (Batteries, Supercondensateurs, etc.) de sorte que certains de ces composants soient aussi suit :

I.4.1 Générateurs d'énergie renouvelable

I.4.1.1 Générateur photovoltaïque

Le générateur photovoltaïque est un système d'énergie renouvelable qui convertit l'énergie solaire (rayonnement solaire) en énergie électrique. Pour convertir cette énergie, on utilise des

modules photovoltaïques qui contiennent des cellules composites constituées de matériaux sensibles aux longueurs d'onde visibles [I.26]. La cellule PV peut être illustrée et expliquée selon la Figure.I.9. [I.27]. À base de ce dernier (cellule PV), en composé plusieurs cellules en série formant un module photovoltaïque, on obtient un panneau photovoltaïque composite de plusieurs modules, comme le montre la Figure.I.10 [I.28].

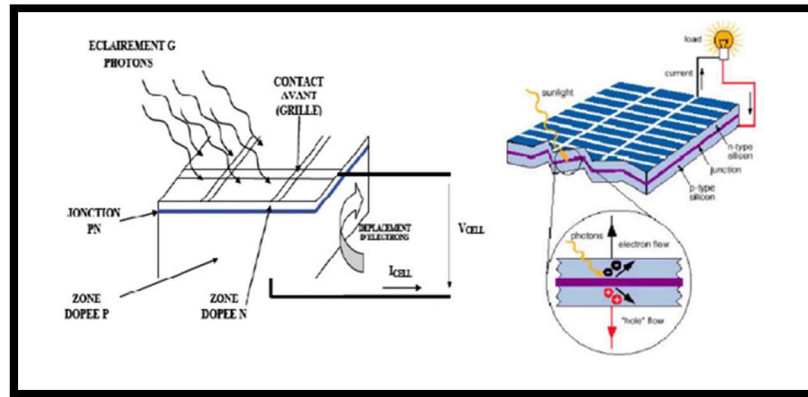


Fig.I.9 Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

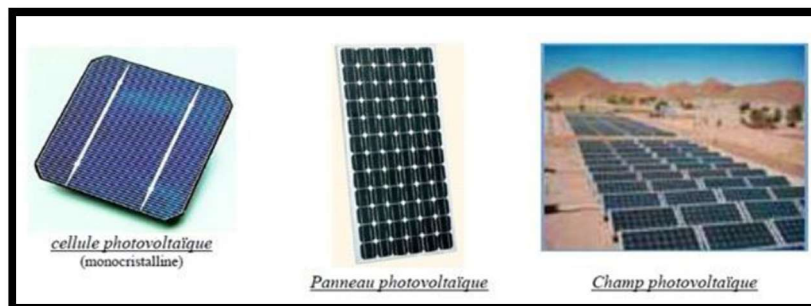


Fig.I.10 Les étapes pour former le champ photovoltaïque [I.28].

• Les différents types d'un système PV

Il existe plusieurs types de cellules photovoltaïques qui diffèrent en termes de caractéristiques, de rendement et de principe d'utilisation, comme indiqué dans le Tableau.I.1 [I.26].

Tableau.I.1. Types de cellules photovoltaïques.

Matériau	Rendement	longévité	Caractéristiques	Principales utilisation
Silicium monocristallin	12 à 18 % (24,7 % en laboratoire)	20 à 30 ans	-Très performant -Stabilité de production	Aérospatiale, modules pour toits, façades....

			-Méthode de production couteuse et laborieuse	
Silicium poly- cristallin	11 à 15 % (19.8 % en laboratoire)	20 à 30 ans	-Adapté à la production à grande échelle -stabilité de production, plus de 50% du marché mondial	Modules pour toits, façades, générateurs.....
Amorphe	5 à 8 % (13 % en laboratoire)		-Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. -fonctionnement si faible luminosité. - fonctionnement par temps couvert. fonctionnement si ombrage partiel. -La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieur à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrice.....), intégration dans le bâtiment

I.4.1.2 Générateur éolien

Le générateur d'énergie éolien est un système électromécanique qui génère de l'énergie électrique selon les étapes illustrées à la Figure.I.11. Ainsi, l'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par turbine éolienne, puis par le générateur électrique, cette énergie mécanique est convertie en énergie électrique.

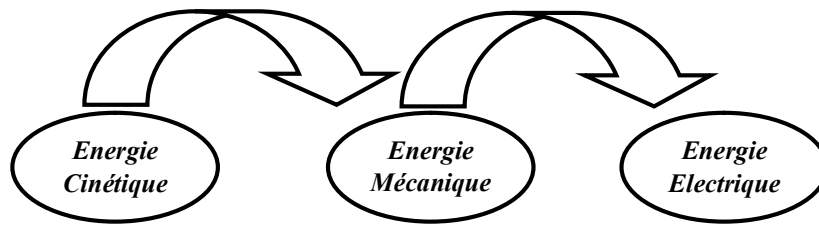


Fig.I.11 Étapes de production d'électricité grâce à un système d'énergie éolienne.

• Les différents types d'un système éolien

A travers la Figure.I.12 on remarque deux types d'éoliennes, à savoir les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal, et ces deux types sont déterminés par l'orientation de l'axe de rotation de ces derniers par rapport à la direction du vent [I.29].

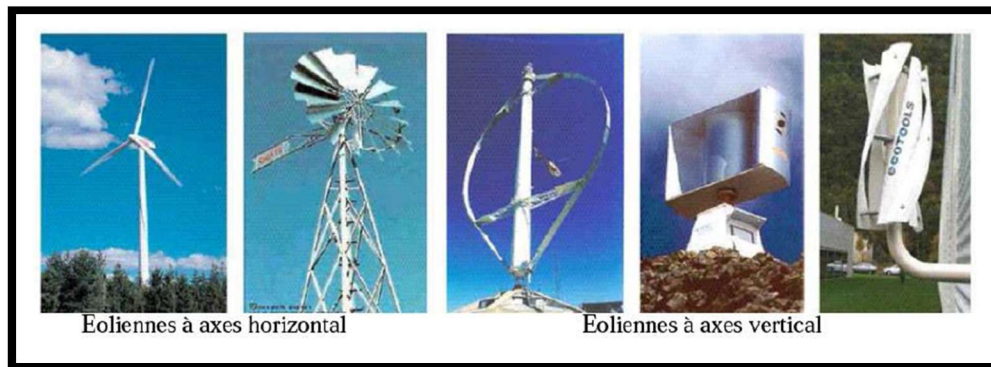


Fig.I.12 Types de système d'énergie éolienne

• Comparaison des éoliennes à axe vertical et des éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal peuvent être comparées selon le Tableau.I.2 sur la base des avantages et des inconvénients de chacun de ces types [I.10].

Tableau.I.2. Les avantages et les inconvénients des éoliennes à axe vertical à axe horizontal.

Types des turbines	Avantages	Inconvénients
Eoliennes à axe horizontal (EAH)	-Fort rendement de conversion d'énergie - Accès au vent plus fort -Régulation de la puissance via décrochage et calage en	-Cout d'installation élevé, mat très dur qui doit supporter le poids de la nacelle. -Des câbles plus long du haut de la tour jusqu'au la terre -Systèmes d'orientation requis

	cas de vent dépassant les limites nominales.	
Eoliennes à axe vertical (EAH)	-Cout d'installation moins important, et maintenance plus facile vu qu'elle est proche de la surface. -Fonctionnement indépendant du sens du vent. -Adéquat pour les toits de d'immeuble	-Rendement moins faible -Fluctuation importante du couple et forte vibrations mécaniques -Solutions limitées pour la régulation en cas de rafale de vent.

• Composition du système de production éolienne à axe horizontal

L'éolienne à axe horizontal se compose de plusieurs éléments comme le montre la Figure.I.13, comme suit [I.30]:

1. Pales ; 2. Moyeu ; 3. Structure de la turbine ; 4. Paliers ; 5. Arbre lent ; 6. Multiplicateur ; 7. Frein à disque ; 8. Accouplement ; 9. Génératrice ; 10. Radiateur de refroidissement ; 11. Système de mesure du vent ; 12. Système de contrôle ; 13. Système hydraulique ; 14. Entraînement d'orientation ; 15. Paliers du système d'orientation ; 16. Capot de la nacelle ; 17. Tour.

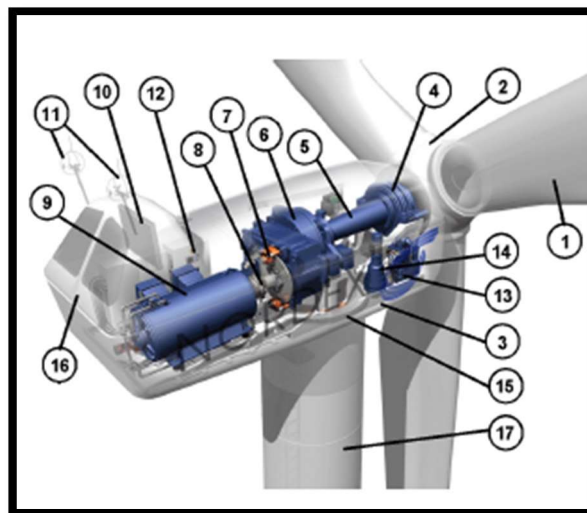


Fig.I.13 Composants de base d'une éolienne à axe horizontal [I.30]

I.4.1.3 Pile à combustible

La pile à combustible (FC) est considérée comme une source d'énergie utilisée en raison de ses multiples avantages, tels que sa petite taille, ses performances élevées, son fonctionnement silencieux et, en outre, elle ne pollue pas l'environnement, ce qui la qualifie de source de production d'énergie [I.31]. Cependant, la pile à combustible présente certains inconvénients, tels qu'une courte durée de vie, une production de tension instable et en plus de cela, elle est relativement coûteuse [I.32].

- **Les différents types d'une pile à combustible**

Il existe plusieurs types de piles à combustible, et les caractéristiques de chaque type peuvent être décrites selon le Tableau.I.3, comme mentionné dans la référence [I.33] est la suivante :

- **PEMFC** : Pile à membrane polymère échangeuse de protons
- **SOFC** : Pile à oxyde solide
- **PAFC** : Pile à acide phosphorique
- **MCFC** : Pile à carbonate de fondu
- **AFC** : Pile alcaline

Tableau.I.3. Différents types de piles à combustible et leurs caractéristiques.

Type	AFC	PEMFC	PAFC	MCFC	SOFC	DMFC
Electrolyte	Liquide Alcaline	Solide Membrane Polymère	Liquide immobilisé H_3PO_4	Liquide immobilisé Carbonate fondu	Solide Céramiques à base d'oxydes	Solide Acide fort/ membrane
Température de fonctionnement ($^{\circ}C$)	60-80	60-100	180-220	600-700	650-1000	60-100
Rendement%	55-60	40-50	36-45	43-60	50-55	32-40

I.4.2 Générateurs d'énergie conventionnelle

I.4.2.1 Générateur diesel [I.13]

Le générateur diesel est l'une des sources incluses dans les systèmes à sources d'énergie renouvelables autonomes, car le générateur conventionnelle contient un moteur diesel fonctionnant à une vitesse fixe lié à un générateur (alternateur) synchrone qui génère de l'énergie électrique à la demande selon la figure.I.14.

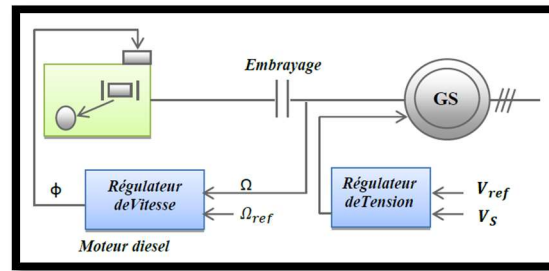


Fig.I.14 Générateur diesel.

I.4.3 Stockage d'énergie

I.4.3.1 Différents types de Stockage d'énergie

I.4.3.1.1 Batteries électrochimiques

La batterie est l'un des systèmes de stockage les plus utilisés pour diverses applications. En empilant des disques de différents éléments chimiques, des batteries électrochimiques sont créées (Fig.I.15), et à travers le processus de charge et de décharge, ces dernières convertissent l'énergie électrique en énergie chimique et vice versa, on a appris que selon les technologies utilisées pour produire ces batteries, différentes capacités sont disponibles pour stocker l'énergie, et plusieurs types de batteries sont disponibles, parmi lesquelles : le nickel-cadmium, le nickel-hydrure métallique, le lithium-ion, le plomb-acide, Batteries lithium-polymère, lithium-air, sodium-soufre et chlorure de sodium [I.34].

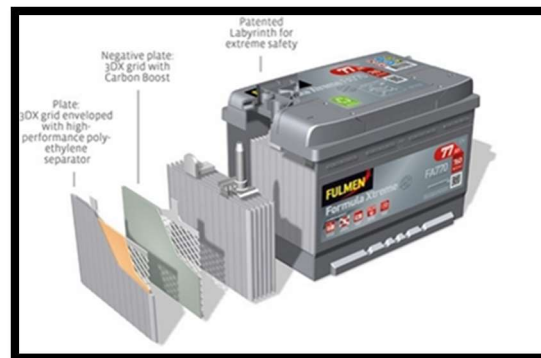


Fig.I.15 Batterie électrochimique [I.35]

I.4.3.1.2 Supercondensateurs [I.34]

Les supercondensateurs ont été proposés comme alternative aux batteries de très grande capacité ces dernières années, car ils peuvent s'adapter à de très grands changements d'énergie sur un très grand nombre de cycles de décharge complets, et en raison de leur tendance à s'auto-décharger, ils sont plus adaptés au stockage d'énergie qu'au stockage d'énergie, ce qui les rend

plus utiles dans les applications impliquant la régulation de l'énergie et l'amélioration de la qualité de l'énergie. La Figure.I.16 représente un supercondensateur.

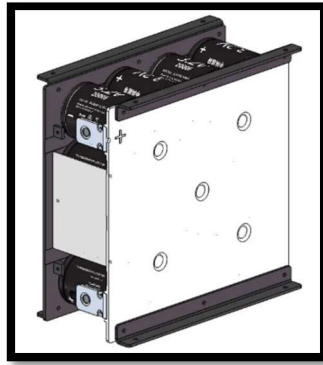


Fig.I.16 Supercondensateur [I.36].

I.4.3.1.3 Volant d'inertie [I.37]

Le volant d'inertie est considéré comme l'un des systèmes de stockage qui fonctionnent pour répondre à des besoins énergétiques importants pendant de courtes périodes. Le processus de stockage de l'énergie pour ce dernier dépend de la conversion de l'énergie cinétique de rotation en électricité et vice versa. Il en existe deux types de cette dernière : le volant d'inertie à grande vitesse (sa vitesse de rotation atteindre 50 000 tr/min) et le volant d'inertie à faible vitesse (sa vitesse de rotation est inférieure à 10 000 tr/min). Le système de volant d'inertie peut être illustré selon la Figure.I.17.

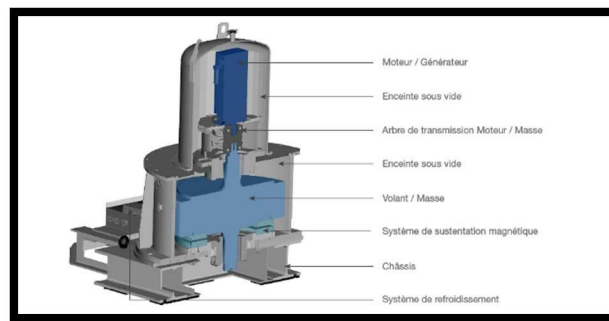


Fig.I.17 système de volant d'inertie [I.38].

I.4.3.2 Systèmes de stockage d'énergie individuels et hybrides

Le système de stockage d'énergie fait partie des éléments de base des systèmes hybrides d'énergies renouvelables afin de fournir l'énergie nécessaire en cas d'incapacité de ces derniers à fournir de l'énergie et de stocker l'énergie en cas de surplus. À cet égard, il existe plusieurs types de systèmes de stockage d'énergie, y compris les systèmes stockage d'énergie individuels

et systèmes stockage d'énergie hybrides, et nous pouvons les mentionner comme mentionné dans la référence [I.39] comme suit :

I.4.3.2.1 Systèmes de stockage d'énergie individuels

Le diagramme de la Figure.I.18 montre les types de systèmes de stockage d'énergie individuels qui contiennent des systèmes de stockage mécaniques, électrochimiques ou chimiques.

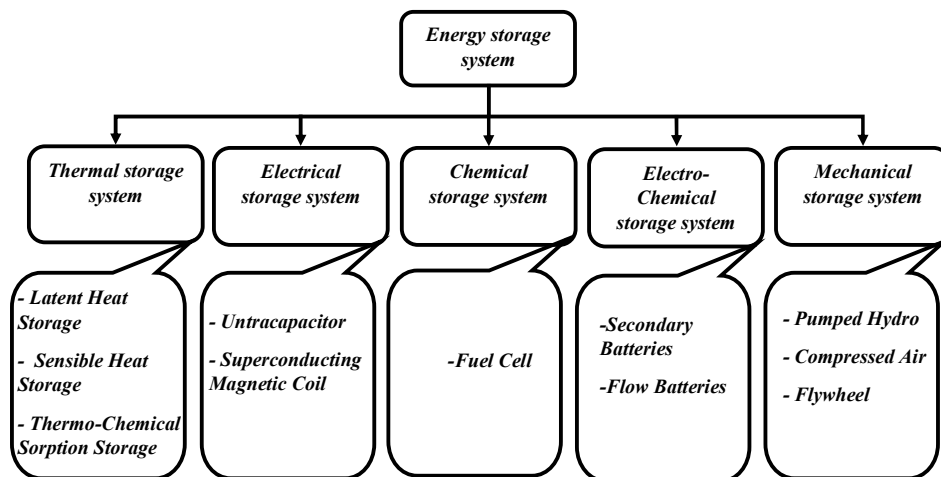


Fig.I.18 Différents types de systèmes de stockage d'énergie individuels

I.4.3.2.2 Systèmes de stockage d'énergie hybrides

Le diagramme de la Figure.I.19 montre les types de systèmes de stockage d'énergie hybrides.

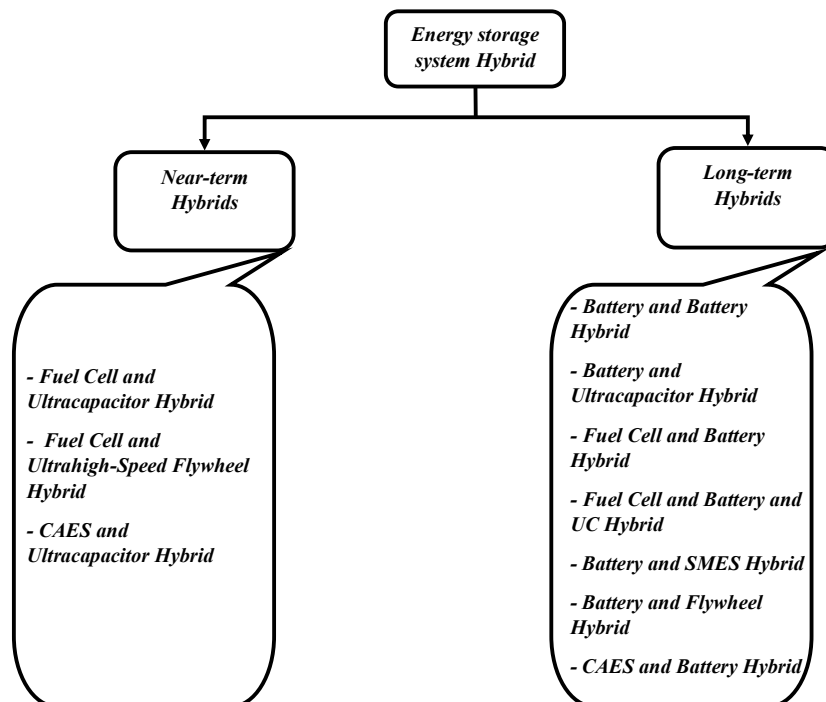


Fig.I.19 Différents types de systèmes de stockage d'énergie hybrides.

I.5 Technologies et Architectures des Systèmes Energétiques Hybrides

Les technologies et les architectures pour les systèmes énergétiques hybrides peuvent être déterminées selon l'application utilisée à travers lequel SEH peut être classé en fonction de la gamme de puissance, comme indiqué dans le Tableau.I.4.

Tableau.I.4. Classification des SEH par gamme de puissance [I.40].

Puissance du SEH [KW]	Application
Faible : <5	Systèmes autonomes : stations de télécommunications, de pompage de l'eau, poste frontière autres applications isolées.
Moyenne : 10-250	Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, d'un hameau, des zones rurales ...
Grand : >500	Grand réseaux isolés (ex : réseaux insulaires)

I.5.1 Système d'énergie hybride autonome

Les systèmes autonomes peuvent être utilisés dans des zones isolées (rurales et éloignées) où il n'y a pas de réseau électrique pour alimenter les charges (pompe à eau, ventilateurs...etc.) en énergie électrique. Comme le montre la Figure.I.20, pour fournir l'énergie nécessaire à la pompe à eau, un système hybride a été appliqué, composé d'un générateur d'énergie photovoltaïque comme source primaire et d'une batterie comme système de secours qui fonctionne pour stocker l'énergie pendant la disponibilité de l'énergie et la décharger pendant pénuries d'énergie [I.41].

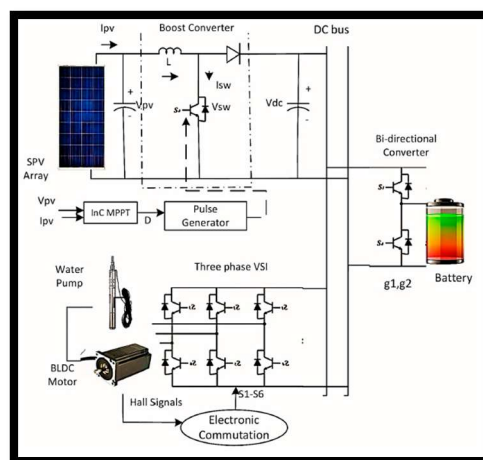


Fig.I.20 Système d'énergie hybride autonome.

I.5.2 Système d'énergie hybride connectée au réseau

Ce système peut être utilisé pour fournir de l'énergie directement au réseau électrique, ou connecter ce système au réseau électrique et à la charge, et dans le cas où ce dernier ne serait pas en mesure de fournir l'énergie nécessaire à la charge, le réseau intervient pour fournir cette énergie, ou il peut également être utilisé pour alimenter le réseau en cas d'excédent de production d'énergie par le système hybride, comme le montrent les Figures I.21 et I.22 [I.42, I.24].

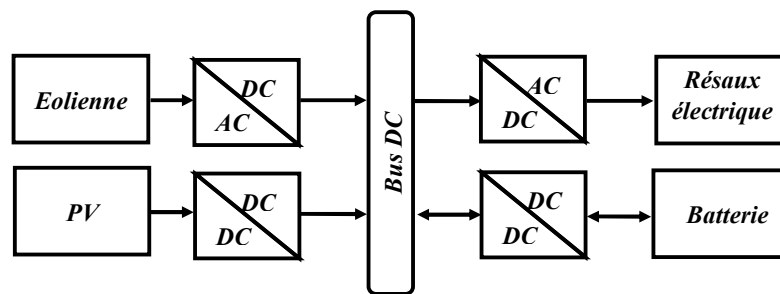


Fig.I.21. Schéma graphique d'un SEH connectée au réseau électrique [I.42].

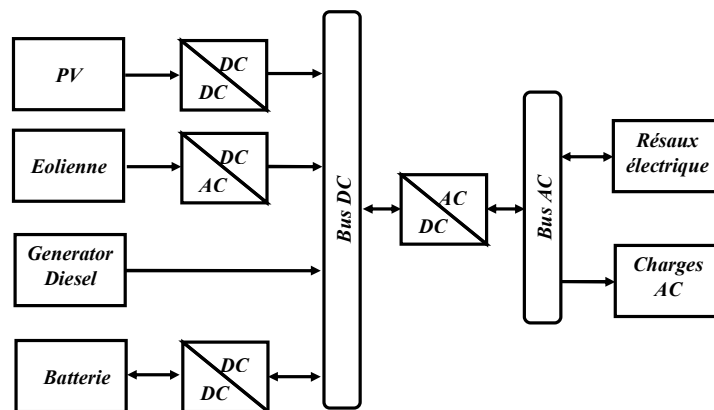


Fig.I.22. Schéma graphique d'un SEH connectée au réseau électrique et la charge [I.24].

I.5.3 Micro-réseaux hybride

Le micro-réseau hybride est la combinaison d'un micro-réseau AC avec un micro-réseau DC comme le montre la Figure.I.23, le micro-réseau AC peut être composé d'une source renouvelable (énergie éolienne) et d'une source traditionnelle (générateur diesel) et réseau basse tension, en plus du système de stockage (Volant d'inertie) et des charges AC. Quant le micro- réseaux DC, il peut contenir deux sources renouvelables (système d'énergie photovoltaïque + pile à combustible) et un système de stockage (batterie) en plus des charges DC. L'énergie électrique peut également être échangée entre les deux micro-réseaux via les convertisseurs AC/DC. L'avantage de cette installation est d'augmenter l'efficacité du système [I.43].

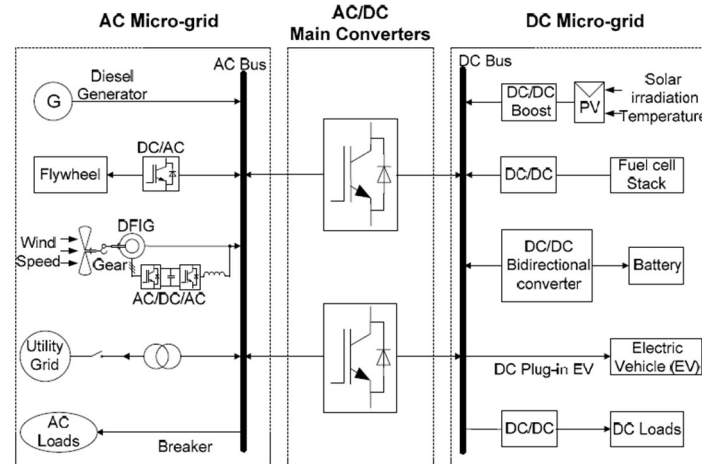


Fig.I.23 Schéma graphique d'un micro-réseau hybride [I.43].

I.6 Avantages et Enjeux associés aux Systèmes Hybrides

L'objectif de la mise en place de systèmes d'énergie hybrides est d'assurer la continuité de la production d'énergie, mais ils présentent à la fois certains avantages et enjeux (inconvenients), et certains d'entre eux peuvent être mentionnés comme suit [I.44]:

I.6.1 Avantages associés aux Systèmes Hybrides

- Utilisation des sources naturelles et renouvelables
- Faible niveau de coûts d'exploitation et de maintenance
- Pas de pollution ni de déchets produits par les sources naturelles
- Minimiser l'intermittence
- Économie de carburant

I.6.2 Enjeux associés aux Systèmes Hybrides

- Dépendance aux cycles naturels
- Les coûts initiaux de ces systèmes sont plus élevés que ceux des générateurs traditionnels de taille comparable.
- Des coûts relativement élevés
- Les pics de charge ne peuvent être bien gérés sans stockage d'énergie
- Complexité de la procédure de conception
- Frais mensuels

I.7 Transition Énergétique et potentiels de l'Énergie Hybride en Algérie

[I.45] Les ressources énergétiques naturelles, les infrastructures énergétiques, la logistique, les méthodes, les connaissances et le développement énergétique constituent la base de l'idée du projet de conversion énergétique. En d'autres termes, les étapes suivantes doivent être suivies lorsqu'on s'engage dans un projet de transition énergétique afin de bien comprendre les solutions techniques et financières :

- Étudier les ressources naturelles disponibles et le potentiel énergétique (énergie solaire, éolienne, eau, etc.)
- Choisir les solutions techniques et possibles après avoir étudié les caractéristiques de production et de consommation.
- Des analyses statistiques financières précises pour évaluer le coût total du projet, calculer le coût moyen par kilowattheure généré et prédire le retour sur investissement du projet.

I.7.1 L'Adoption de l'Énergie Hybride en Algérie [I.45]

S'appuyant sur les procédures évoquées ci-dessus, le plan de transition énergétique des réseaux isolés du sud algérien repose sur l'hybridation avec des ressources propres et renouvelables, en trois étapes :

- **Première étape :** choisir les meilleures technologies d'énergies renouvelables capables de s'adapter au climat du sud algérien. L'objectif de cette étape est de réduire la dépendance aux combustibles fossiles et d'améliorer l'efficacité de l'ancien système énergétique.
- **Deuxième étape :** consiste à remplacer l'ancien système énergétique par un système basé sur des ressources durables et renouvelables. En effet, pour résoudre le problème de l'adéquation production-consommation et de l'augmentation du taux d'hybridation (forte pénétration énergétique), une introduction massive des énergies renouvelables doit s'accompagner d'un système de stockage
- **Troisième étape :** est l'étape de transition vers des sources d'énergie 100 % durables et renoncer des énergies fossiles au profit d'énergies renouvelables et propres.

I.7.2 Comment l'Algérie Embrasse l'Énergie Hybride [I.46]

- **Projets d'énergies renouvelables hybrides réalisée en Algérie :** La Centrale électrique hybride (gaz-solaire) de Solar Power Plant (SPP1) à Hassi R'Mel de 150 MW dont 25 MW en solaire thermique (CSP), mise en service en juillet 2011.
- **Projets d'énergies renouvelables hybrides programmées en Algérie :** L'Algérie vise, à travers une stratégie de partenariat étranger entre la Société algérienne de l'énergie et la société espagnole Abengoa, la création de trois centres de production d'énergie solaire hybride, qui seront réalisés selon les spécifications énumérées dans le Tableau.I.5.

Tableau.I.5. Projets programmées d'énergie solaire hybride en Algérie.

	<i>Région</i>	<i>Capacité (MW)</i>	<i>Cout estimé (million d'euro)</i>
<i>La deuxième centrale solaire</i>	EIMAGHIR	80	322
<i>La troisième centrale solaire</i>	ELNAAMA	70	285
<i>La quatrième centrale solaire</i>	HASSI EL RMEL	70	285

I.8 Réglementations, politiques et incitations

I.8.1 Initiatives gouvernementales et internationales [I.47]

I.8.1.1 Création et application

Cette section traite des technologies d'énergies renouvelables hybrides qui ont démontré leur viabilité et leur aptitude à servir diverses applications selon le Tableau.I.6.

Tableau.I.6. Diverses technologies d'énergies renouvelables hybrides et leurs applications

Types d'énergies renouvelables hybrides	Application				
	Eau	Éclairage	Secteur domestique	Agriculture	Energie

	Dessalement	Sterilisation	Le chauffage	Rue ou ferme	Secteur domestique	Allumer les appareils	Cuisiner	Refroidissement	Le chauffage	Réfrigération industrielle	Broyer les grains	Hydroponique	Séchoirs	Pompage pour l'irrigation	Production d'électricité
Énergie hybride solaire et éolienne															
Moulin à vent et Panneaux photovoltaïques											✓			✓	✓
Éoliennes et panneaux photovoltaïques	✓			✓	✓	✓					✓				✓
Combinaison hybride de solaire et de biomasse															
Un système combiné à l'énergie et à la chaleur									✓						

I.8.1.2 Renforcer la sensibilisation

- **Concours** : les concours peuvent couvrir une variété de sujets, y compris la meilleure technologie d'énergie renouvelable approuvée. Cela élargirait la portée des incitations (pas seulement financières) pour l'utilisation des technologies d'énergies renouvelables dans les zones rurales.
- **Voyages d'étude** : ces voyages permettent aux décideurs politiques et aux membres des communautés rurales de visiter des lieux présentant un contexte social et économique similaire afin de présenter des expériences réussies dans le domaine des énergies renouvelables et les meilleures pratiques associées (d'un point de vue politique ou pratique).
- **Projets de démonstration** : Il démontre comment fonctionnent les technologies d'énergies renouvelables à petite échelle et leurs avantages qui en résultent de manière pratique à travers des projets financés par des organisations et entités nationales ou

internationales, permettant à la communauté locale d'interagir avec les technologies disponibles et d'encourager leur adoption et leur promotion.

- **Expositions :** Les expositions permettent aux résidents ruraux d'exposer leurs produits et leurs réalisations et/ou de voir ce que d'autres ont réalisé.

I.8.2 Normes et protocoles pour l'intégration hybride

Les étapes suivantes peuvent être considérées parmi les normes et protocoles pour l'intégration hybride des énergies renouvelables [I.48] :

- **Etude des charges et des besoins :** Une étude est menée Charge électrique précise en termes de type, de quantité, de nature et de relation avec le temps. Un paramètre important de la conception du système consiste à déterminer la quantité de perte de charge autorisée.
- **Evaluation des sources :** Pour choisir la source la plus appropriée parmi les sources disponibles dans la zone à alimenter en électricité, il est nécessaire d'évaluer les sources (énergie solaire, éolienne, etc.). Les données sur chacune de ces sources doivent être disponibles pour évaluation.
- **Evaluation technologique :** Après avoir identifié les sources à appliquer, des recherches sont menées et les meilleures options technologiques pour ces sources sont déterminées.
- **Détermination des composants du système :** Le processus de détermination des composants du système comprend la détermination de la puissance de chaque composant en plus de la manière optimale de connecter ces composants.

I.9 Conclusion

Ce chapitre a fourni un aperçu des systèmes d'énergie renouvelable et hybride comme suit :

Concernant les énergies renouvelables, nous avons évoqué les différents types de ces énergies, en plus des énergies hybrides. Quant aux systèmes hybrides, nous avons évoqué les principaux composants des systèmes hybrides, en plus des technologies et de l'ingénierie des systèmes énergétiques hybrides (indépendants et intégrés au réseau électrique)...etc. Dans le prochain chapitre, nous discuterons des composants du système hybride proposé et de leur modélisation.

Chapitre II : Modélisation des composants du système hybride

II.1 Introduction

Les sources d'énergie renouvelable telles que l'éolienne, les systèmes photovoltaïques et les piles à combustible sont considérées comme des alternatives aux énergies traditionnelles, contribuant à la préservation de l'environnement, de sorte que ces systèmes font l'objet de modélisation et de simulation pour connaître leur comportement en fonction des changements qui leur surviennent.

Dans ce chapitre, les éléments des deux systèmes énergétiques hybrides proposés, chacun connecté au réseau électrique, sont modélisés. Ces éléments comprennent le système éolien, le système photovoltaïque et la pile à combustible comme sources d'énergie, générateur diesel, la batterie et le supercondensateur comme système de stockage hybride et le réseau électrique comme consommateur d'énergie. En plus de simuler le système éolien et le système photovoltaïque à l'aide de MATLAB Simulink.

II.2 Descriptions des composantes les deux systèmes hybrides étudiés

Le 1^{er} système d'énergie hybride étudié est décrit selon la Figure.II.1 et le 2^{ème} système d'énergie hybride étudié est décrit selon la Figure.II.2. Ces deux systèmes se composent de trois sources d'énergie renouvelables et d'un système de stockage d'énergie hybride. La première source est un générateur photovoltaïque couplé à un convertisseur élévateur DC-DC ; la deuxième source est une éolienne connectée à un convertisseur redresseur (AC/DC) et à un convertisseur élévateur (DC/DC) respectivement ; et la troisième source est une pile à combustible connectée à un convertisseur élévateur DC-DC ; Le générateur diesel est une source de secours dans le 2^{ème} système proposée. Quant au SSEH, il se compose d'une batterie au plomb et d'un supercondensateur, tous deux couplés à son propre convertisseur bidirectionnel (DC/DC), et un délestage (résistance) est utilisée pour protéger le système de stockage contre les surcharges dans le 1^{ère} système proposée. L'objectif des deux systèmes proposés est de fournir la puissance nécessaire au réseau électrique en connectant les composants ci-dessus en parallèle avec Bus-DC. Grâce à l'onduleur (DC/AC) connecté au réseau, la tension continue est convertie en tension alternative.

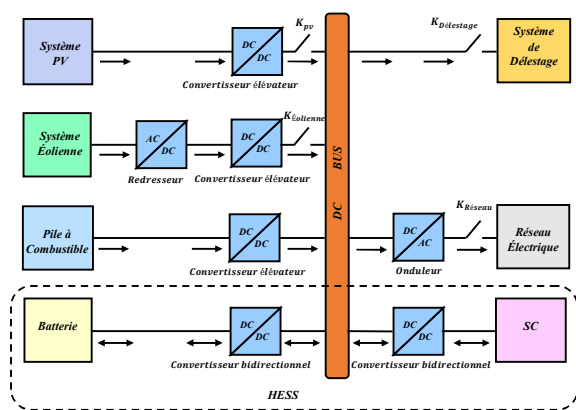


Fig.II.1. La structure du 1ère SEH proposée.

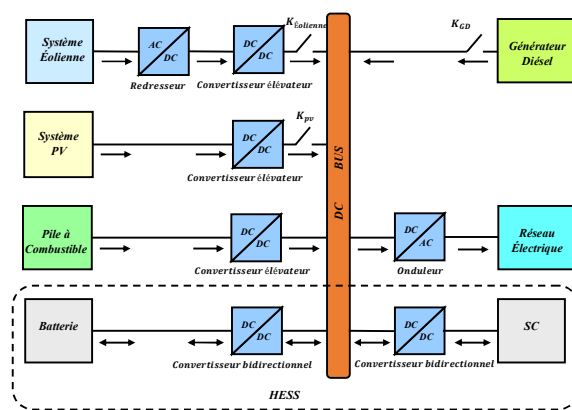


Fig.II.2. La structure du 2ème SEH proposée.

II.3 Modélisation d'un système photovoltaïque

II.3.1 Modèle d'une cellule solaire photovoltaïque à une seule diode

Le circuit équivalent de la cellule du système PV est illustré à la Figure.II.3 [II.1]. L'expression mathématique du courant de sortie de la cellule solaire est donnée par l'Eq.II.1[II.2] :

$$I = I_{pv} - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + R_s I}{V_t \alpha} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad (II.1)$$

- I et V : représentent respectivement le courant et la tension de sortie de la cellule PV ;
- I_{pv} : est le courant généré par la lumière
- I_0 : est le courant de saturation de la diode
- R_s : est la résistance série de la cellule PV
- R_p : est la résistance parallèle de la cellule PV
- α : est une constante de diode
- V_t : est la tension de jonction thermique

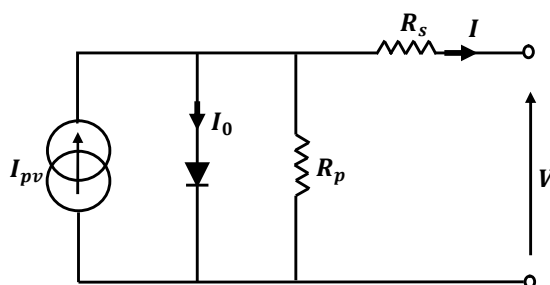


Fig.II.3. Circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque [II.1]

L'expression du générateur PV, composé de $N_{ser} \times N_{par}$ modules identiques, est représentée par l'Eq.II.2 [II.3].

$$I = I_{pv}N_{par} - I_0N_{par} \left[\exp \left(\frac{V + R_s \left(\frac{N_{ser}}{N_{par}} \right) I}{V_t \alpha N_{ser}} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s \left(\frac{N_{ser}}{N_{par}} \right) I}{R_p \left(\frac{N_{ser}}{N_{par}} \right)} \quad (II.2)$$

Où :

- N_{ser} : nombre de modules en série.
- N_{par} : Nombre de modules parallèles.

II.3.3. Rendement énergétique maximum [II.4]

L'efficacité de conversion énergétique des cellules photovoltaïques est indiquée par rendement énergétique maximale (η_m). Elle est décrite comme la relation (rapport) entre la puissance maximale de la cellule (P_{max}) et la puissance du rayonnement solaire incident (P_i).

$$\eta_m = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{I_m V_m}{S \phi} = \frac{FF V_{co} I_{cc}}{P_i} \quad (II.3)$$

Où :

- S : Surface de la cellule solaire (m^2);
- ϕ : Flux incident (W/m^2);
- I_m, V_m : Coordonnées de point de fonctionnement.

II.3.4 Simulation d'un système PV

Dans cette thèse, un générateur photovoltaïque d'un type KC200GT a été utilisé, et pour étudier les caractéristiques de ce dernier, il a été simulé sur le programme Matlab Simlink selon la Figure.II.4 à base des paramètres indiqués dans le Tableau.II.1.

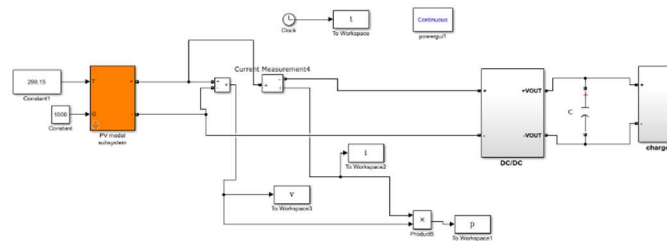


Fig.II.4 Système PV sur Matlab Simlink.

II.3.4.1. Caractéristique I (V) et P(V)

La caractéristique I(V) et P(V) du système photovoltaïque est représentée selon les courbes I(V) et P(V), illustrées sur la figure II.5, à une température constante de 25 °C et un rayonnement solaire constant de 1 000 W/m². Ainsi, à travers la courbe P(V), la puissance du système photovoltaïque augmente jusqu'à atteindre la valeur optimale (P_{optimal}), puis diminue en fonction de la variation de la tension. À travers la courbe I(V), nous nous concentrons sur trois points fondamentaux, qui sont les suivants :

- **Point 1** : Le courant est au maximum (courant de court-circuit) alors que la tension est égale à zéro
- **Point 2** : La tension est au maximum (tension de circuit ouvert) alors que le courant est égal à zéro
- **Point 3** : La cellule produit le maximum power possible grâce à un fonctionnement optimal

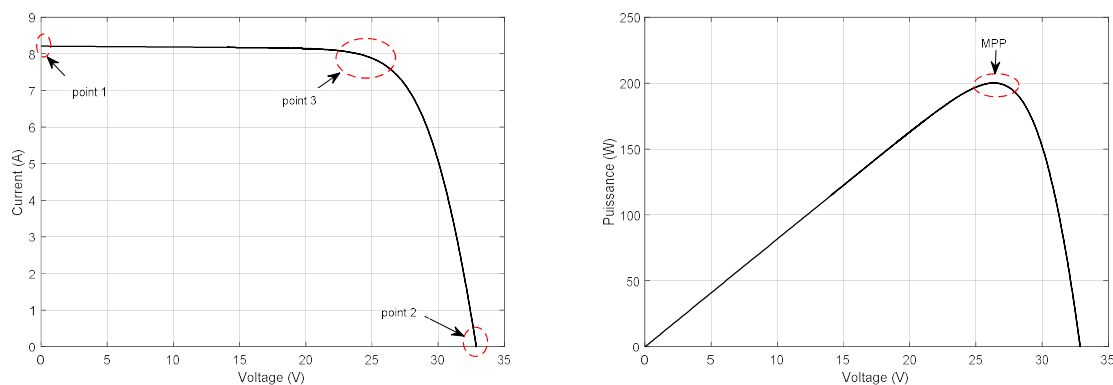


Fig.II.5. Caractéristiques I(V) et P(V) d'un system PV.

II.3.4.2. influence de la température et du rayonnement sur les modules PV

L'influence de la température et du rayonnement sur le système photovoltaïque peut être expliquée à partir de la figure II.7.

À travers la figure II.7, nous remarquons que chaque fois que la température diminue, la tension de circuit ouvert (V_{oc}) augmente, à irradiation constante. De même, lorsque l'irradiation augmente à température constante, le courant de court-circuit (I_{cc}) augmente.

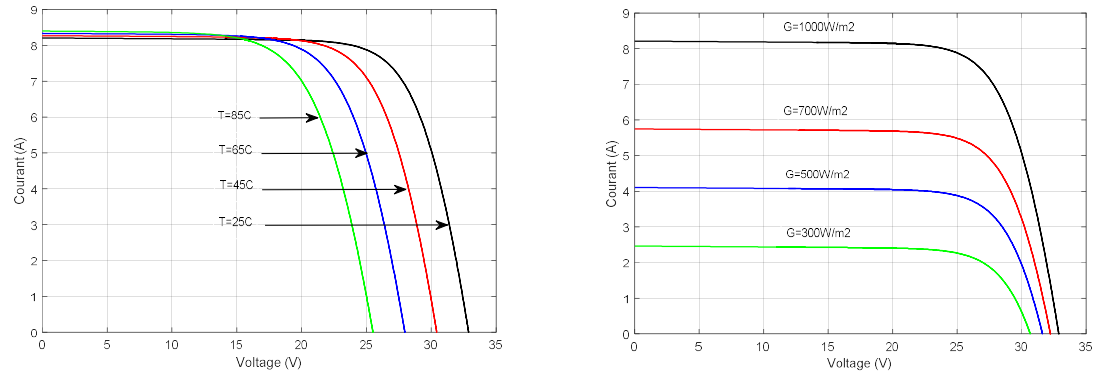


Fig.II.6 Caractéristiques I-V d'un system PV (T = variable ; $G= 1000\text{w/m}^2$) et ($T=25\text{C}$; G =variable).

II.4. Modélisation de générateur éolien

II.4.1. Composition du système de production éolienne

Le système de conversion d'énergie éolienne dans cette recherche est composé d'une éolienne et d'un générateur synchrone à aimant permanent (PM) connectés respectivement à un convertisseur AC/DC non commandée (Redresseur) et à un convertisseur DC/DC (Hacheur-Boost) comme le montre la Figure.II.7.

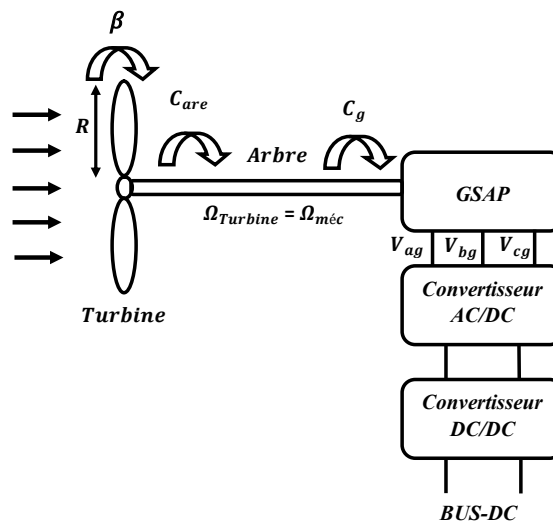


Fig.II.7 : Structure générale du système éolien proposé.

II.4.2. Générateurs utilisé dans le système d'éolien

Dans cette thèse, une machine synchrone à aimant permanent a été utilisée pour convertir l'énergie mécanique générée par la turbine d'éolienne en énergie électrique en raison de ses nombreux avantages suivants [II.5] :

- Bon facteur de puissance

- Simplicité de fabrication
- Peu de pertes au rotor
- Fort couple volumique
- Fort couple massique
- Pas ou peu d'entretien
- Pas de système balais collecteur
- Bon rendement

II.4.3. Modèle d'éolienne

La quantité de puissance aérodynamique qui apparaît au niveau du rotor de la turbine s'exprime comme suit [II.6] :

$$P_{are} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2} \quad (II.4)$$

Où : v est la vitesse du vent (m/s) ; S est la surface circulaire balayée par la turbine (m^2) ; ρ est la masse volumique de l'air (kg/m^3) ; λ est la vitesse spécifique ; β est l'angle d'inclinaison de la pale.

II.4.3.1. Le coefficient de puissance (power coefficient) C_p

Le coefficient de puissance (C_p) et s'exprime comme suit [II.7] :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5176 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) \exp\left(\frac{-21}{\lambda_i}\right) + 0.0068\lambda \quad (II.5)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{1 + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (II.6)$$

La vitesse spécifique λ s'exprime comme suit [II.6] :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{v} \quad (II.7)$$

Où v : est la vitesse du vent ; R : est le rayon de la turbine ; $\Omega_{turbine}$: est la vitesse de la turbine.

La Figure.II.8 représente les caractéristiques $C_p - \lambda$ de l'éolienne étudiée selon les valeurs suivantes : $C_{pmax}=0.48$; $\lambda=8.1$; $\beta=0^\circ$.

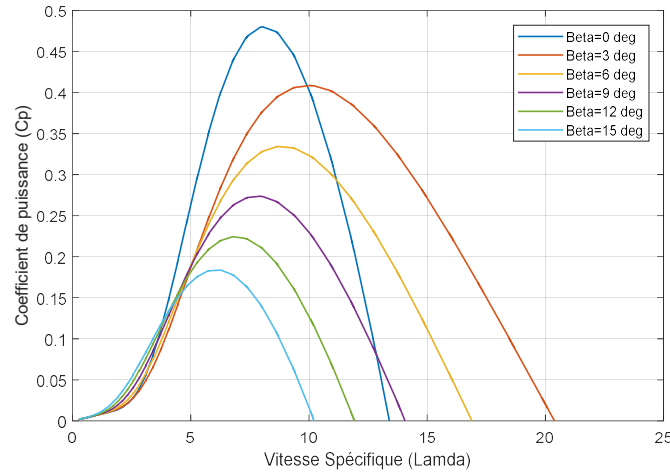


Fig.II.8 : Coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique.

II.4.3.2. Le coefficient de couple (torque coefficient) C_t

Le couple appliqué à l'arbre de la turbine peut être exprimé selon l'équation suivante [II.8] :

$$T_t = \frac{P_m}{\Omega_{turbine}} \quad (II.8)$$

Le coefficient de couple C_t peut être déterminé sur la base des relations II.8 et II.11 selon l'équation suivante :

$$T_t = \frac{C_p \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3}{\frac{\lambda \cdot V}{R}} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \pi \cdot R^3 \cdot V^2 \Leftrightarrow C_t = \frac{C_p}{\lambda} \quad (II.9)$$

II.4.3.3. Modélisation de l'arbre

L'arbre de transmission de la turbine peut être exprimé selon les équations suivantes (eq II.10-II.13) [II.6]:

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (II.10)$$

Avec:

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (II.11)$$

Avec :

- J : est l'inertie totale ramenée sur l'arbre du générateur ; Jt : est l'inertie de la turbine ;
G :est le gain du multiplicateur (G=1 dans notre cas) ; Jg : est l'inertie de la génératrice.

Le couple mécanique appliqué au rotor peut être décrit selon l'équation suivante :

$$C_{méc} = C_g - C_{em} - C_f \quad (II.12)$$

Où:

$$C_f = f\Omega_{méc} \quad (II.13)$$

- Cem : Le couple électromagnétique sortant du générateur ; Cg : Le couple issu du multiplicateur ; Cf : Couple de frottement ; f : Le coefficient de frottement

II.4.3.4. Modélisation de la turbine éolienne

A partir des données mentionnées dans la partie modélisation de la turbine éolienne, ces dernières peuvent être modélisées selon la Figure.II.9 [II.9].

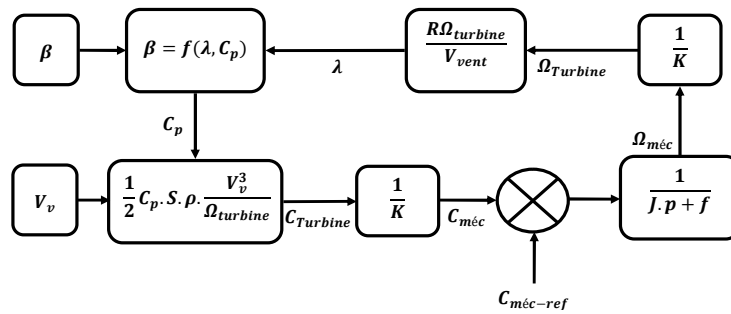


Fig.II.9 Schéma bloc de la turbine éolienne.

Dans cette thèse K=1.

II.4.4. Modélisation de la machine synchrone a aimant permanent

Les machines synchrones sont considérées comme appartenant à la catégorie des machines à courant alternatif et constituent un type important de ces machines, car ces dernières peuvent fonctionner comme moteur ou comme générateur [II.10].

II.4.4.1. Équations électriques dans un repère naturel

La structure et les équations électriques du stator d'une machine synchrone à aimants permanents dans un repère naturel (a,b,c) peuvent s'exprimer selon la Figure.II.10 et la relation suivante [II.11]:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{sa} \\ \varphi_{sb} \\ \varphi_{sc} \end{bmatrix} \quad (II.14)$$

Avec :

R_s : La résistance des phases statoriques

$[V_{sa} \ V_{sb} \ V_{sc}]^T$: Les tensions des phases statoriques.

$[i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T$: Les courants des phases statoriques.

$[\varphi_{sa} \ \varphi_{sb} \ \varphi_{sc}]^T$: Les flux totaux à travers les bobines statoriques.

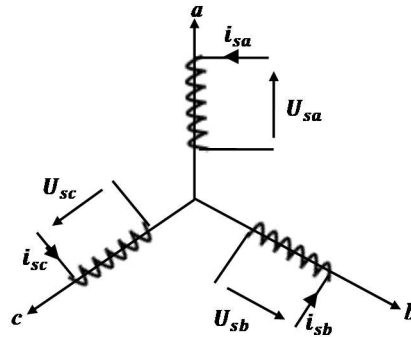


Fig.II.10 Représentation de la MSAP dans le repère naturel.

II.4.4.2. Passage au repère de Park

Pour simplifier le modèle mathématique de la machine synchrone à aimant permanent, il est passage d'un repère triphasée (abc) en un repère biphasée (dq) à l'aide du modèle de Park selon les figures (II.11, II.12) et les équations suivantes [II.12]:

$$\begin{cases} U_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - \omega_r \varphi_{sq} \\ U_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} - \omega_r \varphi_{sd} \end{cases} \quad (II.15)$$

L'équation du flux :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_d i_{sd} + \varphi_f \\ \varphi_{sq} = L_q i_{sq} \end{cases} \quad (II.16)$$

Avec :

- φ_f : le flux des aimants permanents par pôle.

L'équation de couple électromagnétique :

$$C_e = \frac{3}{2} p \left((L_d - L_q) i_{sd} i_{sq} + \varphi_f i_{sq} \right) \quad (II.17)$$

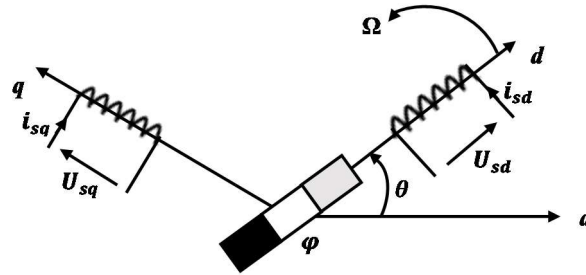


Fig.II.11 Représentation de la MSAP dans le repère de Park.

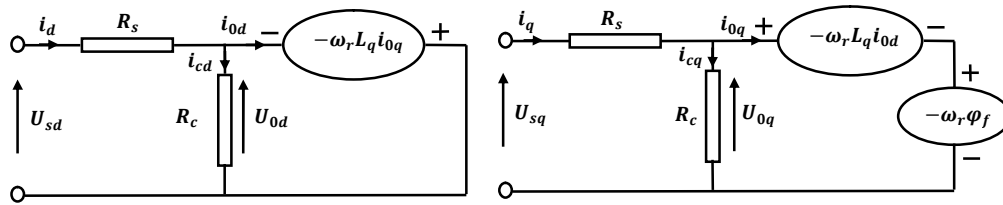


Fig.II.12 Circuit équivalents du MSAP.

II.4.4.3. Équation mécanique

La dynamique d'un générateur-turbine peut être exprimée selon l'équation différentielle de mouvement suivante [II.13] :

$$\frac{d\Omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_T - F\Omega_m - T_e) \quad (II.18)$$

- J: Moment d'inertie total de l'ensemble génératrice-turbine éolienne (kg.m²).
- T_e : Couple produit par la génératrice électrique (N.m)
- F: Coefficient de frottement visqueux de l'ensemble (N.m.s/rad).

II.5. Modélisation de la pile à combustible

Dans le cadre de cette thèse, une pile à combustible de type membrane échangeuse de protons (PEMFC) est utilisée.

II.5.1. Modélisation des réactions électrochimiques

Le principe de son fonctionnement puisse être expliqué selon la figure.II.13 et les équations de réaction chimique (19-21) incluses dans ce type comme suit [II.14] :

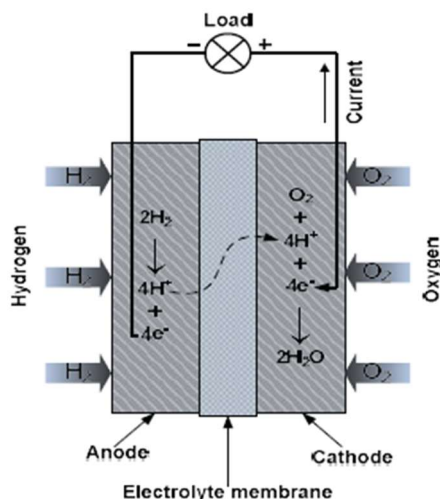
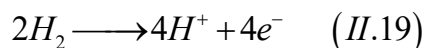
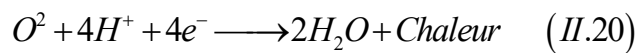


Fig.II.13 : Schéma de principe de fonctionnement de la pile à combustible PEM.

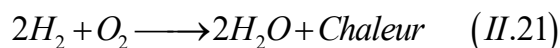
- La réaction anodique s'exprime selon l'équation suivante :



- La réaction cathodique s'exprime selon l'équation suivante :



- La réaction globale s'exprime selon l'équation suivante :



II.5.2. Modélisation électrique

La pile à combustible est exprimée selon la figure.II.14 et les équations suivantes (II.22)-(II.32) [II.15, II.16] :

- L'équation (II.22) exprime la source de tension contrôlée (E) :

$$E = E_{oc} - NA \ln \left(\frac{i_{fc}}{i_0} \right) \cdot \frac{1}{s \frac{T_d}{3} + 1} \quad (II.22)$$

$$V_{fc} = E - R_{ohm} \cdot i_{fc} \quad (II.23)$$

- Les valeurs de i_0 , A et E_{oc} sont calculées en fonction des blocs A, B et C comme suit :

$$E_{oc} = K_c E_n \quad (II.24)$$

$$i_0 = \frac{zFk(P_{H_2} + P_{O_2})}{Rh.e^{\frac{\Delta G}{RT}}} \quad (II.25)$$

$$A = \frac{RT}{z\alpha F} \quad (II.26)$$

- Le bloc C est exprimé selon l'équation (II.26), et les blocs A et B selon les équations suivantes :

$$U_{f_{H_2}} = \frac{60000RT i_{fc}}{zFP_{fuel}V_{fuel}x\%} \quad (II.27)$$

$$U_{f_{O_2}} = \frac{60000RT i_{fc}}{2zFP_{air}V_{air}y\%} \quad (II.28)$$

$$P_{H_2} = (1 - U_{f_{H_2}})x\%P_{fuel} \quad (II.29)$$

$$P_{O_2} = (1 - U_{f_{O_2}})y\%P_{air} \quad (II.30)$$

$$P_{H_2O} = (w + 2y\%U_{f_{O_2}})P_{air} \quad (II.31)$$

Et

$$\begin{cases} E_n = 1.229 + (T - 298) \cdot \frac{-44.43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln \left(P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}} \right) & T \leq 100^\circ C \\ E_n = 1.229 + (T - 298) \cdot \frac{-44.43}{zF} + \frac{RT}{zF} \ln \left(\frac{P_{H_2} P_{O_2}^{\frac{1}{2}}}{P_{H_2O}} \right) & T > 100^\circ C \end{cases} \quad (II.32)$$

Où :

- V_{fc} : est la tension de la pile à combustible (V) ;
- E_{oc} : est la tension en circuit ouvert (V) ;
- i_0 : est le courant d'échange (A);
- i_{fc} : est le courant de la pile à combustible (A) ;
- R_{ohm} : est la résistance interne (Ω) ;
- A : est la pente tafel (V);
- N : est le nombre de cellules ;
- T_d : est le temps de réponse ;
- R et F : est égaux à 8,3145 j/mol K et 96485 A s/mol respectivement ;

- k et h : est représentent la constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K) et la constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J s) respectivement ;
- $P_{(H_2)}$ et $P_{(O_2)}$: est représentent respectivement la pression partielle d'hydrogène et d'oxygène à l'intérieur de la cheminée (atm) ;
- α : est le coefficient de transfert de charge ;
- z : est le nombre d'électrons en mouvement ;
- E_n : est représenté la tension de Nernst (V) ;
- ΔG : est la barrière d'énergie d'activation(J) ;
- K_c : est représenté la constante de tension à la condition nominale de fonctionnement ;
- T : est représenté la température de fonctionnement (K);
- $U_{(f(H_2))}$ et $U_{(f(O_2))}$: est sont respectivement les taux de conversion d'hydrogène et d'oxygène;
- $P_{(H_2O)}$: est la pression partielle de vapeur d'eau (atm) ;
- w : est représenté le pourcentage de vapeur d'eau dans le comburant (%) ;
- P_{air} et $P_{carburant}$: Ils symbolisent respectivement la pression absolue d'alimentation en air et en carburant (atm) ;
- $V_{carburant}$ et V_{air} : est sont respectivement les débits de carburant et d'air (l/min) ;
- x : est représenté le pourcentage d'hydrogène dans le combustible (%);
- y : est représenté le pourcentage d'oxygène dans le comburant (%).

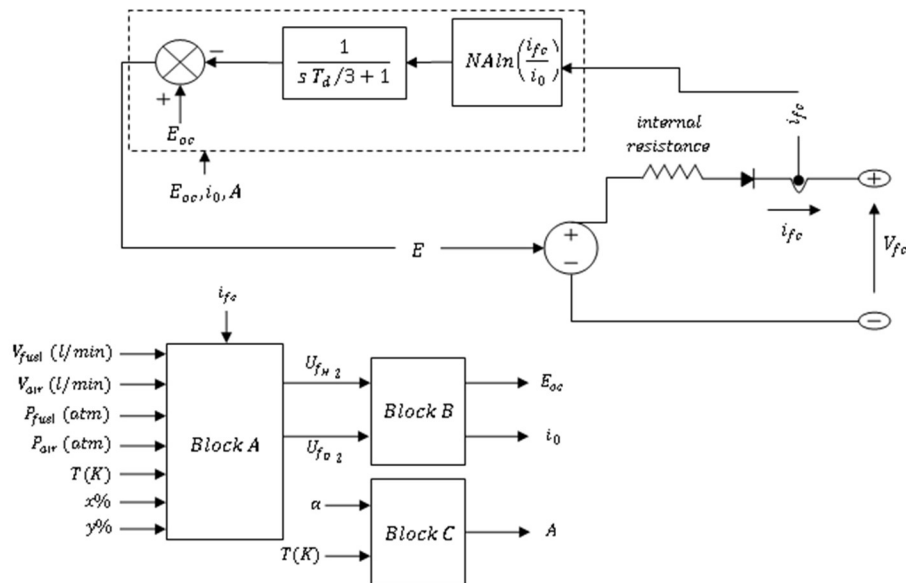


Fig.II.14. Schéma équivalent de la pile à combustible.

II.6. Modélisation de générateur diesel

La puissance électrique d'un générateur diesel est exprimée selon l'équation suivante [II.17]:

$$P_m - P_e - D(\omega_m - \omega_e) = 2H \frac{d\omega_m}{dt} \quad (II.33)$$

Où: P_e : puissance électrique délivrée ; P_m : puissance mécanique absorbée ; H : constante d'inertie du générateur diesel ; D : facteur d'amortissement ; ω_e : vitesse de l'électrique ; ω_m : vitesse du rotor.

II.7 Modélisation d'un system de stockage hybride (Batterie/SC)

Dans le cadre de cette thèse, la batterie et le supercondensateur sont combinés pour former un système de stockage d'énergie hybride. Le supercondensateur agit comme un système de stockage d'énergie supplémentaire pour la batterie pendant le processus de charge et de décharge dans des conditions changeantes (demande d'énergie, climat). Les deux systèmes de stockage sont connectés au Bus-DC via des convertisseurs abaisseurs-élevateurs DC-DC bidirectionnels, comme illustré à la figure.II.15, pour permettre au courant de circuler dans les deux sens.

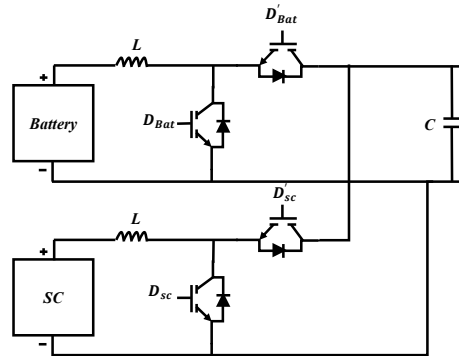


Fig.II.15 : Système de stockage d'énergie hybride proposé.

II.7.1 Modélisation de la batterie

Dans cette thèse, une batterie au plomb-acide a été utilisée.

Le circuit équivalent de la batterie peut être exprimé dans la figure.II.16 [II.18].

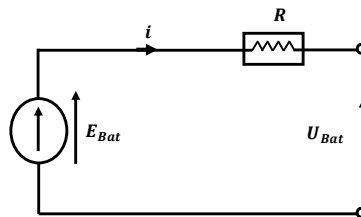


Fig.II.16 Circuit équivalent de la batterie.

La tension de la batterie est indiquée comme suit [II.19] :

$$U_{bat} = E_{bat} - R_i \cdot i \quad (II.34)$$

Où :

- Ebat : est la tension à vide ;
- Ri : est la résistance interne de la batterie ;
- i : est le courant de la batterie ;
- Ubat : c'est la tension de la batterie.

La tension à vide d'une batterie pendant la période de décharge ou de charge est exprimée comme suit [II.20]:

$$E_{bat-disc} = f_{hyst-disc}(i) - K \cdot \frac{Q}{Q-i_t} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-i_t} \cdot i_t + E_0 \quad (II.35)$$

$$E_{bat-char} = f_{hyst-char}(i) - K \cdot \frac{Q}{|i_t| - 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-i_t} \cdot i_t + E_0 \quad (II.36)$$

- fhyst_char(i) et fhyst_disc(i) : sont des fonctions de courant de batterie ;
- K : est la constante de polarisation est ;
- E0 est la tension constante ;
- Q : est la capacité maximale de la batterie ;
- i : est le courant de la batterie ;
- i * : est la dynamique du courant basse fréquence;
- it : est la capacité extraite.

II.7.1.1 L'état de charge de la batterie (SOC)

L'état de charge (SOC) d'une batterie s'exprime comme suit [II.20] :

$$SOC = 100 \left(1 + \frac{\int i_{bat} dt}{Q} \right) \quad (II.37)$$

Où : Q est la capacité de la batterie ; ibat est le courant de charge de la batterie.

- Les limites l'état de charge (le minimum (SOCmin) et le maximum (SOCmax)) sont utilisées pour évaluer les limitations de puissance de la batterie [II.20] :

$$SOC_{bat-min} \leq SOC_{bat} \leq SOC_{bat-max} \quad (II.38)$$

II.7.2 Modélisation du Supercondensateur

Il est également utilisé dans plusieurs applications de stockage d'énergie de sorte que dans notre thèse, il a été combiné avec la batterie et utilisé comme composant auxiliaire de la batterie pendant la charge et la décharge pour former un système de stockage hybride.

Le circuit équivalent du supercondensateur peut être exprimé dans la Figure.II.17 comme indiqué dans la réf [II.18].

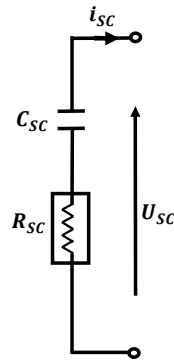


Fig.II.17 Circuit équivalent d'un supercondensateur.

Le supercondensateur peut être exprimé par les équations (II.39), (II.40) et (II.41) [II.21].

- L'équation suivante représente la capacité de SC :

$$C = \left[\frac{1}{dFQ_c \sinh\left(\frac{Q_c}{N_e^2 A_i \sqrt{8RT\epsilon\epsilon_0 c}}\right) + 2RT\epsilon\epsilon_0 A_i N_e^2} \right] \sinh\left(\frac{Q_c}{N_e^2 A_i \sqrt{8RT\epsilon\epsilon_0 c}}\right) \quad (II.39)$$

Où :

- N_e : est le nombre de couches dans l'électrode
- ϵ et ϵ_0 : est sont les permittivités du matériau d'électrolyte et de l'espace libre (F/m), respectivement
- A_i : est représenté la surface de joint entre les électrodes et l'électrolyte (m²) ;
- d : est représenté le rayon moléculaire (m) ;
- Q_c : est la charge électrique de la cellule (C) ;
- c : est la concentration molaire (mol m⁻³).

La capacité totale du SC, C_T , peut être calculée comme suit :

$$C_T = \frac{N_p}{N_c} C \quad (II.40)$$

Où : N_p et N_s est représentent les cellules parallèles et série du module du SC, respectivement.

En tenant compte des pertes résistives, la tension de sortie du SC est représentée par l'équation suivante :

$$U_{sc} = \frac{N_p Q_c}{C_T} - R_{sc} i_{sc} \quad (II.41)$$

Où : i_{sc} et R_{sc} est représentent respectivement le courant (A) et la résistance (U) du module SC.

II.7.2.1 L'état de charge du supercondensateur (SOC)

L'état de charge (SOC) du supercondensateur est déterminé comme suit [II.22] :

$$SOC_{sc-min} \leq SOC_{sc} \leq SOC_{sc-max} \quad (II.42)$$

Où : SOC_{sc-max} et SOC_{sc-min} est représentent le SOC maximum et minimum du SC.

II.8 Modélisations des convertisseurs de puissance

II.8.1. Modélisation du hacheur élévateur (Boost)

Dans notre travail, le convertisseur parallèle est un élément essentiel pour extraire le maximum d'énergie du générateur photovoltaïque, de l'éolienne et du contrôle de la pile à combustible.

Le convertisseur parallèle peut être représenté selon le schéma de principe représenté sur la Figure.II.18 de sorte que ce dernier élève la tension continue en fonction de l'état de l'interrupteur S à travers deux étapes comme suit [II.23]:

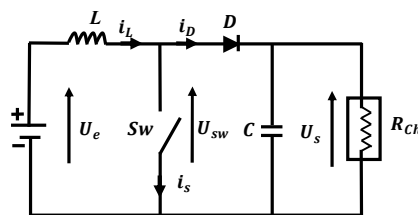


Fig.II.18 Circuit équivalent d'un convertisseur parallèle.

Etape 1 : Cette étape peut être exprimée selon la Figure.II.19 et les équations suivantes pour que l'interrupteur S soit à l'état fermé [II.23][II.24] :

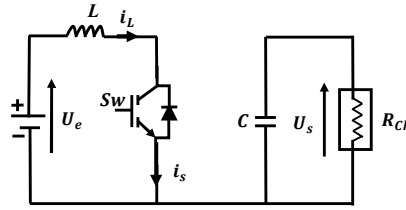


Fig.II.19 Circuit équivalent d'un convertisseur parallèle en S à l'état fermé.

Équation d'entrée V_E :

$$V_E = L \frac{dI_L}{dt} \quad (II.43)$$

Equation de la fin de l'état passant (le courant I_L augmente de la valeur de ΔI_{Lon}), pour que la fraction de la période T dans le cas de l'interrupteur S en passant soit notée D, que l'on appelle rapport cyclique :

$$\Delta I_{Lon} = \int_0^{\alpha T} dI_L = \int_0^{\alpha T} \frac{V_E dt}{L} = \frac{V_E \alpha T}{L} \quad (II.44)$$

Où: $0 < \alpha < 1$

Etape 2 : Cette étape peut être exprimée selon la Figure.II.20 et les équations suivantes pour que l'interrupteur S soit à l'état ouvert (À ce étape, l'effet du survolteur se fait par séquence d'induction avec le générateur et sa tension sera ajoutée à la tension du générateur) [II.23][II.24] :

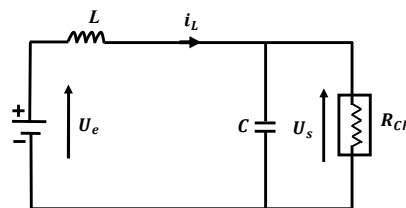


Fig.II.20 Circuit équivalent d'un convertisseur parallèle en S à l'état ouvert.

Equation de l'évolution du courant I_L :

$$V_E - V_S = L \frac{dI_L}{dt} \quad (II.45)$$

Equation de la variation du courant I_L durant l'état bloqué :

$$\Delta I_{L_{off}} = \int_0^{(1-\alpha)T} dI_L = \int_0^{(1-\alpha)T} \frac{(V_E - V_s)dt}{L} = \frac{(V_E - V_s)(1-\alpha)T}{L} \quad (II.46)$$

Puisque le courant I_L étant le même au début et à la fin de chaque cycle de commutation, il peut être exprimé selon l'équation suivante :

$$\Delta I_{Lon} + \Delta I_{L_{off}} = \frac{V_E \alpha T}{L} + \frac{(V_E - V_s)(1-\alpha)T}{L} \quad (II.47)$$

Enfin, le rapport entre V_s et V_E est obtenu selon la relation suivante :

$$\frac{V_s}{V_E} = \frac{1}{1-\alpha} \quad (II.48)$$

II.8.2. Modèle du convertisseur bidirectionnel

Dans le cadre de notre travail, le convertisseur bidirectionnel est un élément essentiel pour contrôler la charge et la décharge d'un système de stockage d'énergie (Batterie+ supercondensateur).

Le convertisseur bidirectionnel peut être représenté selon le schéma fonctionnel illustré à la Figure.II.21 [II.25] et le modèle d'équation (II.49 et II.50) qui reproduit le comportement du système de stockage d'énergie dans l'état de charge ($i_{bat,sc} < 0$) et de décharge ($i_{bat,sc} > 0$) comme détaillé dans la réf [II.18].

$$L_{Bat} \frac{dI_{Bat}}{dt} = V_{Bat} - (1 - \alpha_{Bat}) V_{DC} \quad (II.49)$$

$$L_{SC} \frac{dI_{SC}}{dt} = V_{SC} - (1 - \alpha_{SC}) V_{DC} \quad (II.50)$$

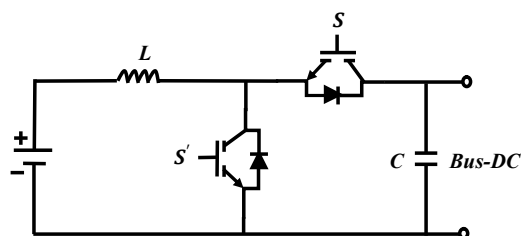


Figure.II.21. Circuit équivalent d'un convertisseur bidirectionnel.

- **Remarque :** Dans notre cas, nous avons 2 convertisseurs bidirectionnels comme indiqué sur la Figure.II.15

II.8.3. Modélisation d'un redresseur triphasé à diodes non commandées

Le redresseur triphasé non commandé est un élément essentiel dans notre travail, permettant de convertir la tension alternative produite par le générateur éolien en tension continue.

Ce convertisseur peut être exprimé selon la Figure.II.22 et la Figure.II.23 et les équations suivantes [II.26] :

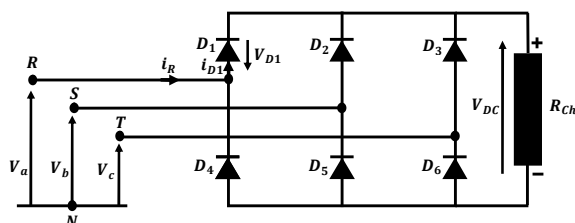


Fig.II.22 schéma équivalent d'un redresseur triphasé parallèle.

La tension redressée peut être représentée par la figure suivante :

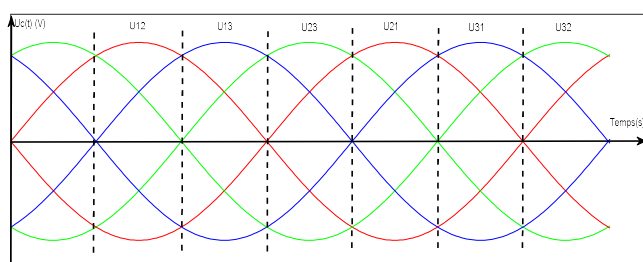


Fig.II.23 Tension triphasée redressée.

La tension redressée moyenne peut être exprimée par l'équation suivante

$$U_{moy} = \frac{1}{T} \int_T U_c(t) dt = \frac{3}{2\pi} \int_{\pi/6}^{\pi/2} V_m \left[\sin \theta - \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \right] d\theta = \frac{3\sqrt{3}V_m}{\pi} \quad (II.51)$$

Le courant peut être exprimé par les équations suivantes

$$\begin{cases} I_{max} = I_c \\ I_{moy} = \frac{1}{T} \int_T i_i(t) dt = \frac{I_c}{3} \\ I_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T i_i^2(t) dt} = \frac{I_c}{\sqrt{3}} \end{cases} \quad i \in \{1, 2, 3\} \quad (II.52)$$

Où: I_{max} : est la valeur maximale du courant ; I_{moy} : est la valeur moyenne du courant ; I_{eff} : est la valeur efficace du courant

II.8.4. Modélisation de l'onduleur triphasé

La figure.II.24 présent la structure générale d'un onduleur de tension avec filtrage de tension (R_f ; L_f) connecté au réseau électrique.

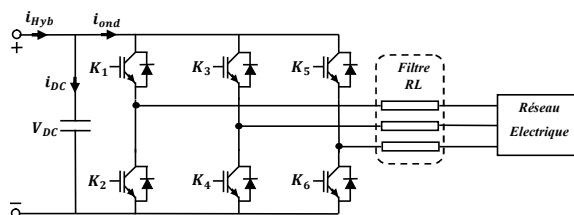


Fig.II.24 Schéma principale d'un onduleur de tension connecté au réseau électrique [II.8].

Le modèle mathématique dans le repère de Park dans ce cas peut être exprimé selon la relation suivante [II.8] :

$$\begin{cases} L_f \frac{dI_{ond}}{dt} + I_{ond} R_f = V_{sd} - S_d \frac{V_{DC}}{2} \\ L_f \frac{dI_{onq}}{dt} + I_{onq} R_f = V_{sq} - S_q \frac{V_{DC}}{2} \\ I_{on} = \frac{1}{2} [S_d I_{ond} - S_q I_{onq}] \end{cases} \quad (II.53)$$

II.9 Modélisation du bus continu

Le bus DC est un condensateur et est un élément essentiel en connectant des sources électriques à ce bus pour alimenter le réseau électrique afin que la puissance produite par chaque source soit concentrée sur ce bus à courant continu comme le montre l'équation (II.54) [II.27], et les Figures (II.25, II.26).

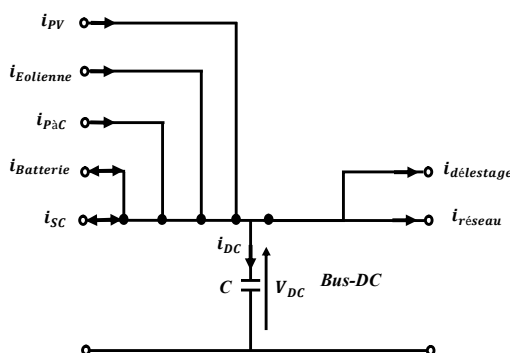


Fig.II.25. schéma équivalent d'un bus continu dans le 1^{er} système proposé.

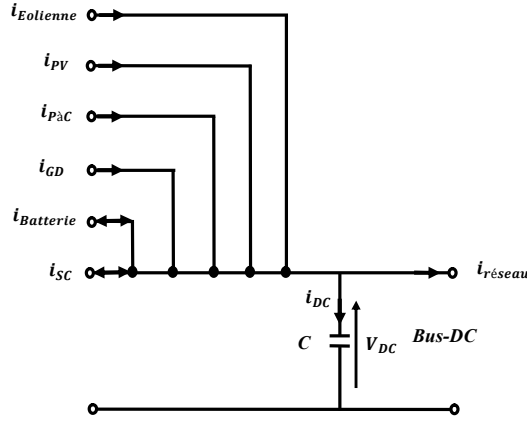


Fig.II.26. schéma équivalent d'un bus continu dans le 2^{ème} système proposé.

Le courant dans le bus DC peut être exprimé selon l'équation suivante :

$$I_{DC} = C \frac{dV_{DC}}{dt} \quad (II.54)$$

Dans notre cas le 1^{er} système proposé, le courant continu (I_{dc}) peut être exprimé selon l'équation suivante :

$$\underbrace{I_{PV} + I_{éolienne} + I_{pile \text{ à combustibile}} \pm (I_{Bat} + I_{SC}) - (I_{réseaux} + I_{délestage})}_{I_{DC}} = C \frac{dV_{DC}}{dt} \quad (II.55)$$

Dans notre cas le 2^{ème} système proposé, le courant continu (I_{dc}) peut être exprimé selon l'équation suivante :

$$\underbrace{I_{éolienne} + I_{PV} + I_{pile \text{ à combustibile}} + I_{GD} \pm (I_{Bat} + I_{SC}) - I_{réseaux}}_{I_{DC}} = C \frac{dV_{DC}}{dt} \quad (II.56)$$

Où :

- $I_{éolienne}$, I_{pv} , $I_{pile \text{ à combustibile}}$ et I_{GD} : les courants du générateur éolien, générateur photovoltaïque, pile à combustibile et générateur diesel respectivement.
- I_{Bat} et I_{sc} : les courants de charge/décharge de la batterie et supercondensateur respectivement, $I_{délestage}$: est le courant de la déléstage ,
- $I_{réseau}$: est le courant de réseau électrique.

II.10. Modélisation du filtre de tension Rf-Lf

Le modèle mathématique d'un filtrage de tension dans le repère de Park peuvent être exprimées selon la relation suivante [II.8] (plus détaille la mémé référence) :

$$V_{on(dq)} = R_f I_{t(dq)} + L_f \frac{dI_{t(dq)}}{dt} - L_f \omega_g I_{t(dq)} + V_{(dq)} \quad (II.57)$$

II.11 Modélisation d'un réseau électrique

Lors de l'utilisation d'un cadre de référence qui tourne de manière synchrone avec la tension du réseau, le modèle dynamique de la connexion au réseau s'exprime comme suit [II.28] :

$$V_{dg} = V_{di} - R_g I_{dg} - L_{dg} \frac{dI_{dg}}{dt} + L_{qg} \omega_g I_{qg} \quad (II.58)$$

$$V_{qg} = V_{qi} - R_g I_{qg} - L_{qg} \frac{dI_{qg}}{dt} - L_{dg} \omega_g I_{dg} \quad (II.59)$$

Où :

- V_{dg} , V_{qg} et V_{di} , V_{qi} : sont les éléments de tension du réseau et de l'onduleur respectivement sur l'axe de d-q.
- R_g : la résistance de réseau électrique.
- L_{dg} , L_{qg} et I_{dg} , I_{qg} : sont respectivement les éléments d'inductance et de courant de réseau électrique sur l'axe de d-q.

II.12 Conclusion

Dans ce chapitre, les éléments du 1^{ère} système hybride composé de PV/éolien/PàC/SSEH(Batterie/SC) et 2^{ème} système hybride composé de éolien/PàC/GD/SSEH(Batterie/SC) sont modélisés ainsi que les éléments de conversion d'énergie électrique (hacheurs, redresseur non commandée(AC/DC), convertisseur bidirectionnels (DC/DC)).

Pour étudier les caractéristiques du générateur utilisé dans le système éolien et la cellule photovoltaïque, les deux systèmes ont été simulés sur le programme MATLAB Simulink.

Le chapitre suivant est consacré à la gestion énergétique les deux systèmes hybrides proposés.

Chapitre III : Description des approches de commande pour les deux SEHs «PV/éolienne / PàC/SSEH » et « éolienne /PV/PàC/GD/SSEH » connectée aux réseaux électrique

III.1. Introduction

Le contrôle des systèmes d'énergies renouvelables tels que les éoliennes, les systèmes photovoltaïques et les piles à combustible est considéré comme des choses nécessaire, qui contribue à l'exploitation énergétique optimale de ces sources en extrayant le maximum d'énergie du système photovoltaïque et du système éolien à l'ombre les changements climatiques.

Dans ce chapitre, sont description des approches de contrôle appliquées aux composants des deux systèmes d'énergie hybride proposés « éolien/PV/PàC/SSEH(batterie/SC) » et « éolien/PV/PàC/DG/SSEH(batterie/SC) » connectés au réseau électrique, parmi eux figurent le contrôle des sources, le système de stockage d'énergie hybride, la tension du bus DC et du réseau électrique ainsi que le système de gestion de l'énergie.

III.2 Description du contrôle global des deux systèmes énergétiques hybrides proposés

Comme le montrent les figures III.1 et III.2, la surveillance complète des deux systèmes énergétiques hybrides proposés comprend trois parties pour les deux :

III.2.1. Partie contrôle de la source

Cette partie contient des techniques de contrôle MPPT pour extraire un maximum d'énergie du système éolien et du système photovoltaïque, en plus du contrôle de la pile à combustible.

III.2.2. Partie contrôle de la gestion d'énergie

Le système général de gestion de l'énergie électrique intégré dans les deux systèmes hybrides proposés peut être décrit selon les figures III.1 et III.2.

L'objectif de la stratégie de gestion d'énergie dans les deux systèmes hybrides proposés est de répondre à la demande de puissance dans le réseau électrique et de contrôler le flux de puissance dans des conditions climatiques changeantes avec un changement de la demande de puissance, ce sur quoi se concentrent nos travaux dans cette thèse. Par conséquent, pour gérer le flux d'énergie dans les HESs, pour le premier système nous avons proposé deux stratégies, à savoir la stratégie de gestion d'énergie classique (SGEC) et la stratégie de gestion d'énergie intelligente (SGEI) (FLC-FOPI) (Figure III.1). Quant au deuxième système, nous avons proposé une stratégie de gestion d'énergie intelligente hybride (SGEIH) (CLF-CRNA) (FLC-ANN) (Figure III.2). Nous aborderons le SGEC dans la dernière partie de ce chapitre, et quant

Chapitre III : Description des approches de commande pour les deux SEHs «PV/ éolienne /PàC/SSEH » et « éolienne /PV/PàC/GD/SSEH » connectée aux réseaux électrique

au SGEI, nous en discuterons dans le quatrième chapitre. Nous discuterons également de SGEIH au chapitre 5. L'objectif des systèmes de gestion de l'énergie électrique proposés est d'atteindre plusieurs objectifs comme suit :

- Maintien d'une tension continue stable dans des conditions dynamiques changeantes.
- Contrôle des éléments SSEH
- Maintien de l'équilibre énergétique dans l'ensemble du système
- La protection du SSEH contre les charges et décharges profondes.

III.2.3 Partie contrôle du réseau électrique

Cette partie contient la technique de contrôle DPC-SOSMC pour le premier système et DPC-FLC (CDP-CLF) pour le deuxième système afin de contrôler la puissance active et réactive circulant dans le réseau électrique.

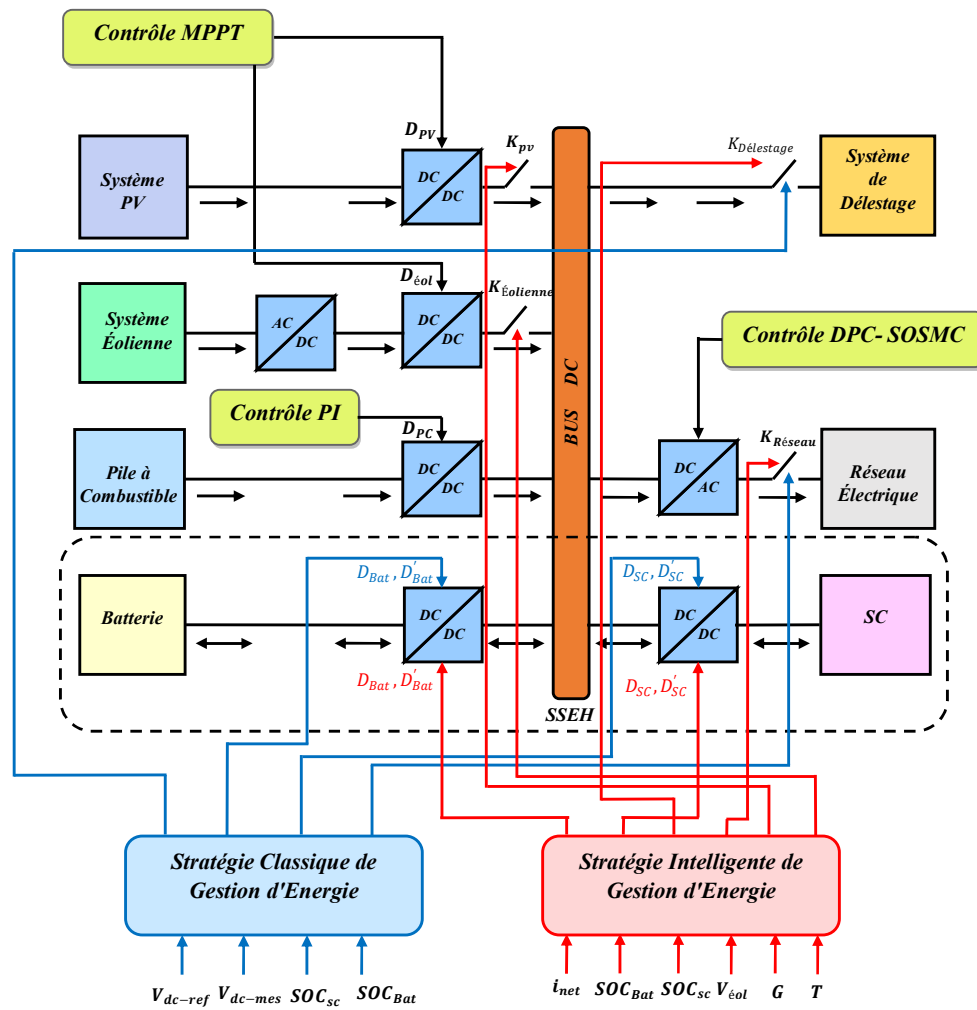


Fig.III.1. Structure de gestion de la 1^{er} system hybride proposé

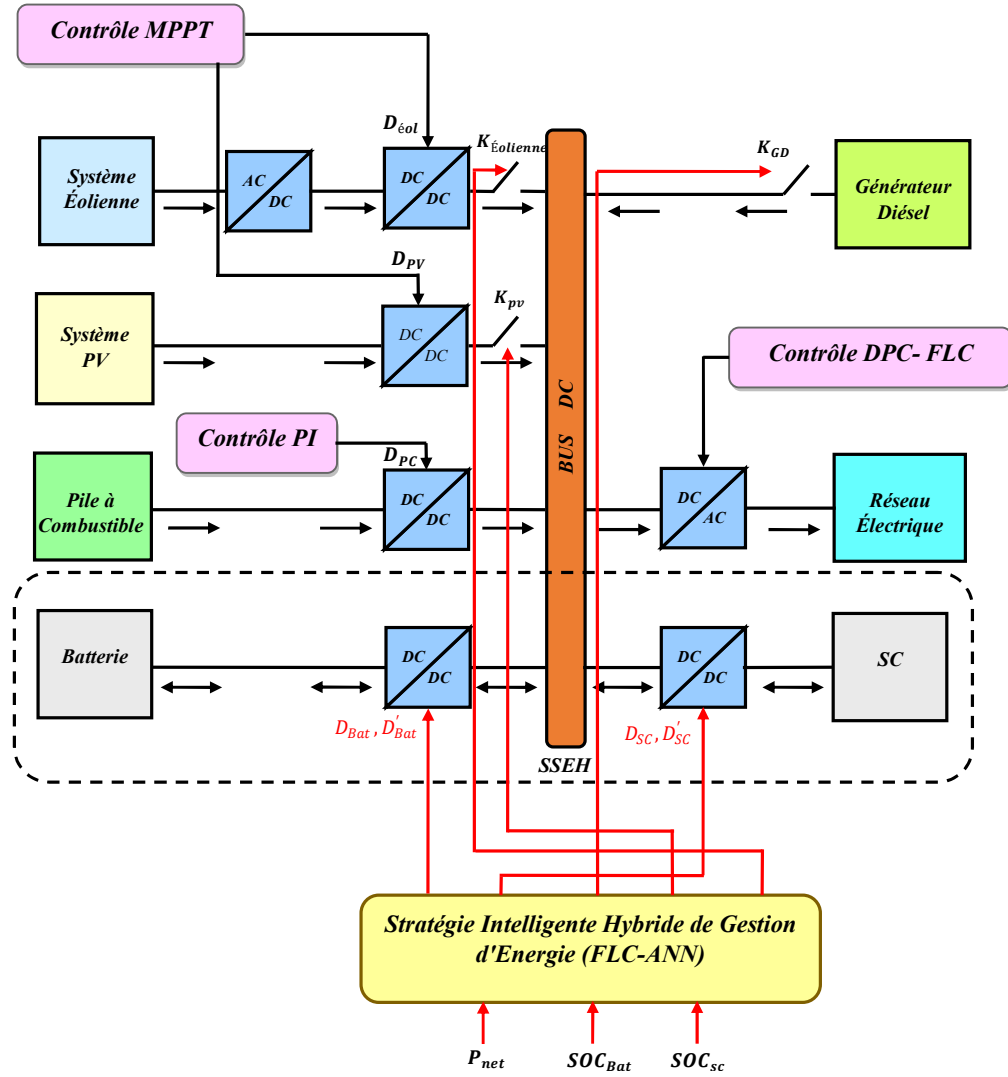


Fig.III.2. Structure de gestion de la 2^{ème} system hybride proposé

III.3. Description de Stratégie de Commande pour le Système Hybride Éolien/Photovoltaïque basée sur un contrôleur classique

III.3.1. Approche de Commande pour le Système Éolien

La figure.III.3 illustre le principe de contrôle proposé dans un système d'énergie éolienne. Le convertisseur élévateur DC-DC est un composant essentiel du système éolien dans cette étude pour une extraction d'énergie maximale de l'énergie éolienne. Le courant du convertisseur DC-DC est contrôlé par le contrôleur PI en fonction de la différence entre la vitesse réelle et la vitesse requise (extraite par MPPT) [III.1].

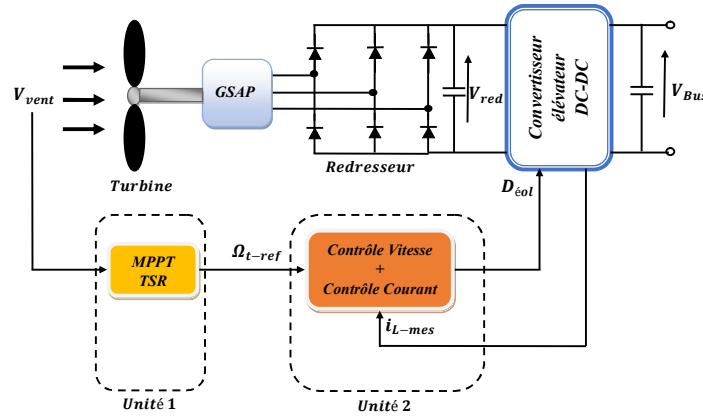


Fig.III.3 Structure générale de contrôle d'un système éolien.

Il existe deux unités fondamentales liées dont dépend le contrôle d'un système d'énergie éolienne :

- **Unité 1** : Contrôleur MPPT grâce auquel la meilleure (optimale) référence de vitesse est déterminée à chaque instant.
- **Unité 2** : L'unité de contrôle de vitesse qui produit un couple électromagnétique de référence à travers lequel le courant de référence est déterminé, et tout cela est basé sur les deux régulateurs PI pour contrôler le convertisseur DC-DC.

III.3.1.1. Suivi du point de puissance maximale (MPPT) d'un system éolien [III.2]

Pour extraire la quantité maximale d'énergie du système éolien à n'importe quelle vitesse dans la plage autorisée, un contrôleur doit fonctionner pour suivre correctement la courbe optimale (Fig.III.4), en d'autres termes, maintenir l'éolienne en fonctionnement sur cette courbe avec des vitesses de vent variables. La Figure.III.4 qui est la courbe de puissance optimale (P_{opt}), exprime la puissance mécanique du rotor produite par la turbine en fonction de la vitesse du rotor à différentes vitesses de vent ainsi que la manière de capter le maximum d'énergie des vents variables.

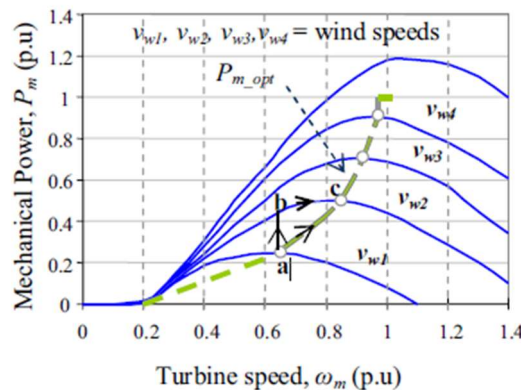


Fig.III.4 Caractéristiques de la puissance mécanique générée par la turbine en fonction de la vitesse du rotor[III.2].

La puissance optimale peut être exprimée par l'équation III.1 [III.3] :

$$P_{opt} = C_p^{opt}(\lambda_{opt}, \beta) \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (III.1)$$

III.3.1.2. Les différent Technique MPPT

Il existe plusieurs technologies MPPT pour extraire le maximum d'énergie éolienne, notamment [III.4]:

- MPPT basé sur TSR
- MPPT basé sur SMC
- MPPT basé sur OTC
- MPPT basé sur P&O
- MPPT basé sur FLC

Dans notre thèse, la technique TSR a été utilisée.

III.3.1.3. MPPT par la méthode de lambda optimal (TSR)

La technique TSR a été utilisée pour assure le contrôle de couple optimal, qui maintient la valeur du coefficient de vitesse spécifique λ à sa valeur optimale λ_{opt} avec la vitesse optimale du rotor de la turbine [III3, III.5, III.6]. Ceci est fait selon l'équation III.2 et la figue.III.5 [III.6]. Dans notre étude, $C_{p_Max} = 0,48$ et $\lambda_{opt}=8.1$, comme le montre la figure.III.6.

$$\lambda_{opt} = \frac{R\Omega_{ref}}{V} \longrightarrow \Omega_{ref} = \frac{\lambda_{opt} V}{R} \quad (III.2)$$

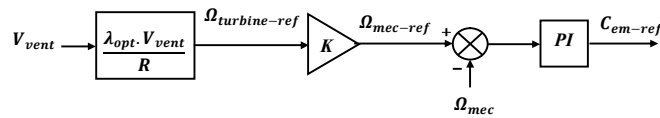


Fig.III.5 Schéma du contrôleur MPPT pour un générateur d'énergie éolienne.

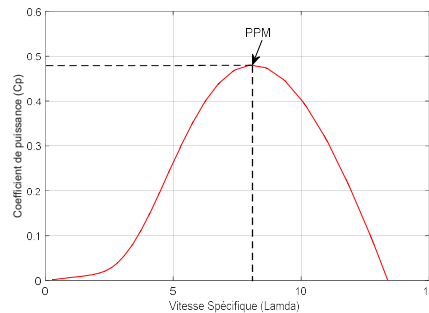


Fig.III.6. La caractéristique de la fonction Cp par rapport à λ

III.3.1.4. Contrôle de la vitesse et du courant d'un système éolien

III.3.1.4.1 Régulateur de vitesse

Pour maintenir la vitesse constante, le couple de référence est déterminé à base du régulateur de vitesse PI, afin que l'unité de commande de vitesse puisse être représentée selon la figure.III.7

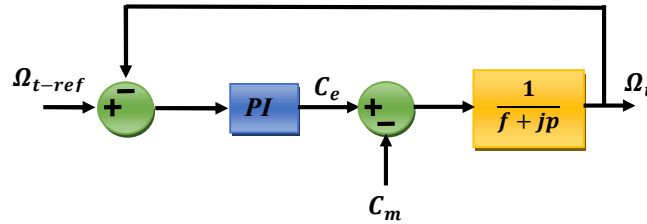


Fig.III.7. Schéma bloc de la commande de la vitesse [III.4].

III.3.1.4.2 Régulateur de courant

Pour contrôler le convertisseur DC-DC, le courant est contrôlé en fonction du régulateur PI comme indiqué sur la figure.III.8. Le courant de référence est donc déterminé par le couple électromagnétique de référence.

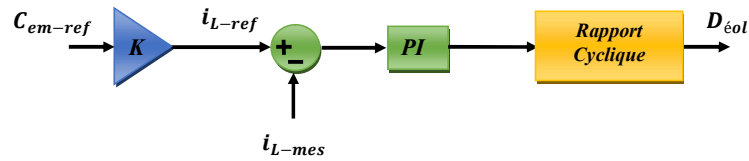


Fig.III.8. Schéma bloc de la commande de courant [III.1].

III.3.1.5 Résultats de simulation

Le système d'énergie éolienne a été simulé dans le cadre du programme Matlab Simulink pour tester l'efficacité de la technique-MPPT-TSR appliquée au système d'énergie éolienne à travers la variation la vitesse de vent, selon la Figure.III.9, et donc changement de la vitesse mécanique et de la vitesse électrique d'un système d'énergie éolienne montrant les résultats obtenus (Fig.III.10. - Fig.III.15) que le contrôle proposé représenté sur la Figure.III.3 est efficace pour optimiser la puissance du système éolien avec suivez les références requises obtenues par le contrôleur PI pour le couple, la vitesse mécanique et le courant électrique.

Comme nous le remarquons sur la Figure.III.17, la puissance du système éolienne pendant la période (0 s - 1 s) est égale à 3267 watts, puis elle change avec le changement de vitesse du vent dans la période (1 s - 3 s) pour qu'il devienne 797 W et 2267 W respectivement, puis (3 s - 4 s) augmente jusqu'à atteindre 6000 watts puis diminue jusqu'à atteindre 2692W.

Chapitre III : Description des approches de commande pour les deux SEHs «PV/ éolienne /PàC/SSEH » et « éolienne /PV/PàC/GD/SSEH » connectée aux réseaux électrique

Quant aux figures (III.18, III.19), elles représentent la tension et le courant de génératrice éolienne sur le repère abc, et les figures (III.16, III.20) représentent la puissance mécanique et la tension redressée de génératrice du système éolienne respectivement.

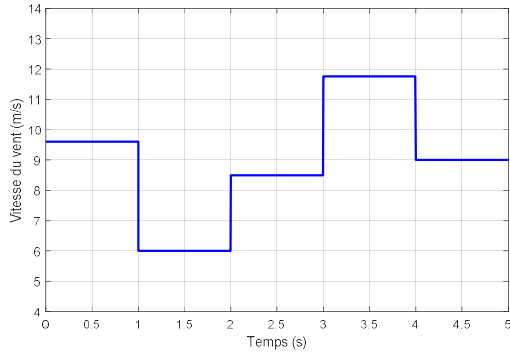


Fig.III.9. Vitesse du vent

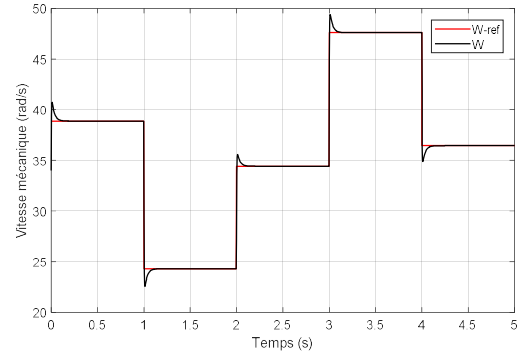


Fig.III.10. Vitesse mécanique d'un système éolienne

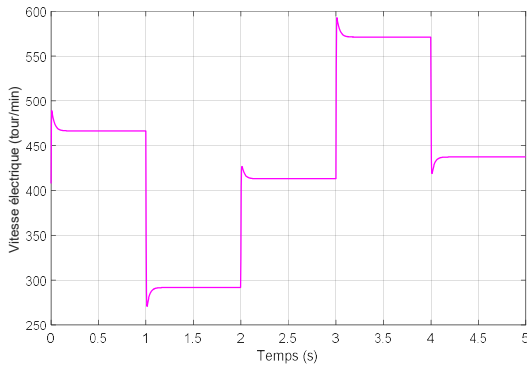


Fig.III.11. Vitesse électrique d'un GSAP d'éolienne

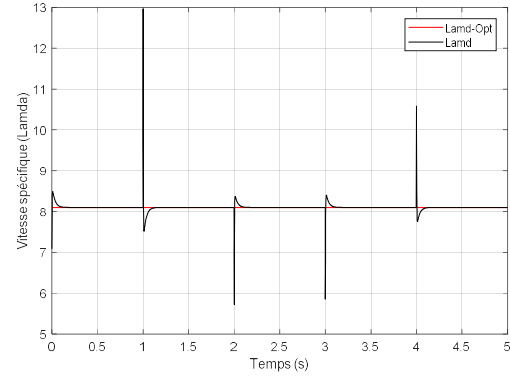


Fig.III.12. Vitesse spécifique d'un système éolienne.

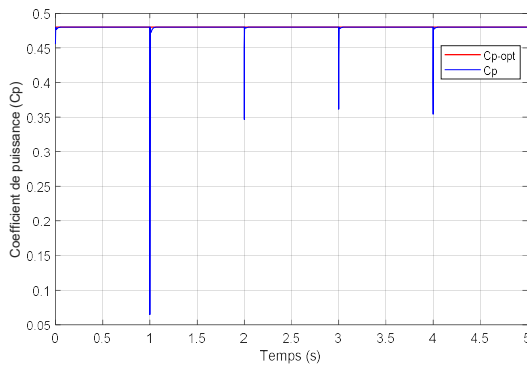


Fig.III.13. Coefficient de puissance d'un système éolienne.

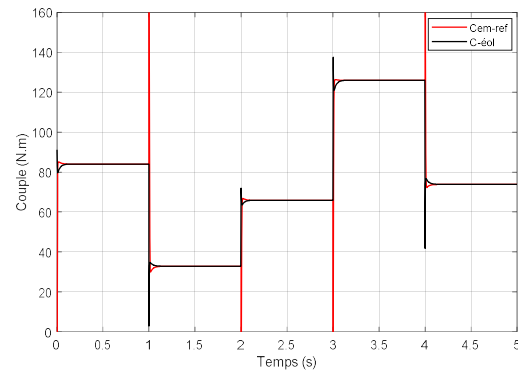


Fig.III.14. Couple d'un système éolienne.

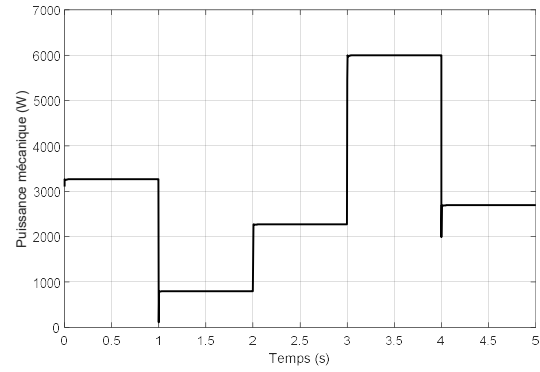
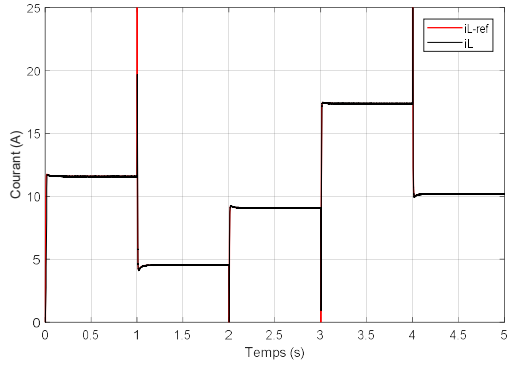


Fig.III.15. Contrôle du courant d'un système éolienne. **Fig.III.16.** Puissance mécanique d'un système éolienne.

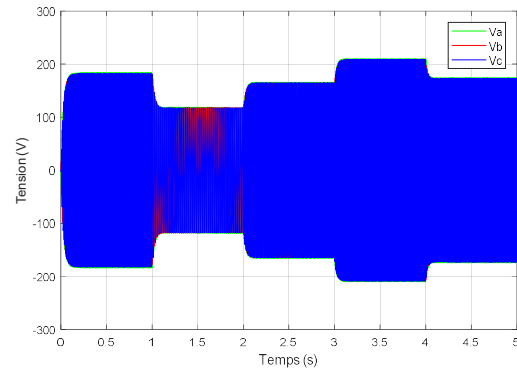
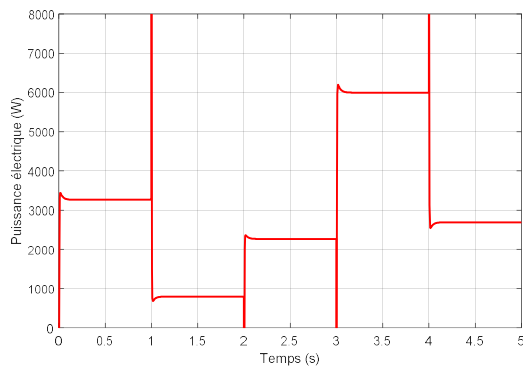


Fig.III.17. Puissance électrique d'un système éolienne.

Fig.III.18. Tension triphasé d'un GSAP.

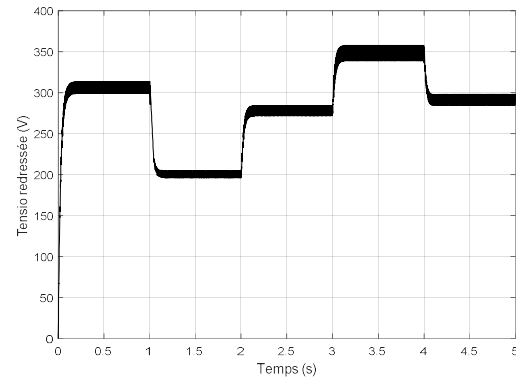
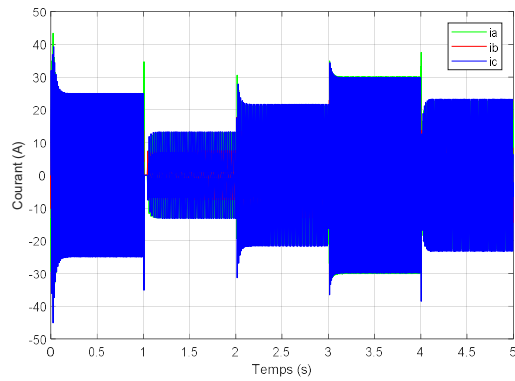


Fig.III.19. Courant triphasé d'un GSAP.

Fig.III.20. Tension redressée d'un GSAP.

III.3.2. Approche de Commande pour le Système Photovoltaïque

La Figure.III.21 illustre la construction du système photovoltaïque, qui comprend un panneau photovoltaïque et un convertisseur élévateur DC-DC avec un contrôleur MPPT. Les commandes MPPT sont utilisées pour garantir que le système photovoltaïque fonctionne de manière optimale [III.7].

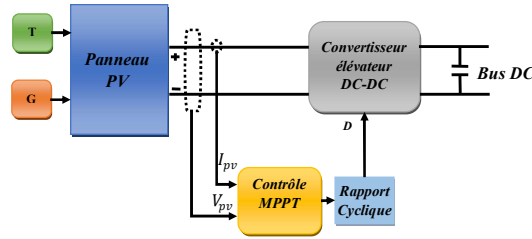


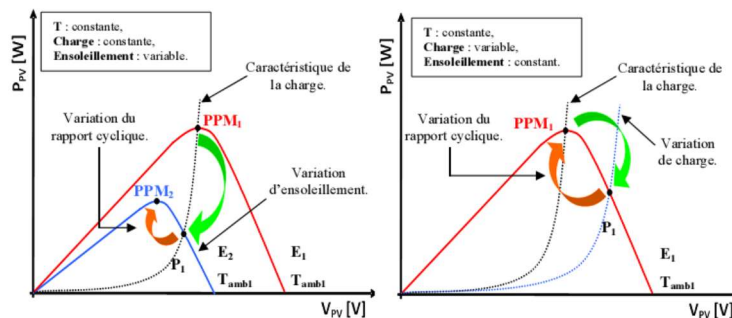
Fig.III.21. Structure de contrôle du système PV.

III.3.2.1. Suivi du point de puissance maximale (MPPT)

Le suivi du point de puissance maximum, ou en d'autres termes le contrôle MPPT, est si crucial pour le fonctionnement efficace du système photovoltaïque que l'idée de base de ce contrôle est de modifier automatiquement le rapport cyclique D en l'amenant à la valeur optimale afin d'optimiser (maximiser) la puissance que peut fournir le panneau photovoltaïque [III.8].

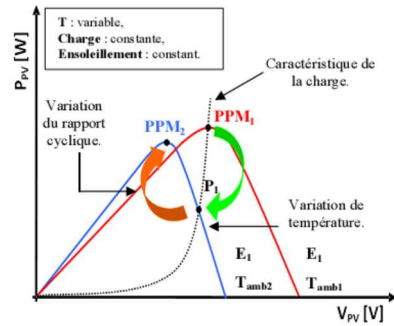
Le principe de fonctionnement du MPPT tel que mentionné en référence [III.9] peut être expliqué selon trois exemples de perturbations présentés sur la Figure.III.22 :

- **Changement de l'ensoleillement (cas A) :** Le point de fonctionnement passe à un nouveau point de fonctionnement P_1 , qui est quelque peu éloigné du point optimal PPM_2 après avoir atteint le point de puissance maximale PPM_1 . Pour respecter le nouveau point de puissance maximale PPM_2 en réponse aux fluctuations de la lumière solaire, la valeur du rapport cyclique doit être réajustée.
- **Changement de charge (cas B) :** Le point de fonctionnement change en raison du changement de charge et peut se déplacer vers un nouvel emplacement optimal (PPM_1) à la suite d'une action de commande.
- **Changement de température (Cas C) :** Dans ce cas, des fluctuations surviennent dans la température de fonctionnement du GPV, ce qui entraîne un changement du point de fonctionnement, sachant que ce dernier n'est pas soumis aux mêmes contraintes temporelles que les deux scénarios précédents.



A) Cas de la lumière solaire changeante

B) Cas de changement de charge



C) Cas de changement de température.

Fig.III.22. Principe de suivi du point de puissance maximale.

III.3.2.2 Les différents Techniques MPPT

Bien que l'énergie solaire soit une source d'énergie renouvelable utilisée, sa conversion est affectée par des facteurs environnementaux et technologiques (c'est-à-dire le rayonnement et la température du module PV), de sorte que la technologie Maximum Power Point Tracking (MPPT) est utilisée pour améliorer son efficacité et augmenter la puissance du générateur PV [III.10]. Il existe plusieurs façons d'utiliser la technique MPPT, notamment les suivantes [III.11]:

1. MPPT basé sur P&O
2. MPPT basé sur Inc&Cond
3. MPPT basé sur FLC
4. MPPT basé sur I-V curve scanning-tracking
5. MPPT basé sur Fibonacci searching
6. MPPT basé sur Extremum Seeking Control (ESC)
7. MPPT basé sur Particle swarm optimization (PSO)
8. MPPT basé sur Artificial neural network (ANN)
9. ext....

Dans notre thèse, la technique MPPT basée sur Perturb & Observe (P&O) a été utilisée pour le premier système et la technique FLC pour le deuxième système.

III.3.2.3. Technique de perturbation et d'observation (P & O)

La mise en œuvre de la technique P&O considérée est moins coûteuse car la tension du générateur PV est détectée par un seul capteur de tension [III.12]. Où cette technique est appliquée selon l'algorithme illustré à la Figure.III.23 [III.13].

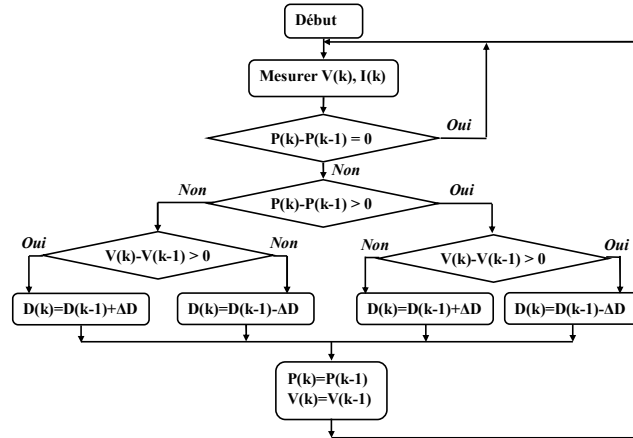


Fig.III.23. Organigramme de l'algorithme de contrôle P & O.

III.3.2.4. Technique de CLF

La technique MPPT basée sur le contrôle par logique floue (FLC) d'un système photovoltaïque a été implémentée. Malgré les défis auxquels elle est confrontée la technique de contrôle à MPPT-logique floue, elle a la capacité de sélectionner facilement le point de puissance maximale des panneaux photovoltaïques [III.14]. Les règles floues de cette technique sont modélisées selon le tableau 1, qui contient essentiellement les entrées, typiquement E et ΔE, qui sont déterminées selon les équations (Eq.III.3 et Eq.III.4) (telles que dP/dV disparaît à PPM) dans afin de déterminer ΔD représentant la sortie, par exemple, si E est PB, cela signifie que le point de fonctionnement est loin à gauche de PPM et par conséquent, ΔD sera PB pour augmenter le rapport cyclique si ΔE est ZE [III.15].

$$E(k) = \frac{P(k) - P(k-1)}{V(k) - V(k-1)} \quad (III.3)$$

$$\Delta E(k) = E(k) - E(k-1) \quad (III.4)$$

Tableau III.1. Règles CLF appliquées au MPPT-PV.

ΔE	E				
	GN	PN	ZE	PP	GP
GN	GN	GN	GN	GN	ZE
PN	GN	PN	PN	ZE	PP
ZE	GN	PN	ZE	PP	GP
PP	PN	ZE	PP	GP	GP
GP	ZE	PP	GP	GP	GP

Où : **E** : Erreur, **ΔE** : Variation de l'erreur, **ΔD** : Variation du rapport cyclique, **GN** : Grand Négatif, **PN** : Petit Négatif, **ZE** : Zéro, **PP** : Petit Positif et **GP** : Grand Positif.

III.3.2.5. Résultats de simulation

Le système photovoltaïque a été simulé dans le cadre du programme Matlab Simulink pour tester l'efficacité de la technique-MPPT-P&O appliquée au système photovoltaïque à travers la variation du rayonnement solaire et température constante, selon les Figures III.24 et III.25, où les résultats obtenus montrent (Figures III.26, III.27 et III.28) que la technique proposée à l'efficacité d'optimisation de la puissance du système photovoltaïque, de sorte que nous remarquons sur la Figure III.28 que la puissance dans le système photovoltaïque sur l'intervalle (0s - 1s) est égale à 6000 watts, alors il change avec le changement de rayonnement solaire dans l'intervalle (1s – 5s) comme d'escalée de sorte qu'il devient 4450 watts puis diminue jusqu'à atteindre 3240 watts

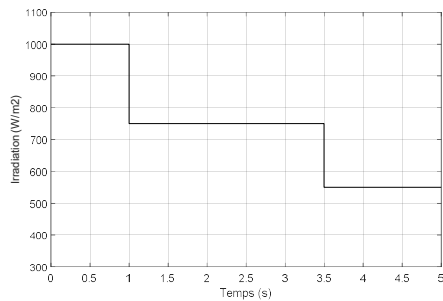


Fig.III.24. Irradiation solaire.

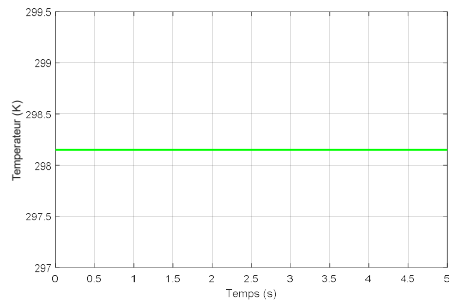


Fig.III.25. Température ambiante.

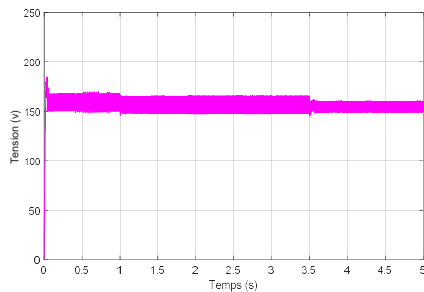


Fig.III.26. Tension d'un système PV.

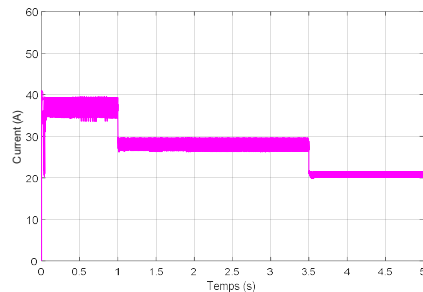


Fig.III.27. Courant d'un système PV.

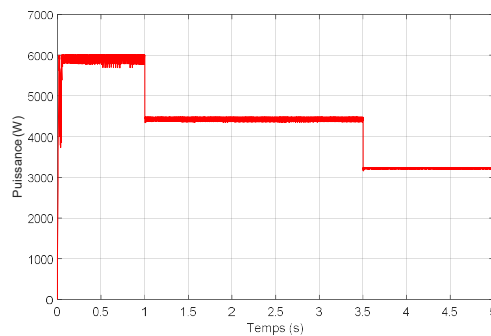


Fig.III.28. Puissance d'un système PV

III.4. Stratégies de commande du system de stockage d'énergie hybride et du bus continu

III.4.1. Commande d'un system de stockage d'énergie hybride (Batterie/SC)

Le système de stockage d'énergie hybride (SSEH) est l'un des éléments de base de notre système hybride afin de fournir l'énergie nécessaire dans le cas où les sources ne seraient pas en mesure de fournir de l'énergie et de stocker l'énergie en cas de surplus, tout cela reste dans les limites autorisées (SOC_{min} et SOC_{max}), en les contrôlant comme suit :

III.4.1.1. Commande de la batterie et SC

Le convertisseur DC-DC bidirectionnel (buck-boost), couplé à la batterie et au SC, est piloté par deux interrupteurs IGBT, notés D_{Bat} , D_{SC} , D_{Bat}' et D_{SC}' (voir la fig. II.15), selon deux modes :

- Dans le premier mode, il fonctionne comme un convertisseur abaisseur, de sorte que D_{Bat} et D_{SC} sont à l'état **OFF**, tandis que D_{Bat}' et D_{SC}' sont à l'état **ON** ; ainsi, la batterie et le SC sont en mode de charge ($i_{bat-ref} < 0$, $i_{sc-ref} < 0$).
- Dans le second mode, il fonctionne comme un convertisseur élévateur, de sorte que D_{Bat} et D_{SC} sont à l'état **ON**, tandis que D_{Bat}' et D_{SC}' sont à l'état **OFF** ; ainsi, la batterie et le SC sont en mode de décharge ($i_{bat-ref} > 0$, $i_{sc-ref} > 0$).

III.4.2. Contrôleur du bus continu

La stabilité du bus DC dans notre système hybride est essentielle en suivant la valeur de référence (dans notre cas $V_{dc_ref}=800\text{ v}$), nous contrôlons donc la stabilité du bus DC en deux manières différentes en fonction de la stratégie de gestion appliquée au système comme suit:

III.4.2.1. Cas de stratégie classique de gestion d'énergie

Dans ce cas, l'unité de contrôle du bus DC est intégrée au système de gestion de sorte qu'elle basée sur le système de stockage d'énergie hybride (batterie/SC) à travers le processus de charge et de décharge basé sur SOC_{Bat} et SOC_{sc} . Trois régulateurs classiques PI sont également utilisés, un dont contrôle la différence entre le $V_{dc_mesuré}$ et le $V_{dc_référence}$ quant au deuxième et troisième régulateurs, ils contrôlent la différence entre les i_{bat} , i_{sc} mesurés et la référence $i_{bat-ref}$, i_{sc-ref} , respectivement, comme le montre la Fig.III.31

III.4.2.2. Cas de stratégie intelligente de gestion d'énergie

Dans ce cas, l'unité de contrôle du bus DC est séparé sur d'un système de gestion, elle dépend donc de la pile à combustible, sachant que l'unité de contrôle du bus DC est complémentaire

(partie essentielle) au système de gestion intelligent, de sorte qu'on utilise un seul régulateur classique PI qui contrôle le différence entre le $V_{dc_mesuré}$ et le $V_{dc_référence}$ (Figure.III.29) et contrôle ainsi la pile à combustible via un convertisseur DC-DC.

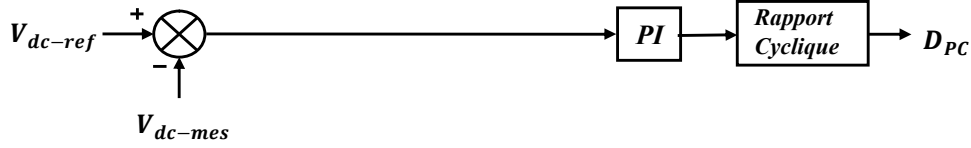


Fig.III.29 Unité de contrôle d'un système pile à combustible.

III.5. Description de la stratégie de gestion d'énergie classique (SGEC)

La Figure.III.30 représente un organigramme d'une SGEC. Cette stratégie repose sur trois contrôleurs proportionnels intégraux (PI) selon une boucle de régulation. Deux régulateurs PI sont utilisés pour calculer le courant de référence de la batterie et du supercondensateur afin de déterminer le processus de charge et de décharge en fonction du l'état de charge (SOC) des éléments SSEH et de la demande de puissance. Quant au troisième régulateur PI, il ajuste la tension de bus continue à la valeur de référence de la tension. Cette stratégie proposée est conçue selon la Figure.III.31.

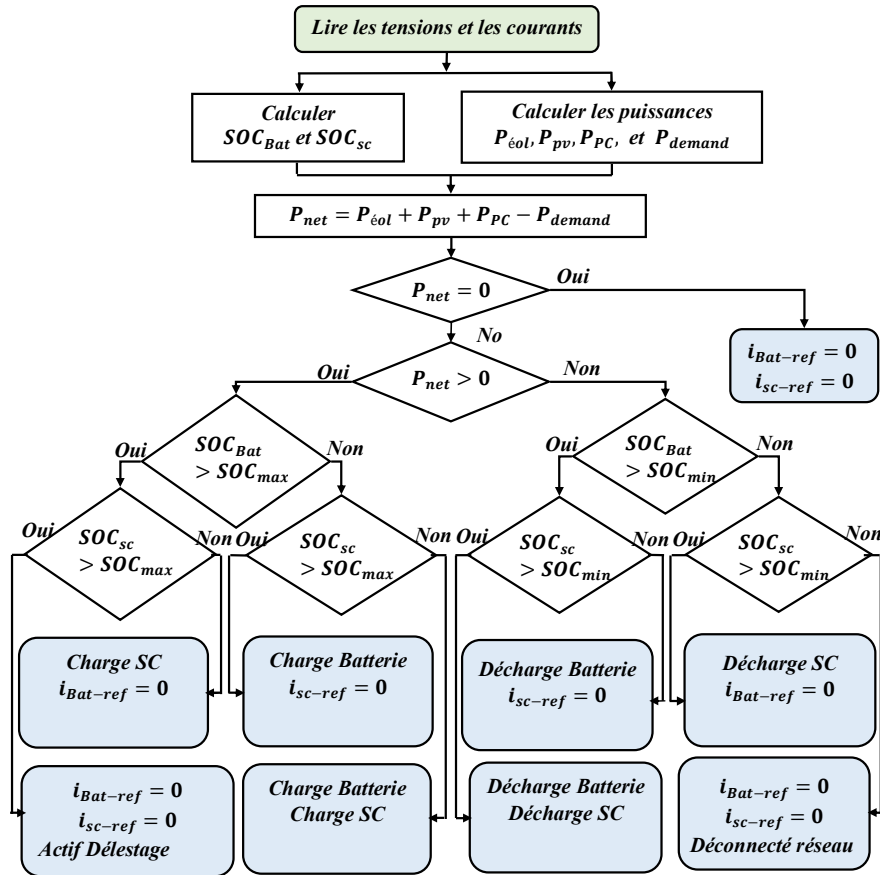


Fig.III.30. Organigramme de la stratégie de gestion d'énergie classique.

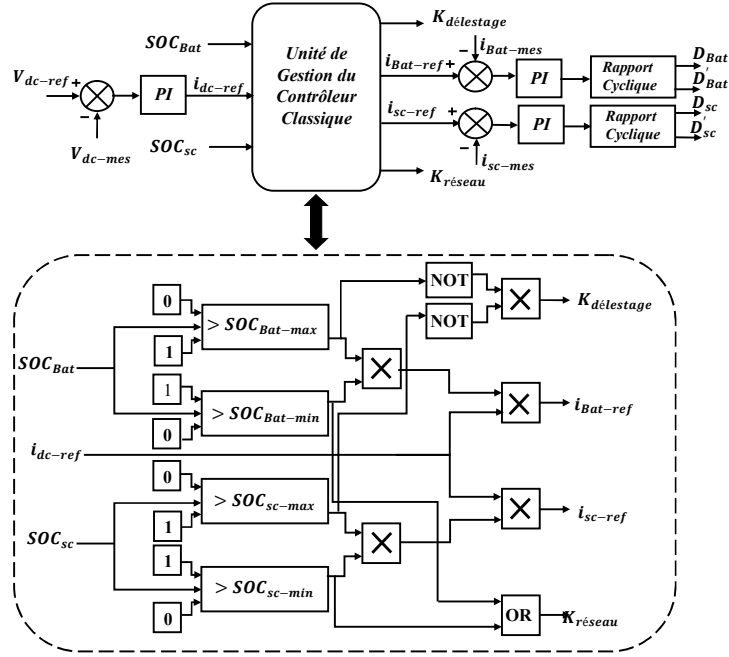


Fig.III.31. Le schéma d'une stratégie de gestion d'énergie basée sur un contrôleur classique.

III.6. Contrôle du convertisseur DC/AC côté réseau basée sur deux techniques

La puissance active et réactive circulant dans le réseau électrique est contrôlée par le convertisseur DC/AC afin de fournir et de réguler la puissance nécessaire au consommateur selon le SEH. Dans cette section, les puissances active et réactive sont contrôlées en mettant en œuvre un contrôle direct de la puissance (DPC) basé sur la technique SOSMC pour le 1^{ère} système hybride. Quant au 2^{ème} système hybride, le contrôle direct de la puissance (DPC) a été mis en œuvre sur la base de la technique FLC (CLF). La commande du convertisseur côté réseau pour les deux systèmes est illustrée selon la conception schématique présentée à la Figure III.32.

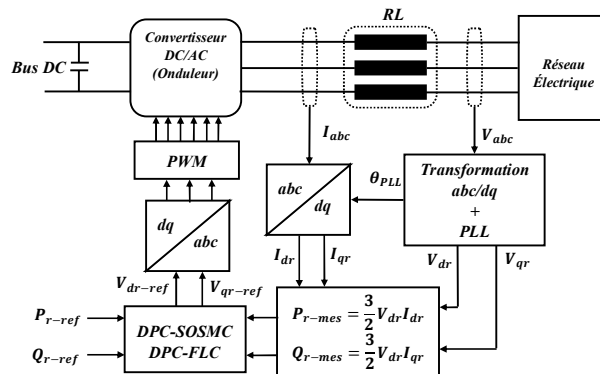


Fig.III.32 Structure de contrôle du réseau électrique.

III.6.1.Description Contrôle du convertisseur DC/AC côté réseau basée sur technique DPC-SOSMC

L'utilisation de la linéarisation est une méthode populaire pour traiter le problème du flux de puissance active et réactive [III.16,III.17]. Les règles de contrôle conventionnelles [III.18,III.19,III.20] peuvent être insuffisantes pour contrôler des systèmes non linéaires avec des paramètres non fixes. Ainsi, pour tenir compte de ces difficultés de contrôle, des contrôles non linéaires et robustes sont nécessaires. À cet égard, le mode glissant d'ordre supérieur (SOSMC) s'est avéré particulièrement adapté aux systèmes non linéaires, bien que de nombreuses techniques contemporaines puissent être utilisées à cette fin en montrant des caractéristiques robustes par rapport aux perturbations externes et aux incertitudes des paramètres de système [III.21,III.22].

Dans cette partie, pour contrôler la puissance active et réactive circulant dans le réseau par le convertisseur (DC/AC) pour le 1^{ère} système hybride proposé, un contrôle direct de la puissance basé sur la technique du mode glissant de second ordre (DPC-SOSMC) est appliqué.

Dans le référentiel ***d-q***, les puissances active (***Pr***) et réactive (***Qr***) entrant dans le réseau sont représentées par [III.23] :

$$P_r = \frac{3}{2} (V_{dr} I_{dr} + V_{qr} I_{qr}) \quad (III.5)$$

$$Q_r = \frac{3}{2} (V_{dr} I_{qr} - V_{qr} I_{dr}) \quad (III.6)$$

Le vecteur spatial est placé sur l'axe d pour le contrôle séparé de ***Pr*** et ***Qr***, fixant ainsi ***V_qr=0***, où la formule pour ***Pr*** et ***Qr*** devient la suivante [III.23] :

$$P_r = \frac{3}{2} (V_{dr} I_{dr}) \quad (III.7)$$

$$Q_r = \frac{3}{2} (V_{dr} I_{qr}) \quad (III.8)$$

Pour réaliser le fonctionnement de ce système avec un facteur de puissance unitaire, la puissance réactive optimale est mise à zéro : La puissance active optimale ***Pr_ref*** peut être écrite en fonction des demandes du réseau, alors que ***Qr_ref=0***.

III.6.1.1. Conception d'un contrôleur de la puissance active et réactive basé sur DPC-SOSMC

III.6.1.1.1. Régulateur de la puissance active et réactive

Afin de suivre la puissance active en fonction de la puissance requise et la puissance réactive en fonction de la puissance de référence (dans notre cas, $Q_{r_ref} = 0$) injectée dans le réseau électrique, la différence entre la puissance active mesurée ($P_{r_mesurée}$) et la puissance de référence ($P_{r_référence}$), ainsi que la différence entre la puissance réactive mesurée ($Q_{r_mesurée}$) et la puissance de référence ($Q_{r_référence}$), sont contrôlées sur la base de l'unité de commande SOSMC. Ainsi, ce contrôleur peut être représenté par la figure III.33.

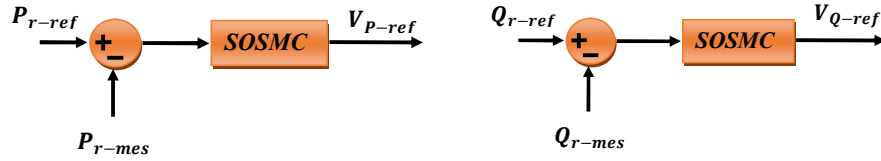


Fig.III.33. Schéma boucle d'un contrôle de puissance active et réactive basée sur DPC-SOSMC [III.4].

Nous exprimons les surfaces de glissement des puissances P_r , Q_r par l'eq.III.9 [III.24] :

$$\begin{cases} S_P = P_{r-ref} - P_r \\ S_Q = Q_{r-ref} - Q_r \end{cases} \quad (III.9)$$

Les dérivées premières de S_P et S_Q des surfaces, sont représentées par l'eq.III.10 [III.24] :

$$\begin{cases} \dot{S}_P = \dot{P}_{r-ref} - \frac{3}{2} \frac{V_{dr}}{L_r} (-V_{dr} - R_r I_{dr} + L_r \omega_r I_{qr}) - \frac{V_{id}}{L_r} \\ \dot{S}_Q = \dot{Q}_{r-ref} - \frac{3}{2} \frac{V_{qr}}{L_r} (-V_{qr} - R_r I_{qr} - L_r \omega_r I_{dr}) - \frac{V_{iq}}{L_r} \end{cases} \quad (III.10)$$

Si nous mettons Y_P et Y_Q comme indiqué par l'eq.III.11 [III.24] :

$$\begin{cases} Y_P = \dot{P}_{r-ref} - \frac{3}{2} \frac{V_{dr}}{L_r} (-V_{dr} - R_r I_{dr} + L_r \omega_r I_{qr}) \\ Y_Q = \dot{Q}_{r-ref} - \frac{3}{2} \frac{V_{qr}}{L_r} (-V_{qr} - R_r I_{qr} - L_r \omega_r I_{dr}) \end{cases} \quad (III.11)$$

L'expression de la seconde dérivation de S_P , S_Q comme indiqué par l'eq.III.12 [III.24] :

$$\begin{cases} \ddot{S}_P = \dot{Y}_P - \frac{\dot{V}_{id}}{L_r} \\ \ddot{S}_Q = \dot{Y}_Q - \frac{\dot{V}_{iq}}{L_r} \end{cases} \quad (III.12)$$

Chapitre III : Description des approches de commande pour les deux SEHs «PV/ éolienne /PàC/SSEH » et « éolienne /PV/PàC/GD/SSEH » connectée aux réseaux électrique

Le SOSMC suggéré dans cette section est divisé en deux parties, chacune basée sur l'algorithme de super twisting (ST) tel qu'utilisé dans [III.24,III.25]

$$\begin{cases} V_P^{ref} = V_P^N + V_P^{eq} \\ V_P^N = \omega_1 + \omega_2 \end{cases} \quad (III.13)$$

$$\begin{cases} \dot{\omega}_1 = -h_1 \text{sign}(S_p) \\ \omega_2 = -Z_1 \sqrt{|S_p|} \text{sign}(S_p) \end{cases} \quad (III.14)$$

$$\begin{cases} V_Q^{ref} = V_Q^N + V_Q^{eq} \\ V_Q^N = \omega_1 + \omega_2 \end{cases} \quad (III.15)$$

$$\begin{cases} \dot{\omega}_1 = -h_2 \text{sign}(S_Q) \\ \omega_2 = -Z_2 \sqrt{|S_Q|} \text{sign}(S_Q) \end{cases} \quad (III.16)$$

$$\begin{cases} h_i \succ \frac{\mu_i}{L_r} \\ Z_i \geq \frac{\mu_i(h_i + \mu_i)}{L_r^2(h_i + \mu_i)} \\ |Y_i| \prec \mu_i ; i = 1, 2 \end{cases}$$

Où : h_i et Z_i sont des constantes.

III.6.2. Description Contrôle du convertisseur DC/AC côté réseau basée sur technique DPC-FLC

Dans cette partie, pour contrôler la puissance active et réactive circulant dans le réseau pour le 2^{ème} système hybride proposé, nous proposons un contrôle direct de puissance (DPC) basé sur FLC.

III.6.2.1. Conception d'un contrôleur CLF

III.6.2.1.1. Régulateur de la puissance active et réactive

La puissance active et réactive sont contrôlées sur la base du contrôleur FLC, en surveillant la différence entre $Pr_{mesurée}$ et $Pr_{référence}$, ainsi que la différence entre $Qr_{mesurée}$ et $Qr_{référence}$ (dans notre cas, $Qr_{ref} = 0$) (figure III.34).

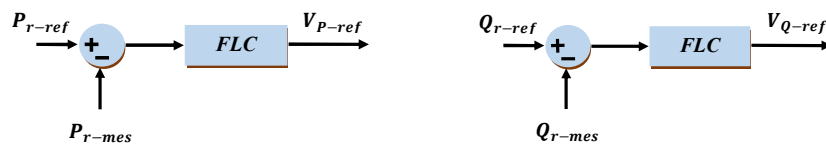


Fig.III.34. Schéma boucle d'un contrôle de puissance active et réactive basée sur DPC-FLC.

Chapitre III : Description des approches de commande pour les deux SEHs «PV/ éolienne /PàC/SSEH » et « éolienne /PV/PàC/GD/SSEH » connectée aux réseaux électrique

Dans ce travail, nous utilisons le contrôleur logique flou pour contrôler la puissance active et réactive. Cette unité est conçue en proposant 9 règles comme indiqué dans le tableau 3. Ces règles (variables de sortie) sont déterminées en fonction des variables d'entrée $e_{p,q}$ (erreur de puissance active et réactive) et $\Delta e_{p,q}$ (Variation de l'erreur de puissance active et réactive), qui sont spécifiées par les équations (III.17, III.18, III.19 et III.20) respectivement. Par exemple, si $e_{p,q}$ est GN et $\Delta e_{p,q}$ est GP, alors le résultat est ZE. Les variables linguistiques utilisées dans cette unité sont les suivantes : ZE est égal à zéro, GP est grand positif et GN est grand négatif.

$$e_{P_r} = P_{r-ref} - P_{r-mes} \quad (III.17)$$

$$\Delta e_{P_r} = \Delta e_{P_r}(k) - \Delta e_{P_r}(k-1) \quad (III.18)$$

$$e_{Q_r} = Q_{r-ref} - Q_{r-mes} \quad (III.19)$$

$$\Delta e_{Q_r} = \Delta e_{Q_r}(k) - \Delta e_{Q_r}(k-1) \quad (III.20)$$

Tableau III.2. Règles CLF appliquées au DPC.

$e_{p,q}$	$\Delta e_{p,q}$		
	GN	ZE	GP
GN	GN	GN	ZE
ZE	GN	ZE	GN
GP	ZE	GP	GP

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre, les approches de contrôle appliquées aux éléments d'un système hybride éolien/PV/PàC/batterie/SC telles que le contrôle de : les hacheurs, convertisseur (DC/AC), les convertisseurs bidirectionnel (DC/DC) sont descriptions.

Pour optimiser la puissance du système éolien et du système photovoltaïque, les techniques MPPT ont été utilisées, où la technique TSR a été appliquée au système éolien et la technique P&O et FLC (CLF) au système photovoltaïque. Pour y parvenir, les deux systèmes ont été simulés sur le logiciel MATLAB Simulink à travers le changement d'irradiation solaire et la vitesse du vent, où des résultats satisfaisants ont été obtenus.

Le quatrième chapitre est consacré à la gestion énergétique du premier système hybride proposé.

**Chapitre IV : Simulation et Optimisation
de gestion énergétique d'un 1^{ère} SEH
proposé basé sur une stratégie
d'intelligence artificielle**

IV.1. Introduction

Après avoir conçu le système énergétique hybride, il est nécessaire de contrôler la distribution d'énergie entre les éléments de ce dernier, c'est ce qu'on appelle la gestion de l'énergie. Dans diverses situations de fonctionnement, l'utilisation d'une stratégie de gestion de l'énergie classique est inadéquate. Il est important d'utiliser une stratégie de gestion de l'énergie plus fiable avec des performances optimales.

Dans ce chapitre, le premier système énergétique hybride proposé sera simulé sur MATLAB-Simulink après avoir proposé deux stratégies de gestion de l'énergie - la stratégie de gestion d'énergie classique (SGEC) (voir CH3) et une stratégie de gestion d'énergie intelligente (SGEI) basée sur (CLF-FOPI) pour assurer une gestion optimale du système énergétique hybride proposé (éolienne/PV/PàC/batterie/SC) (voir CH3-Fig.III.1) et corrige les défauts de la stratégie de contrôle classique. En plus de comparer ces deux stratégies à travers les résultats des simulations réalisées et de clarifier les différences entre elles. Enfin, pour obtenir une bonne qualité de flux d'énergie dans le réseau électrique, il est proposé d'appliquer un contrôle direct de puissance basé sur un contrôleur SOSMC (DPC-SOSMC) dans le convertisseur DC/AC (ondulière) côté réseau pour contrôler la puissance active et réactive circulant dans le réseau électrique, comme décrit au chapitre trois.

IV.2. Critères d'optimisation du système hybride [IV.1]

Le processus de dimensionnement du SERH détermine la combinaison la moins coûteuse de tailles de générateurs (conventionnels et renouvelables) ainsi que de capacité de stockage qui répondra à la demande attendue tout en maintenant un niveau minimum de sécurité. Les critères de conception couramment utilisés sont brièvement discutés comme suit :

IV.2.1. Coût de l'énergie

Le coût énergétique du système hybride est affecté par certains facteurs, notamment :

- Frais d'exploitation et d'entretien
- Coûts capitalisme
- Possibilité de diminuer le coût de l'équipement à mesure que le volume augmente
- La quantité d'énergie générée et la période de consommation annuelle.

Le coût énergétique du système hybride peut être calculé selon l'équation (IV.1). De plus, le coût électrique par kilowattheure peut être exprimé selon l'équation (IV.2).

Chapitre IV : Simulation et Optimisation de gestion énergétique d'un 1^{ère} SEH proposé basé sur une stratégie d'intelligence artificielle

$$C_E = C_{Cap} \times \frac{R}{E_{Tot}} + C_{O\&M} \quad (IV.1)$$

où **CE** est le coût de l'énergie, **CCap** est le coût en capital pour le générateur SERH et le dispositif de stockage, **R** est le taux d'actualisation annuel pour les coûts en capital, **ETot** est l'énergie totale générée et **CO&M** est les coûts annuels d'exploitation et de maintenance.

$$Cost / kWh(\$) = \frac{C_{Total}}{E_{Total}(kWh)} \quad (IV.2)$$

Où : **CTotal** est le coût annuel total engagé pour produire la production annuelle totale d'électricité **ETTotal** en **kWh**.

IV.2.2. Coût du cycle de vie (Life Cycle Cost (LCC))

Le coût du cycle de vie (LCC) d'un SERH est coût total encouru pendant la vie productive. La faisabilité économique du système est déterminée à l'aide du LCC, de sorte que plus le LCC est faible, meilleur est le système. Par exemple, grâce aux équations (IV.3) et (IV.4) [IV.2], le LCC peut être calculé avec ou sans la consommation comptable du système.

$$P_V = \sum_{k=1}^t \frac{C_t}{(1+t)^t} \quad (IV.3)$$

$$P_{VD} = (C+m)_{pv} + (C+m)_{wind} + (C+m)_{battery} + (C+m)_{diesel} - D \quad (IV.4)$$

Où : **PV** et **PVD** sont respectivement la valeur actuelle du système sans et avec dépréciation, **t** est le moment de l'analyse, **i=(k)** est le taux d'intérêt par an, **Ct** est le coût de l'année **t**, **m** est le coût de maintenance du système et **D** est la valeur actuelle de dépréciation

IV.2.3. Probabilité de perte source d'énergie (Loss of Power Supply Probability (LPSP))

Cette approche de dimensionnement repose sur l'utilisation de principes d'optimisation pour déterminer la quantité optimale de modules solaires, la capacité des éoliennes et autres générateurs renouvelables ainsi que les batteries tout en prenant en compte la fiabilité de source d'énergie

L'idée de fiabilité de source d'énergie repose sur la possibilité de ne pas répondre à la demande de charge par le système énergétique hybride.

La méthodologie LPSP peut être discutée en deux étapes :

Chapitre IV : Simulation et Optimisation de gestion énergétique d'un 1^{ère} SEH proposé basé sur une stratégie d'intelligence artificielle

A. L'énergie excédentaire produite par le SERH est utilisée pour charger la batterie et un nouvel état de charge (SOC) est calculé jusqu'à ce que la capacité de la batterie atteigne la saturation. Une fois la batterie complètement chargée, aucune énergie supplémentaire n'est utilisée dans les tâches productives.

B. En cas de pénurie d'énergie produite par le SERH, l'énergie stockée dans la batterie est utilisée pour répondre à la charge de demande. Le nouveau SOC est calculé jusqu'à ce que la capacité du parc de batteries atteigne un minimum, moment auquel le système est déconnecté de la charge.

Le LPSP du SOC des batteries peut être trouvé par l'équation (IV.5)

$$LPSP = \Pr\{E_B(t) \leq E_{B\min}; \text{for } i \leq T\} \quad (IV.5)$$

c'est-à-dire la probabilité que l'état de charge à tout instant t , pendant la période de temps T , soit inférieur ou égal au niveau minimal de l'énergie fournie dans la batterie $EB_{\min}$. $EB(t)$ est l'énergie stockée dans la batterie à tout instant (t)

IV.2.4. Probabilité de perte de charge (Loss of Load Probability (LOLP))

L'incapacité du SERH à répondre à la charge de pointe quotidienne est appelée perte de charge (LOL). La probabilité globale d'une pénurie ou d'une perte de puissance (LOLP) peut être exprimée en pourcentage de temps ou d'heures dans une journée ou de jours dans une année. LOLP est exprimé selon les équations (IV.6) à (IV.8) [IV.3].

$$LOPL = \frac{\sum_{t=1}^n \text{hours} (I_{\text{supply}} \prec I_{\text{needed}}(t))}{n} \quad (IV.6)$$

$$I_{\text{needed}}(t) = \frac{L(t) - P_w(t) - P_{PV}(t)}{V_L} \eta (I_{\text{battery}}(t)) \quad (IV.7)$$

$$I_{\text{needed}}(t) = \min \left(I_{\max} = \frac{0.2SOC}{\Delta t}, \frac{SOC(t)\sigma - SOC_{\min}}{\Delta t} \right) \quad (IV.8)$$

Où : Et $I_{\text{needed}}(t)$ est le courant requis pour la charge à l'heure t , $I_{\text{supply}}(t)$ est le courant fourni par SERH à l'heure t , n est le nombre d'échantillons. V_L est la tension nominale nécessaire au système, $L(t)$ est la charge électrique requise à l'heure t , $PW(t)$ est la puissance générée par l'éolienne à l'heure t et $PPV(t)$ est la puissance générée par PV modules à l'heure t .

Si LOLP est faible, cela entraîne un coût élevé du système et vice versa.

IV.3. Procédure de dimensionnement d'un système hybride proposée

Le dimensionnement est nécessaire pour configurer un système d'énergie hybride afin que notre 1^{ère} système hybride proposé puisse être mis à dimensionnement comme suit

- Générateur d'énergie éolienne d'une puissance nominale de 6kW
- Générateur PV d'une puissance nominale de 6kW
- Pile à combustible d'une puissance 200 watts

Système de stockage hybride composé d'une batterie et d'un supercondensateur

- Valeur de capacité de la batterie 100Ah
- Valeur de capacité du supercondensateur 99.5

Le générateur éolien et le générateur photovoltaïque sont considérés comme des sources principales, et le système de stockage hybride est une solution de secours, car il fonctionne pour stocker en cas de production excessive d'énergie et pour se décharger en cas de pénurie d'énergie produite.

IV.3.1. Profil de la charge

Le profil de consommation énergétique du réseau électrique adopté dans cette étude est représenté dans la Figure.IV.1

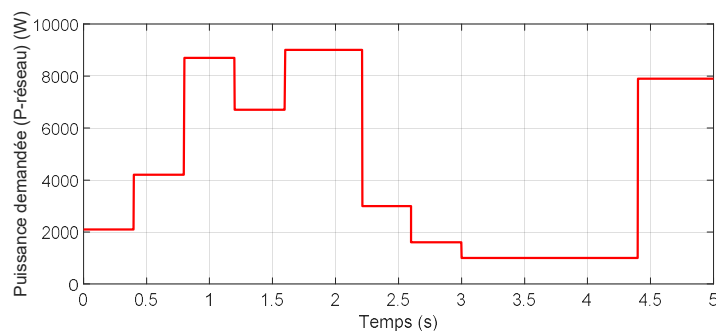


Fig.IV.1 Profil de la puissance demandée.

IV.3.2. Profil de rayonnement, de température et de vitesse du vent

Le profil de l'irradiation solaire, de la température et de la vitesse du vent adopté dans cette étude est représenté dans les figures.IV.2, IV.3 et IV.4.

Chapitre IV : Simulation et Optimisation de gestion énergétique d'un 1^{ère} SEH proposé basé sur une stratégie d'intelligence artificielle

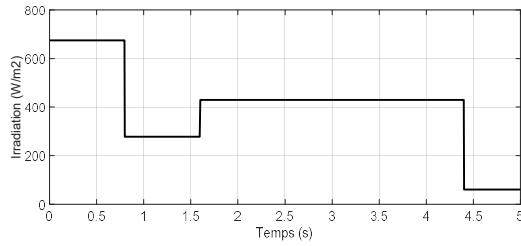


Fig.IV.2 Profil de l'irradiation solaire

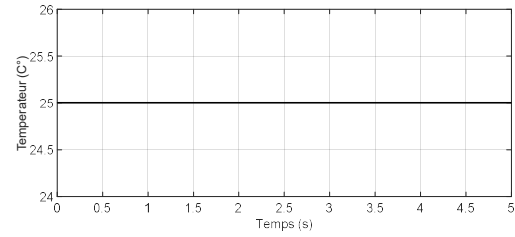


Fig.IV.3 Profil de la température ambiante.

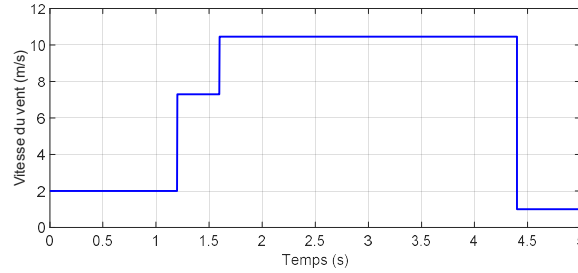
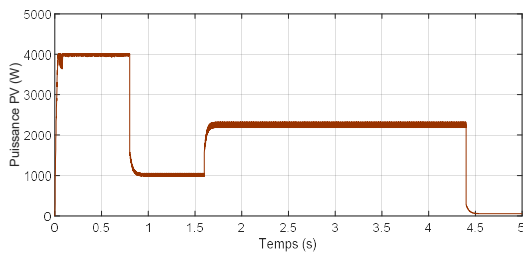


Fig.IV.4 Profil de la vitesse du vent

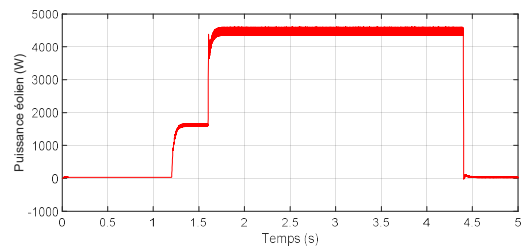
IV.3.3. Energie produite par le système hybride

L'énergie produite par le système hybride peut s'expliquer comme suit :

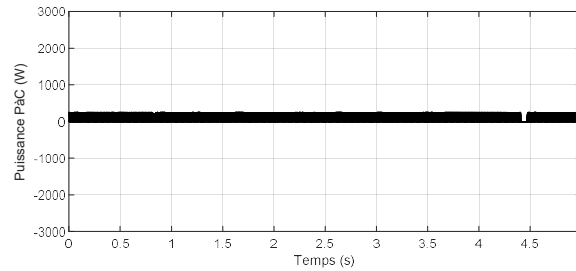
- L'énergie générée par le système photovoltaïque est obtenue en fonction du profil d'irradiation et de la température approuvé selon la Figure.IV.5.a.
- L'énergie générée par le système éolien est obtenue sur la base du profil de vitesse du vent approuvé selon la Figure.IV.5.b
- La puissance générée par le système de la pile à combustible est obtenue selon la figure IV.5.c



a. Puissance d'un système photovoltaïque.



b. Puissance d'un système éolien.



c. Puissance d'un système pile à combustible.

Fig.IV.5 Puissance produite par les sources d'un système d'énergie hybride.

IV.6. Développement des stratégies de commande optimale de gestion d'énergie électrique adaptée au système hybride

Pour réaliser un système énergétique hybride flexible, une stratégie de gestion de l'énergie est nécessaire afin d'assurer une production continue d'énergie électrique à travers la distribution efficace de l'énergie entre les éléments du système hybride, malgré les conditions variables telles que les changements climatiques et les fluctuations de la demande énergétique. Pour atteindre cet objectif, les chercheurs ont recouru à plusieurs stratégies de contrôle, comprenant les techniques de contrôle avancées et les techniques de contrôle intelligent. Certaines de ces stratégies peuvent être mentionnées comme suit :

IV.6.1. Stratégie de gestion basée sur le contrôle prédictif (MPC) [IV.4]

Pour la gestion de la puissance d'un système hybride composé d'une pile à combustible, d'une batterie et d'un supercondensateur, le modèle de contrôle prédictif (Model Predictive Control - MPC) a été appliqué pour réguler le bus DC en suivant la valeur de référence et en déterminant les courants de référence pour les composants de ce système. Le suivi de ces références s'effectue grâce à l'utilisation d'un contrôle d'hystérésis. La représentation graphique de cette gestion d'énergie est illustrée dans la figure.IV.6.

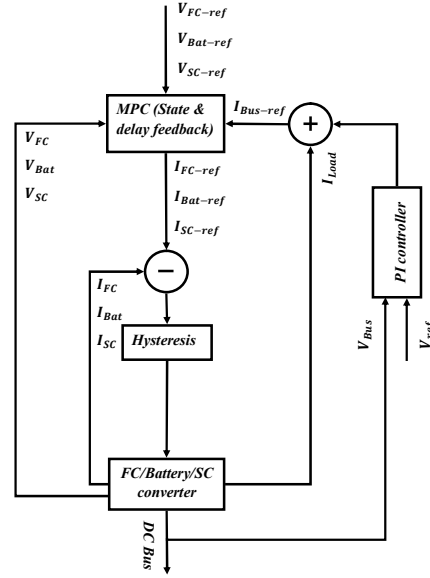


Fig.IV.6. Schéma fonctionnel d'une stratégie de gestion basée sur le contrôle prédictif (MPC).

IV.6.2. Stratégie de gestion basée sur le contrôle en mode glissant (SMC) [IV.5]

Le contrôle en mode glissant (SMC) peut être appliqué à la gestion de l'énergie afin de réaliser la distribution d'énergie dans un micro-réseau composé d'un système photovoltaïque et d'un HESS (batterie avec supercondensateur) connecté à la charge. Cette stratégie de contrôle a été mise en œuvre conformément à la figure.IV.7 et s'est révélée efficace pour faire face à la nature non linéaire des convertisseurs de puissance.

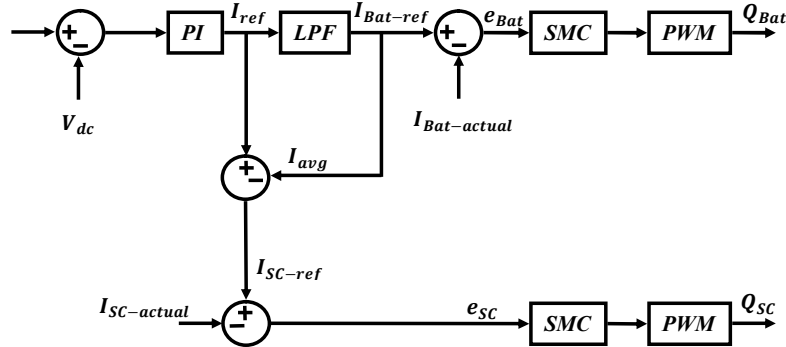


Fig.IV.7. Schéma fonctionnel d'une stratégie de gestion basée sur le contrôle en mode glissant (SMC).

IV.6.3. Stratégie de gestion basée sur le contrôle logique flou (FLC) [IV.6]

Pour contrôler le flux d'énergie et éliminer la variation de la production d'énergie grâce à un système hybride composé du système d'énergie solaire et du système d'énergie éolienne comme sources primaires et de la pile à combustible comme principale source de secours afin de fournir de l'énergie à la charge dans les situations critiques et de la batterie pour stocker le

Chapitre IV : Simulation et Optimisation de gestion énergétique d'un 1^{ère} SEH proposé basé sur une stratégie d'intelligence artificielle

surplus d'énergie probable, a été proposée un système intelligent pour gérer l'énergie de ce système basée sur la logique floue selon la figure.IV.8.

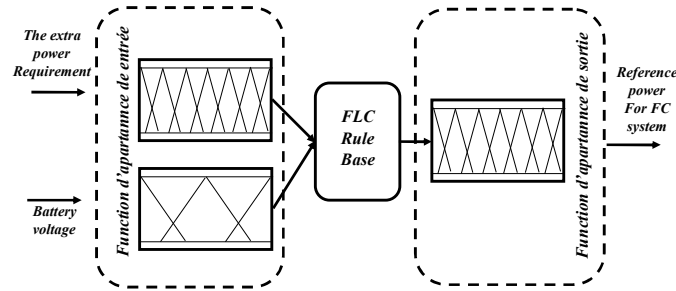


Fig.IV.8. Schéma fonctionnel d'une stratégie de gestion basée sur le contrôle logique floue.

IV.6.4. Stratégie de gestion basée sur le réseau neuronal artificiel (ANN) [IV.7]

Le contrôle par réseau de neurones peut être appliqué à la gestion de l'énergie dans le système hybride. Cette approche, illustrée dans la Figure.IV.9, a été utilisée pour la gestion de l'énergie d'un système hybride composé d'un système photovoltaïque et d'un système d'énergie éolienne, ainsi que d'un système de stockage (batterie). Ce système alimente l'unité de dessalement de l'eau par osmose inverse.

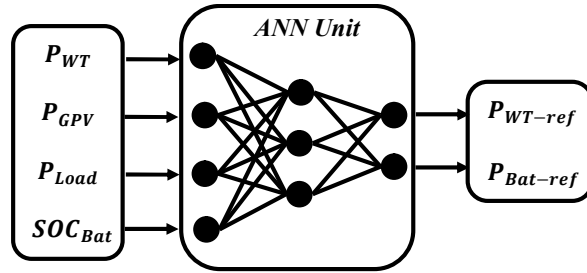


Fig.IV.9. Schéma fonctionnel d'une stratégie de gestion basée sur le réseau neuronal artificiel.

IV.6.5. Stratégie de gestion basée sur le système d'inférence neuro-flou adaptatif intelligent (ANFIS) [IV.8]

Pour gérer l'énergie d'un système hybride composé d'une pile à combustible et d'une batterie alimentant un navire électrique, une gestion basée sur le système d'inférence neuro-flou adaptatif intelligent (ANFIS) a été appliquée. Cette approche permet de contrôler le flux d'énergie en fonction de l'état de charge de la batterie et des changements dans la demande d'énergie du côté de la charge, comme indiqué dans la figure.IV.10.

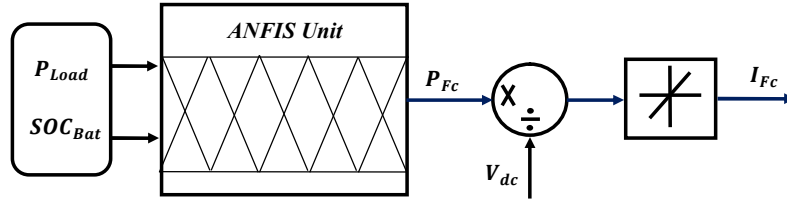


Fig.IV.10. Schéma fonctionnel d'une stratégie de gestion basée sur le système d'inférence neuro-flou adaptatif intelligent (ANFIS).

Dans ce chapitre de la thèse, pour la gestion de l'énergie du 1^{er} system d'énergie hybride étudié, deux stratégies ont été proposées et comparées : la première est une stratégie classique (expliqué dans le troisième chapitre) et la seconde est une stratégie intelligente basée sur le contrôle logique floue [IV.9].

IV.7. Élaboration d'une stratégie d'optimisation basée sur le contrôle logique flou pour la gestion de l'énergie électrique du 1^{er} système hybride proposé

Un système énergétique hybride peut devenir instable en l'absence d'une bonne gestion de l'énergie qui basée sur une conception de contrôle efficace qui distribue l'énergie entre les éléments de cette dernière de manière appropriée dans différentes conditions dynamiques (changement de la demande énergétique et changement climatique).

Dans ce travail, pour parvenir à une gestion optimale du système étudié, une stratégie de gestion d'énergie intelligente (SGEI) basée sur (CLF-FOPI) est proposée selon la figure.IV.11. L'unité CLF fonctionne pour la gestion d'énergie, tandis que l'unité de contrôle FOPI fonctionne pour réaliser suivre les courants de référence requis des éléments SSEH. Le contrôleur FOPI offre de meilleures performances dans le système non linéaire par rapport au contrôleur PI, et de plus, il réduit l'erreur de crête et l'erreur [IV.10]. De plus, pour assurer la stabilité du bus DC dans le système hybride, le bus de tension DC a été contrôlé en contrôlant la pile à combustible par un contrôleur PI.

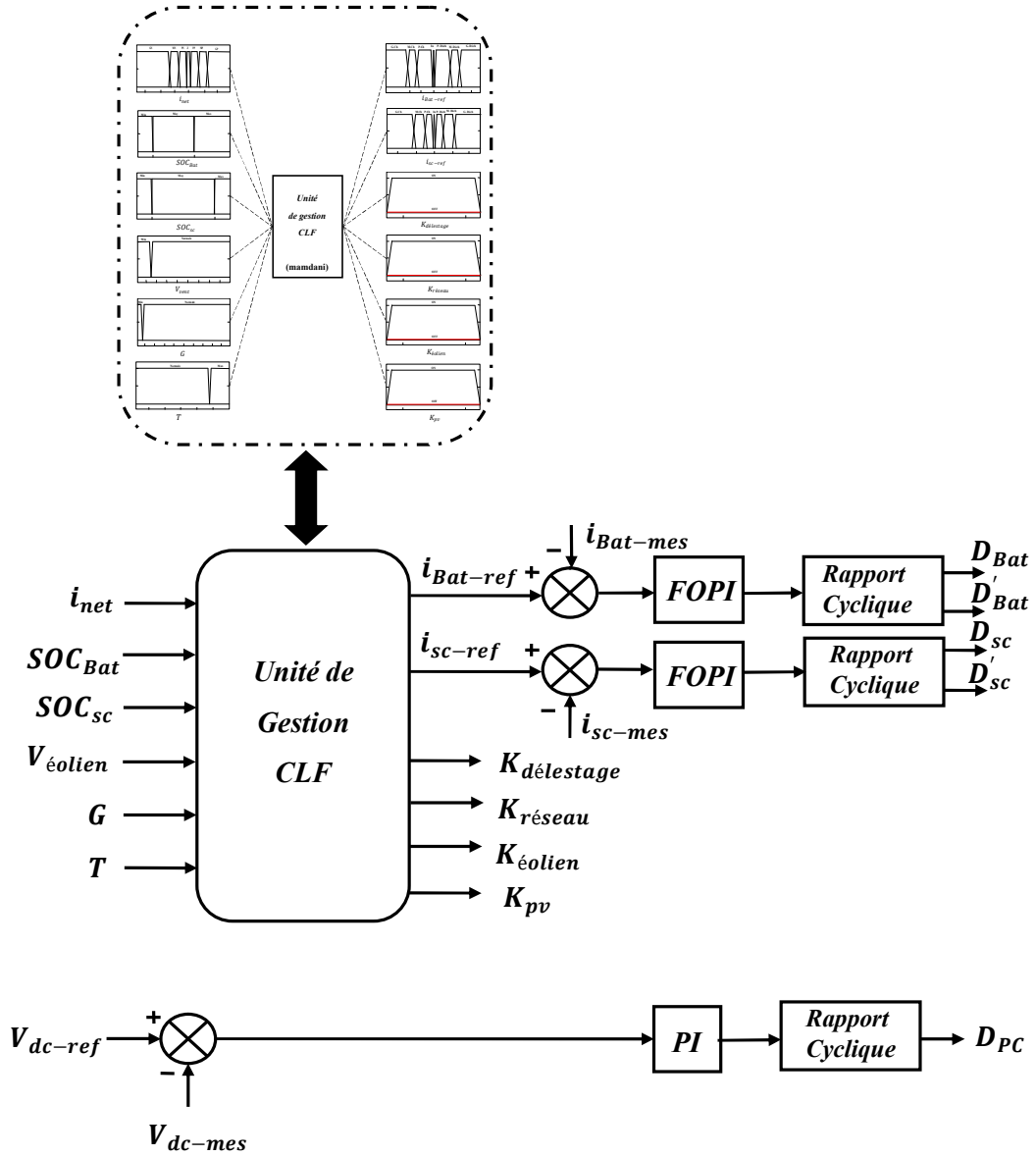


Fig.IV.11. Structure d'une stratégie de gestion de l'énergie basée sur un CLF-FOPI.

IV.7.1. Identification des variables d'entrée et de sortie avec des fonctions d'appartenance pour l'unité de gestion CLF proposée

Le contrôleur à logique floue (CLF) est important dans la stratégie de gestion optimale du système étudié, une stratégie de gestion d'énergie intelligente (SIEG) proposée, car il se compose de 6 entrées et 6 sorties en plus de 315 règles selon la figure.VI.12, , qui détermine les courants de référence des éléments SSEH et d'activer la délestage et le fonctionnement du système PV et du système éolien, et de connecter/déconnecter le réseau en fonction de l'état (ON/OFF) du commutateurs $K_délestage$, K_pv , $K_éolien$ et $K_réseau$ respectivement, tout cela est basé sur le courant net- i_net (demande d'énergie), SOC de la batterie, SOC du supercondensateur, la vitesse du vent, rayonnement solaire et la température.

**Chapitre IV : Simulation et Optimisation de gestion énergétique d'un 1^{ère} SEH proposé
basé sur une stratégie d'intelligence artificielle**

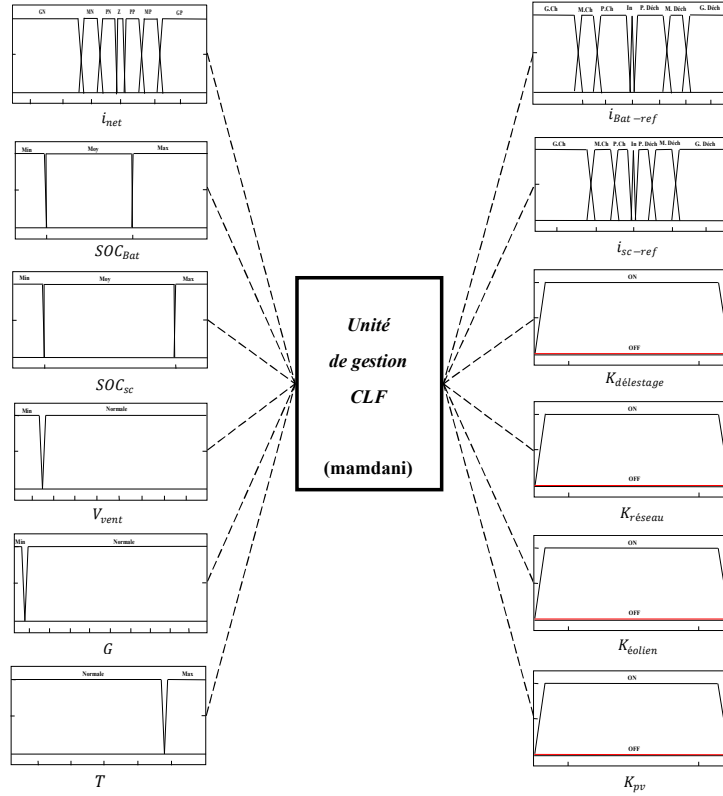


Fig.IV.12. Structure d'une unité de gestion de contrôle de la logique floue.

Il a été proposé les fonctions d'appartenance avec les entrées et les sorties pour l'unité de contrôle CLF sont les suivantes :

Entrée 1 : Le courant net i_{net} est la première entrée de l'unité CLF, qui est liée à la décision d'exploiter les éléments SSEH car elle change en fonction des changements dans les sources d'énergie renouvelables et la demande de puissance comme suit :

$$P_{net} = P_{pv} + P_{éolien} + P_{PaC} - P_{demandée} \quad (IV.9)$$

$$i_{net} = \frac{P_{net}}{V_{SSEH}} \quad (IV.10)$$

$$V_{SSEH} = V_{Batterie} = V_{SC} \quad (IV.11)$$

Où : P_{net} est la puissance nette ; i_{net} est le courant nette ; $V_{Batterie}$ est la tension de la batterie ; V_{SC} : est la tension du SC. Sept fonctions d'appartenance ont été attribuées à cette entrée comme suit : **GN, MN, PN, Z, PP, MP** et **GP**, comme illustré à la Figure.IV.13

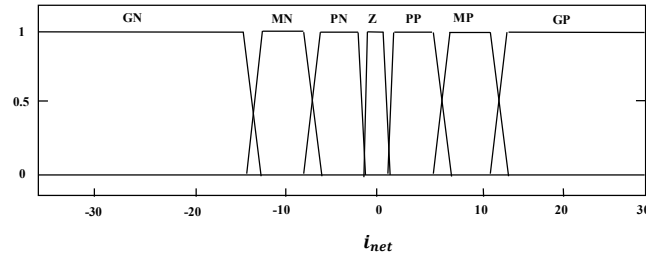


Fig.IV.13 Fonctions d'appartenance d'un courant i_{net} .

Entrée 2 : Le SOC_{Bat} de la batterie est la deuxième entrée de l'unité CLF, de sorte que la batterie sert de source auxiliaire pour les sources d'énergie renouvelables, et son SOC est lié à la détermination de son courant de référence. Trois fonctions d'appartenance ont été attribuées à cette entrée comme suit : **Max**, **Moy** et **Min**, comme le montre la Figure.IV.14.

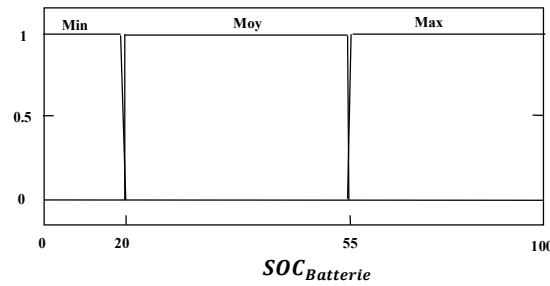


Fig.IV.14. Fonctions d'appartenance d'une SOC de la batterie.

Entrée 3 : le SOC_{sc} du SC est la troisième entrée de l'unité CLF, de sorte que le SC fonctionne comme une source auxiliaire pour la batterie en cas de charge et de décharge en l'intégrant à la batterie, formant un SSEH, de sorte que son SOC est lié à la détermination de son courant de référence. Trois fonctions d'appartenance ont été attribuées à cette entrée comme suit : **Max**, **Moy** et **Min**, comme illustré à la Figure.IV.15.

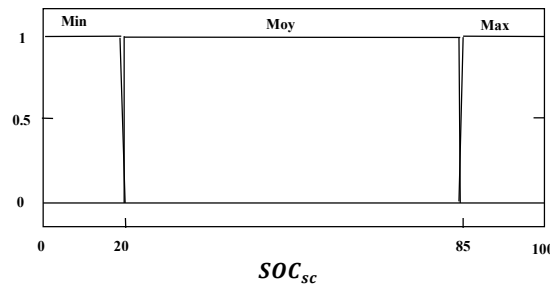


Fig.IV.15. Fonctions d'appartenance d'une SOC de la SC.

Entrée 4 : La vitesse du vent V_{vent} est la quatrième entrée de l'unité CLF. Deux fonctions d'appartenance pour cette entrée sont définies comme suit : **Normale** et **Min**, comme illustré à la Figure.IV.16.

Chapitre IV : Simulation et Optimisation de gestion énergétique d'un 1^{ère} SEH proposé basé sur une stratégie d'intelligence artificielle

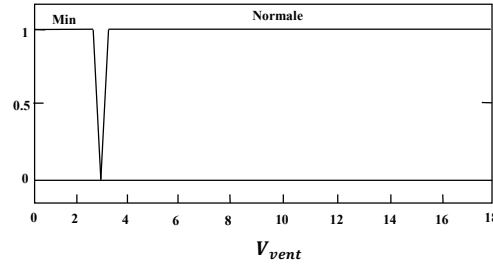


Fig.IV.16 Fonctions d'appartenance à la vitesse du vent.

Entrée 5 : l'irradiation solaire G est la cinquième entrée de l'unité CLF. Deux fonctions d'appartenance pour cette entrée sont définies comme suit : **Normale** et **Min**, comme illustré à la Figure.IV.17.

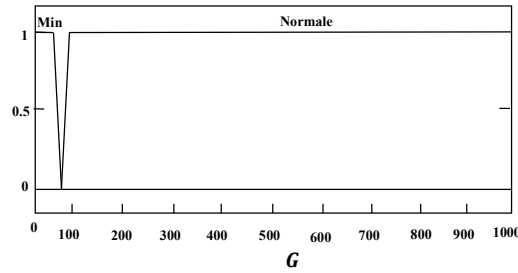


Fig.IV.17 Fonctions d'appartenance à l'irradiation solaire G .

Entrée 6 : La température T est la sixième entrée de l'unité CLF. Deux fonctions d'appartenance pour cette entrée sont définies comme suit : **Max** et **Normale**, comme illustré à la Figure.IV.18

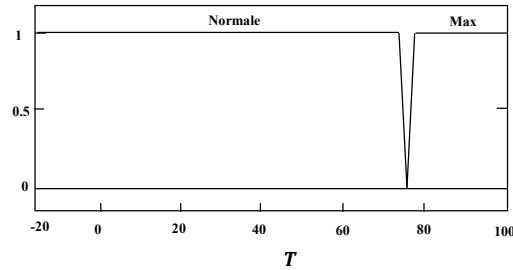


Fig.IV.18 Fonctions d'appartenance d'une température T .

Sortie 1 : Le courant de référence de la batterie **ibat_ref** est la première sortie de l'unité CLF, il est déterminé par le SOC de la batterie, le SOC du SC et la demande d'énergie pour décharger la batterie en cas de compensation de le manque d'énergie et la recharge en cas d'excès d'énergie. Sept fonctions d'appartenance ont été attribuées à cette sortie comme suit : **G.Ch**, **M.Ch**, **P.Ch**, **In**, **P.Déch**, **M.Déch** et **G.Déch**, comme illustré à la Figure.IV.19.

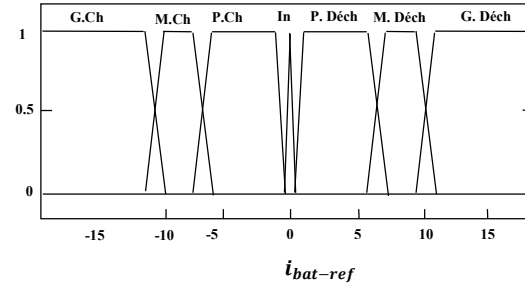


Fig.IV.19. Fonctions d'appartenance d'un courant de référence de la batterie $i_{bat-ref}$.

Sortie 2 : Le courant de référence du SC i_{sc-ref} est la deuxième sortie de l'unité CLF, il est déterminé par le SOC du SC, le SOC de la batterie et la demande d'énergie afin de décharger le SC pour aider la batterie à fonctionner en cas de compensation du manque d'énergie et de recharge en cas d'excès d'énergie. Sept fonctions d'appartenance ont été attribuées à cette sortie comme suit : *G.Ch*, *M.Ch*, *P.Ch*, *In*, *P. Déch*, *M. Déch* et *G. Déch*, comme illustré à la Figure.IV.20.

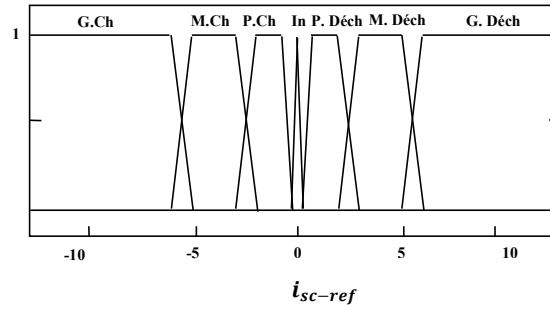


Fig.IV.20. Fonctions d'appartenance d'un courant de référence de la SC i_{sc-ref} .

Sortie 3 : L'interrupteur K_d du délestage est la troisième sortie de l'unité CLF, de sorte qu'il active ou désactive le délestage via l'état (On/Off) du K_d afin de protéger SSEH contre la surcharge. Deux fonctions d'appartenance ont été attribuées à cette sortie comme suit : *ON* et *OFF*, comme illustré à la Figure.IV.21.

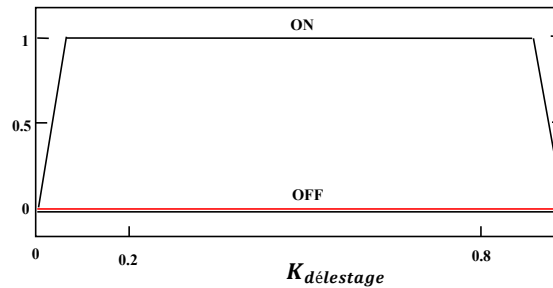


Fig.IV.21. Fonctions d'appartenance de l'interrupteur du délestage (K_d).

Sortie 4 : L'interrupteur $K_{réseau}$ du réseau est la quatrième sortie de l'unité CLF, de sorte qu'il connecte ou déconnecte le réseau du système hybride via l'état (On/Off) du $K_{réseau}$, en fonction de la disponibilité ou non-disponibilité d'énergie. Deux fonctions d'appartenance ont été attribuées à cette sortie comme suit : **ON** et **OFF**, comme indiqué sur la Figure.IV.22.

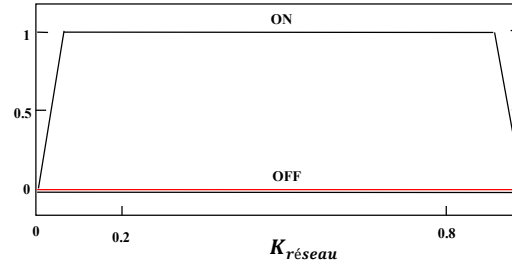


Fig.IV.22. Fonctions d'appartenance de l'interrupteur du réseau électrique ($K_{rés}$).

Sortie 5 : L'interrupteur $K_{éolien}$ est la cinquième sortie de l'unité CLF. Qui active ou désactive le système éolien via l'état on/off de $K_{éolien}$ en fonction de la vitesse du vent. Deux fonctions d'appartenance ont été attribuées à cette sortie comme suit : **ON** et **OFF**, comme illustré à la Figure.IV.23

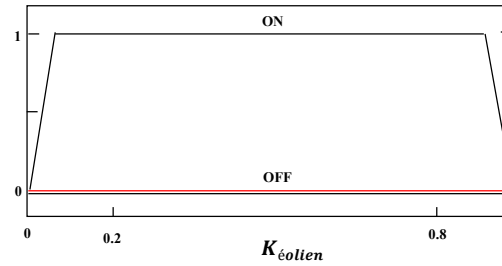


Fig.IV.23. Fonctions d'appartenance de l'interrupteur du éolien ($K_{éolien}$).

Sortie 6 : L'interrupteur K_{pv} est la sixième sortie de l'unité CLF. Qui active ou désactive le système PV via l'état On/Off de K_{pv} en fonction de l'irradiation solaire et de la température. Deux fonctions d'appartenance ont été attribuées à cette sortie comme suit : **ON** et **OFF**, comme illustré à la Figure.IV.24

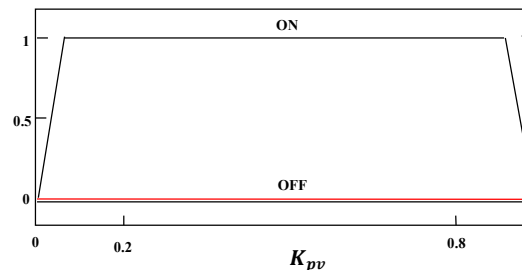


Fig.VI.24. Fonctions d'appartenance de l'interrupteur du PV (K_{pv}).

IV.7.2. Définition des règles floues pour la prise de décision

L'objectif des règles conçues pour l'unité CLF est d'obtenir une gestion optimale de l'énergie pour HRES proposé dans des conditions de fonctionnement variables, et ceci est réalisé grâce à un échantillon de règles conçues selon tableau suivant :

Tableau IV.1 Ensemble typique de règles de contrôleur à logique floue conçues pour SERH

Entrée							Sortie					
N.Règles	i-net	SOC-bat	SOC-sc	V-vent	G	T	ibat-ref	isc-ref	k_d	k_rés	k_éol	k_pv
R.1	GP	Moy	Moy	Normale	Normale	Noramle	P.Ch	G.Ch	OFF	ON	ON	ON
R.2	GP	Moy	Max	Normale	Normale	Noramle	G.Ch	In	OFF	ON	ON	ON
R.3	GP	Max	Max	Normale	Normale	Noramle	In	In	ON	ON	ON	ON
R.4	MP	Moy	Moy	Normale	Normale	Noramle	M.Ch	P.Ch	OFF	ON	ON	ON
R.5	PP	Moy	Moy	Min	Normale	Noramle	P.Ch	P.Ch	OFF	ON	OFF	ON
R.6	Z	Moy	Moy	Min	Normale	Noramle	In	In	OFF	ON	OFF	ON
R.7	PN	Moy	Moy	Normale	Normale	Noramle	P.Déch	P.Déch	OFF	ON	ON	ON
R.8	MN	Moy	Moy	Normale	Normale	Noramle	M.Déch	P.Déch	OFF	ON	ON	ON
R.9	GN	Moy	Moy	Min	Normale	Noramle	G.Déch	M.Déch	OFF	ON	OFF	ON
R.10	GN	Moy	Moy	Min	Min	Noramle	G.Déch	M.Déch	OFF	ON	OFF	OFF

Définition des règles

- **i_net**

Grand Positive=GP, Moyen positive=MP, Petit positive=PP, Zéro=Z, Petit Négatif=PN, Moyen Négatif=MN, Grand Négatif=GN

- **SOC_bat et SOC_sc**

Minimale=Min, Moyen=Moy, Maximale=Max

- **V_vent , G et T**

Normale=N, Minimale=Min

- **i_bat-ref et i_sc-ref**

Petite Charger=P.Ch, Moyen Charger=M.Ch, Grand Charger=G.Ch, Inactive= In, Petite Décharge=P. Déch, Moyen Décharge=M. Déch, Grand Décharge=G. Déch

IV.7.3. Unité de contrôle FOPID

Bien que le contrôleur PID soit simple et contrôlable, il n'est pas très flexible lorsqu'il s'agit de gérer l'incertitude du système, et pour améliorer sa robustesse tout en conservant la simplicité d'origine, le contrôleur PID d'ordre fractionnaire (FOPID) a été créé [IV.10].

Les deux paramètres réglables supplémentaires (λ , μ) dont dispose le contrôleur FOPID sont ce qui améliore ses performances et constituent le principal avantage de ce contrôleur par rapport au contrôleur PID conventionnel [IV.11]. Ce dernier a été utilisé dans de nombreuses applications [IV.11-IV.13].

Grâce à l'équation IV.12 et à la figure 25, l'unité de contrôle FOPID peut être exprimée comme suit [IV.12, IV.14] :

$$U_{FOPID} = K_p + \frac{K_i}{S^\lambda} + K_d S^\mu \quad (IV.12)$$

Où :

K_p : Gain proportionnel; K_i : Gain intégral ; K_d : Gain dérivé ; λ et μ : Ordres d'intégrale et de dérivée, respectivement.

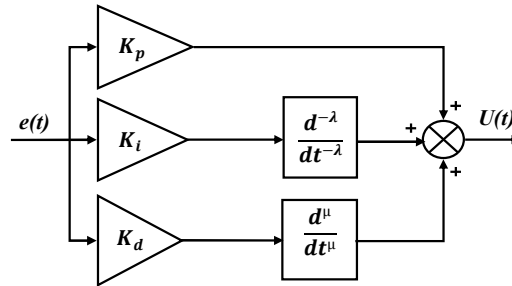


Fig.IV.25 Diagramme schématique du contrôle de l'unité FOPID.

Dans ce travail, le contrôleur FOPI est exprimé selon l'équation IV.13 en ajustant $K_d=0$ et $\mu=0$, pour réaliser le suivi des courants de référence des processus de charge et de décharge du SSEH (batterie et supercondensateur).

$$U_{FOPI} = K_p + \frac{K_i}{S^\lambda} \quad (IV.13)$$

IV.8. Conception d'un algorithme de gestion de l'énergie pour le système hybride basé sur le contrôle logique flou (CLF)

Un algorithme de gestion intelligente de l'énergie basé sur un contrôle logique flou est conçu selon la Figure.IV.26 pour obtenir une gestion optimale du système énergétique hybride proposé.

Son principe de fonctionnement peut être brièvement expliqué comme suit :

- Si la demande de puissance est nulle ($i_{net} = 0$), cela indique que les sources d'énergie renouvelables produisent une puissance égale à la demande de puissance du réseau, donc la batterie et le supercondensateur sont au repos.
- Si la demande de puissance est positive ($i_{net} > 0$), cela indique que l'énergie renouvelable produit un excès de puissance, qui est utilisée pour charger la batterie et le supercondensateur en même temps ou seulement l'un d'eux basé sur leurs $SOC_{bat,sc}$ et du demande de puissance. Comme si la batterie et le supercondensateur étaient pleins ($SOC_{max} < SOC_{bat,sc}$), l'excès de puissance sera dissipé en activant le délestage afin de protéger le SSEH des surcharges.
- Si la demande énergétique est négative ($i_{net} < 0$), cela indique que les sources d'énergie renouvelables produisent une énergie insuffisante pour répondre à la demande énergétique du réseau, donc la batterie et le supercondensateur fournissent l'énergie nécessaire par le processus de décharge en même temps ou un seul d'entre eux d'eux basé sur leurs $SOC_{bat,sc}$ et du demande de puissance. Comme si la batterie et le supercondensateur étaient vides ($SOC_{bat,sc} < SOC_{min}$), le réseau sera déconnecté du système hybride.
- Si la vitesse du vent est faible, le système d'énergie éolienne à l'arrêt du fonctionner.
- Si l'irradiation ou la température dépassent les conditions autorisées, le système photovoltaïque à l'arrêt du fonctionner.

**Chapitre IV : Simulation et Optimisation de gestion énergétique d'un 1^{ère} SEH proposé
basé sur une stratégie d'intelligence artificielle**

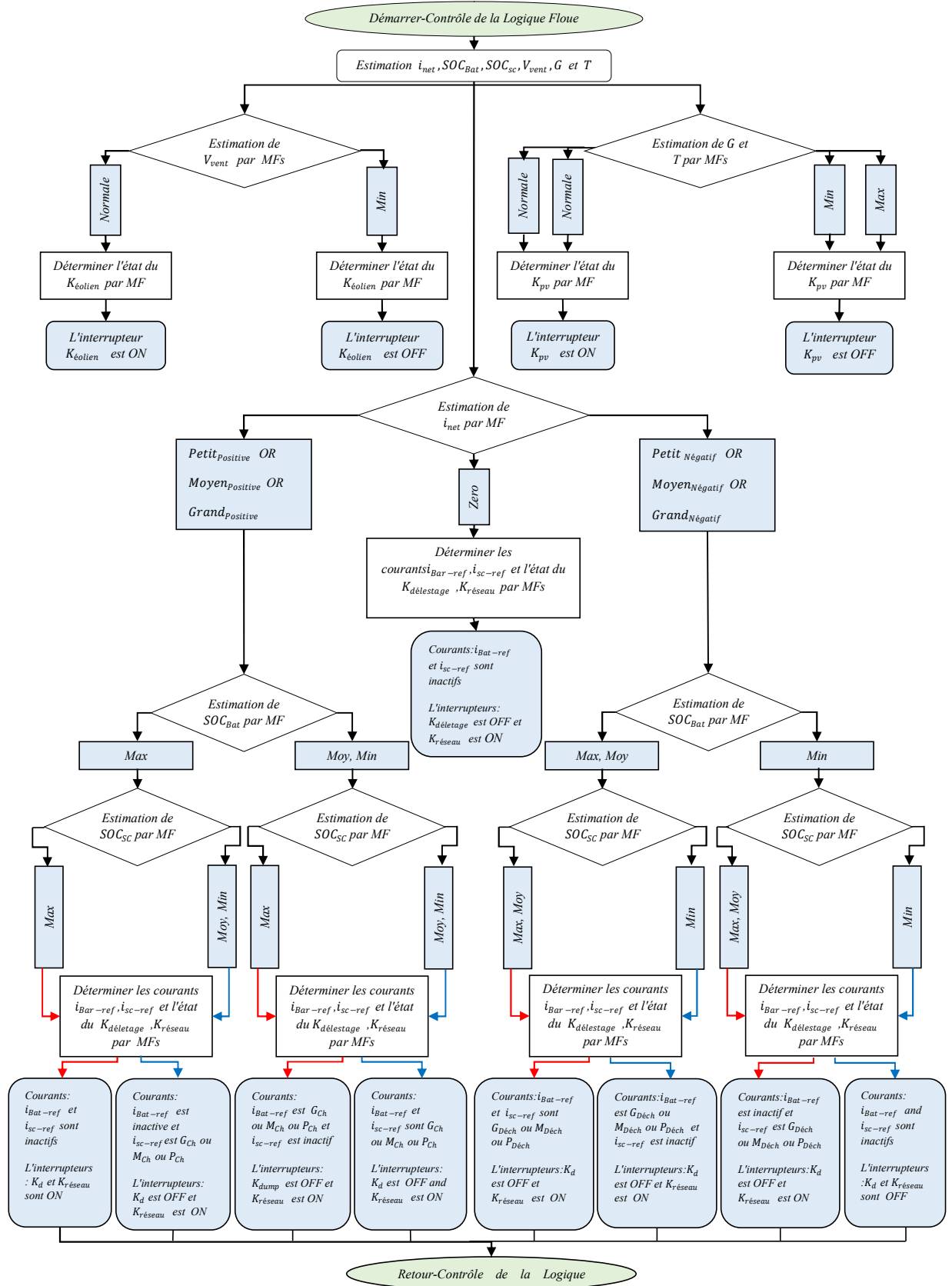


Fig.IV.26 Organigramme proposé du système de gestion intelligente de l'énergie.

IV.8.1. Adaptation de l'algorithme proposé pour tenir compte des variations des conditions météorologiques et des besoins du réseau électrique selon les différents modes de fonctionnement

L'algorithme proposé est testé à travers dix modes de fonctionnement différents, qui surviennent en raison des variations des conditions climatiques et de la demande d'énergie (réseau électrique) à laquelle le système proposé est soumis. Ces modes sont expliqués en détail dans les figures IV.27 à IV.36, et le tableau IV.2 présente leur synthèse.

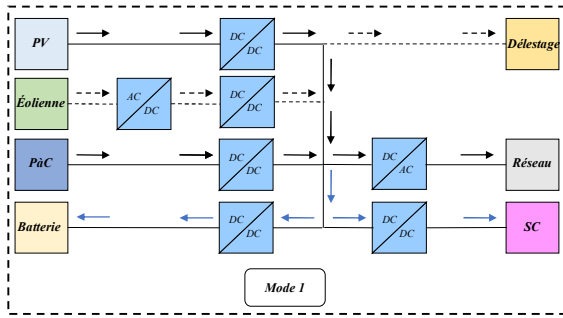


Fig.IV.27 Mode de fonctionnement 1 du SEH proposé.

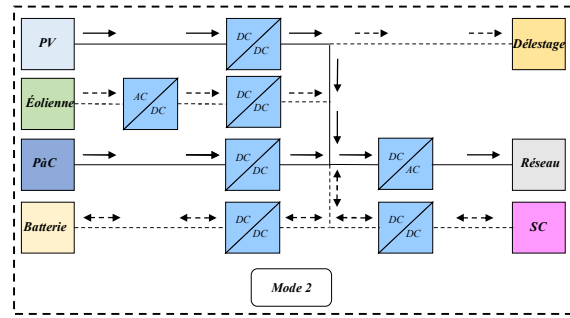


Fig.IV.28 mode de fonctionnement 2 du SEH proposé.

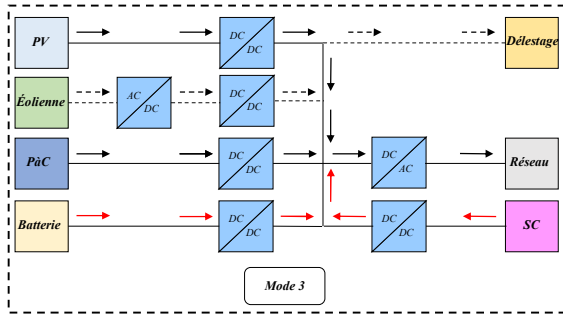


Fig.IV.29 mode de fonctionnement 3 du SEH proposé.

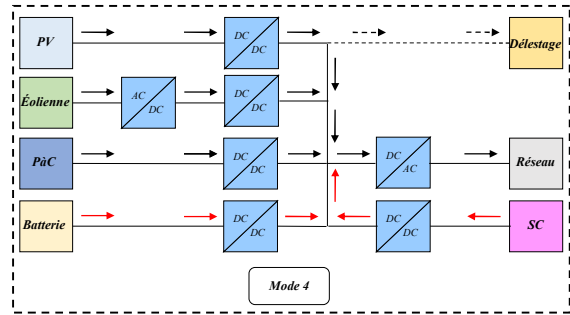


Fig.IV.30 mode de fonctionnement 4 du SEH proposé.

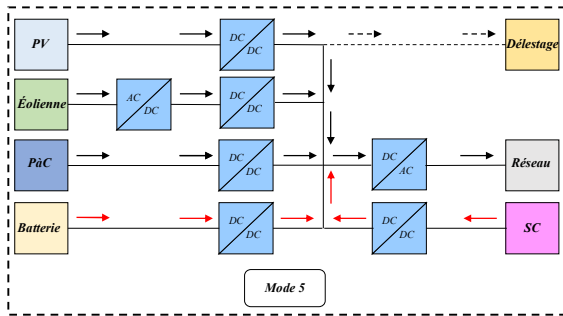


Fig.IV.31 mode de fonctionnement 5 du SEH proposé.

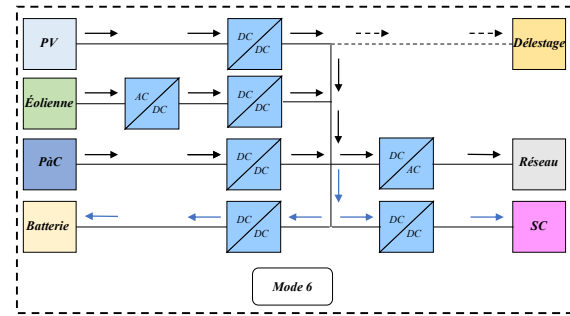


Fig.IV.32 mode de fonctionnement 6 du SEH proposé.

**Chapitre IV : Simulation et Optimisation de gestion énergétique d'un 1^{ère} SEH proposé
basé sur une stratégie d'intelligence artificielle**

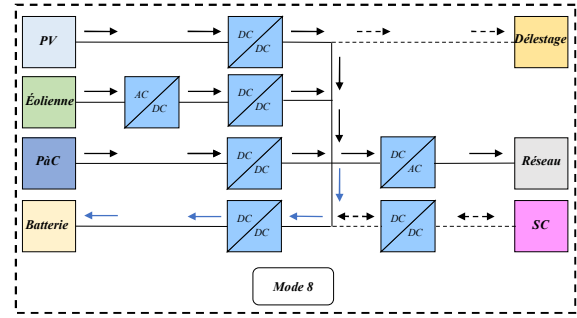
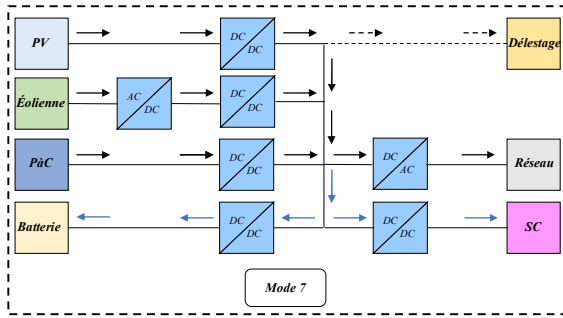


Fig.IV.33 mode de fonctionnement 7 du SEH proposé. **Fig.IV.34** mode de fonctionnement 8 du SEH proposé.

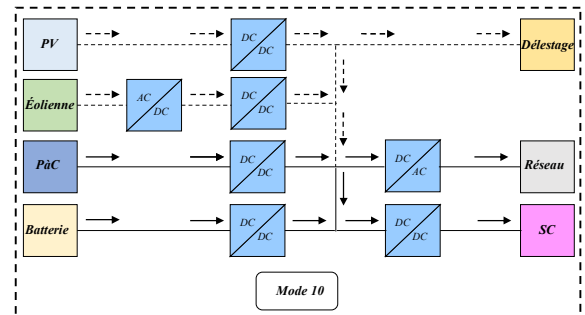
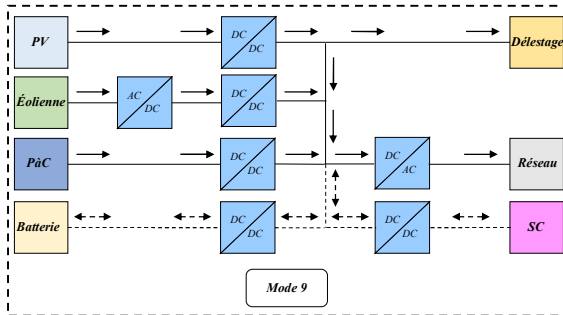


Fig.IV.35 mode de fonctionnement 9 du SEH proposé. **Fig.IV.36** mode de fonctionnement 10 du SEH proposé.

Quant à la tension du bus DC, elle est contrôlée pour suivre la valeur de référence (V_{dc-ref}) en contrôlant la PaC.

Tableau IV.2 Règles pour plusieurs modes de fonctionnement du SEH proposé

Entrée							Sortie					
Rul.N	i_net	SOC_bat	SOC_sc	V_vent	G	T	Ibat_ref	isc_ref	k_d	k_rés	k_éol	k_pv
M.1	PP	Moy	Moy	Min	Normale	Noramle	P.Ch	P.Ch	OFF	ON	OFF	ON
M.2	Z	Moy	Moy	Min	Normale	Noramle	In	In	OFF	ON	OFF	ON
M.3	GN	Moy	Moy	Min	Normale	Noramle	G. Déch	M. Déch	OFF	ON	OFF	ON
M.4	MN	Moy	Moy	Normale	Normale	Noramle	M. Déch	P. Déch	OFF	ON	ON	ON
M.5	PN	Moy	Moy	Normale	Normale	Noramle	P. Déch	P. Déch	OFF	ON	ON	ON
M.6	MP	Moy	Moy	Normale	Normale	Noramle	M.Ch	P.Ch	OFF	ON	ON	ON
M.7	GP	Moy	Moy	Normale	Normale	Noramle	P.Ch	G.Ch	OFF	ON	ON	ON
M.8	GP	Moy	Max	Normale	Normale	Noramle	G.Ch	In	OFF	ON	ON	ON
M.9	GP	Max	Max	Normale	Normale	Noramle	In	In	ON	ON	ON	ON
M.10	GN	Moy	Moy	Min	Min	Noramle	G. Déch	M. Déch	OFF	ON	OFF	OFF

IV.9. Implémentation des algorithmes d'optimisation dans un environnement de simulation « MATLAB SIMULINK »

Pour évaluer les performances des contrôleurs proposés fonctionnant sur extraire le maximum d'énergie des sources d'énergie renouvelables (éoliennes et photovoltaïques) et atteindre un équilibre et une répartition de l'énergie entre les sources d'énergie et les besoins énergétiques du réseau, en plus de contrôler le transformateur côté réseau. Le comportement dynamique du système hybride connecté au réseau proposé (PV/Éolienne/FC/Batterie/SC) a été étudié en effectuant une simulation du système à l'aide de la plateforme MATLAB Simulink dans des conditions dynamiques variables (Variation de la demande de puissance ($P_{demandée}$) Figure.IV.1, changement du rayonnement solaire (G) Figure.IV.2 à température constante (T) Figure.IV.3, Variation de la vitesse du vent (V_{vent}) Figure.IV.4).

IV.9.1. Identification des améliorations potentielles du système basées sur les résultats de la simulation

Pour obtenir un système énergétique hybride efficace, il est conseillé d'utiliser un système de stockage d'énergie hybride (SSEH), tel qu'un supercondensateur et une batterie, au sein d'un système d'énergie renouvelable hybride (SERH). Par conséquent, une stratégie de gestion de l'énergie doit être développée pour maintenir un équilibre énergétique entre la production d'électricité, le SSEH et la demande d'énergie (par exemple, le réseau). Cette stratégie doit tenir compte de divers facteurs, notamment les fluctuations climatiques, les changements dans la demande énergétique et l'état de charge du SSEH (batterie et supercondensateur). Ces facteurs peuvent définir plusieurs modes de fonctionnement pour le système énergétique hybride (SEH) en assurant un équilibre énergétique entre les ressources générées, le SSEH et la demande énergétique.

La principale contribution de cette étude est d'atteindre l'équilibre énergétique dans le système proposé en contrôlant le flux d'énergie entre les sources de production et les éléments SSEH et l'énergie nécessaire au réseau en appliquant deux stratégies de gestion de l'énergie : la première est la stratégie classique et la seconde est une nouvelle stratégie intelligente basée sur CLF. Dans cette partie, nous analysons les résultats de la gestion proposée (CFL-FOPI) présentée dans la Figure 37. Dans la partie suivante, comparerons ces deux stratégies pour mettre en évidence les lacunes de l'approche classique et démontrer les améliorations offertes par la stratégie proposée.

Chapitre IV : Simulation et Optimisation de gestion énergétique d'un 1^{ère} SEH proposé basé sur une stratégie d'intelligence artificielle

La Figure.IV.37 montre les résultats de simulation de la stratégie de gestion d'énergie intelligente pour 10 modes de fonctionnement différents du SEH proposé et peut être interprétée comme suit.

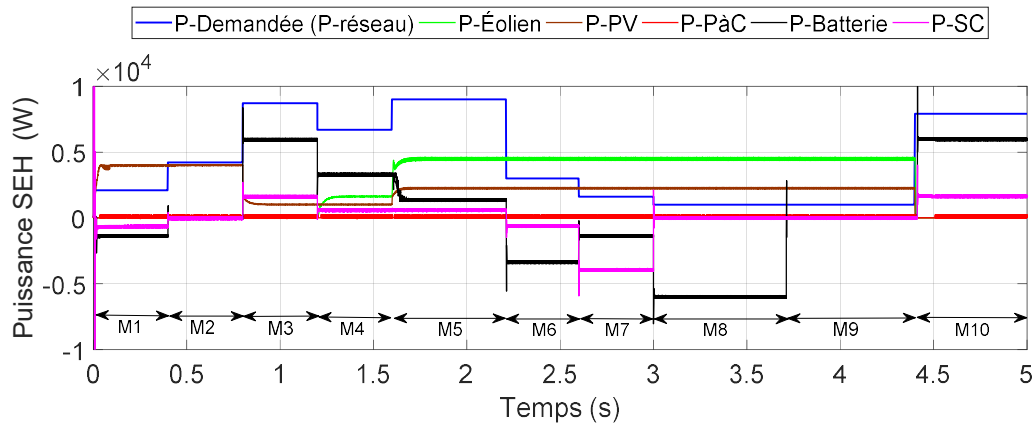


Fig.IV.37 Puissances du système énergétique hybride.

En mode 1, la puissance demandée de 2100 W est inférieure à la puissance des sources ($P_{net} > 0$), de sorte que 4000 W sont générés à partir du générateur PV et 200 W à partir de la source PàC. Cependant, le générateur d'énergie éolienne est inactif. Quant à l'énergie excédentaire, elle est stockée dans le SSEH de sorte que 1400 W soient chargés dans la batterie et 700 W dans le SC. En mode 2, le générateur PV produit 4000W et la source PàC produit 200W tandis que le générateur éolien est maintenu inactif. Dans ce mode, la puissance demandée de 4200 W est égale à la puissance des sources ($P_{net} = 0$). Dans ce cas, les éléments SSEH sont inactifs. En mode 3, la demande de puissance de 8700 W est supérieure à la puissance des sources ($P_{net} < 0$) de sorte que 200 W sont générés à partir de la source PàC et 1000 W à partir du générateur PV, tandis que le générateur éolien ne peut pas générer de puissance. Les 7500W de puissance nécessaire sont compensés par la décharge SSEH de sorte que 5900W sont déchargés de la batterie et le SC est également impliqué dans le processus de décharge via une décharge de 1600 W pour protéger la batterie d'une décharge profonde. En mode 4, le générateur éolien produit 1600 W, le générateur PV produit 1000 W et le PàC produit 200 W. Cependant, dans ce mode, la puissance demandée de 6700 W est supérieure à l'énergie générée par les sources ($P_{net} < 0$), ainsi un SSEH est actionné pour aider les générateurs de puissance en déchargeant 600 W du SC et 3300 W de la batterie. En mode 5, la puissance demandée est supérieure à la puissance de la source ($P_{net} < 0$) Par conséquent, la batterie se partage de 1400 W et le SC se partage de 600 W pour prendre en charge les sources

Chapitre IV : Simulation et Optimisation de gestion énergétique d'un 1^{ère} SEH proposé basé sur une stratégie d'intelligence artificielle

d'énergie pour répondre à la puissance demandée de 9000 W, de sorte que 4500 W est produit par la source d'énergie éolienne, 2300 W par le générateur PV et 200 W par la source PàC. En mode 6, la puissance totale produite par les sources dépasse la demande de puissance ($P_{net} > 0$), de sorte que 2 300 W sont générés par le générateur photovoltaïque, 4 500 W par l'éolienne et 200 W par la source PàC. Quant à l'énergie restante, elle est rechargée via le SSEH : 3400 W via la batterie et 600 W via le SC. En mode 7, le SC est chargé à un rythme élevé de 4 000 W, tandis que la batterie est chargée à un rythme inférieur de 1 400 W car la puissance des sources dépasse la puissance demandée de 1 600 W ($P_{net} > 0$). Dans ce mode, 4 500 W sont produits par l'éolienne, 2 300 W par le générateur photovoltaïque et 200 W par la source PàC. Dans les modes 8 et 9, la valeur de la puissance demandée diminue à 1 000 W, tandis que la source PàC produit 200 W, le générateur photovoltaïque produit 2 300 W et l'éolienne produit 4 500 W. Dans ces modes, la puissance demandée est inférieure à la valeur de la puissance des sources ($P_{net} > 0$). En mode 8, Fonctionnement sur batterie uniquement pour charger la puissance totale excédentaire de 6000 W. Quant au SC, il est inactif car SOC_sc a atteint SOC_sc-max (dans notre cas, SOC_sc-max est réglé à 85%) pour protéger de la surcharge, comme le montre la figure IV.45. En mode 9, lorsque le SOC de la batterie atteint sa capacité maximale (SOC_bat-max) (dans notre cas, SOC_bat max = 55%) et que le SOC du supercondensateur atteint son maximum (SOC_sc-max), comme illustré sur les figures IV.44 et IV.45, l'ensemble du SSEH entre dans un état inactif. Par conséquent, dans ce mode, la puissance totale excédentaire est dissipée en activant le délestage, comme illustré sur la figure IV.43. Cette action sert à protéger le SSEH contre la surcharge. En mode 10, la puissance demandée s'élève à 7900 W, tandis que la source PàC produit 200 W. Quant à l'éolienne et au générateur photovoltaïque, ils ne parviennent pas à produire de l'énergie en raison des conditions climatiques. Dans ce mode, la demande de puissance dépasse la capacité des sources d'énergie ($P_{net} < 0$). Pour répondre aux besoins d'énergie nécessaires, la batterie se décharge de 6 000 W et le SC assiste le processus de décharge en fournissant 1 700 W pour soutenir la batterie et la protéger d'une décharge profonde.

Remarques

On note que la source PàC partage avec les sources d'énergie une faible puissance de sortie d'environ 200 W dans tous les modes. Ceci est fait pour maintenir une tension constante du bus DC en suivant la valeur de référence, malgré la charge et la décharge du SSEH et les changements qui se produisent dans le système, comme le montre la figure IV.46 (dans notre cas, $V_{dc-ref} = 800 \text{ V}$), grâce au contrôle de cette source (PàC).

IV.9.2. Comparaison les résultats des deux approches proposées de gestion d'énergie électrique

Une analyse comparative a été menée entre la stratégie de gestion d'énergie classique et la stratégie de gestion d'énergie intelligente proposée (CLF-FOPI) a été réalisée pour évaluer les performances de l'unité de gestion de l'énergie proposée ont été évaluées en faisant varier la puissance de sortie du système photovoltaïque et du générateur éolien en réponse aux changements climatiques. De plus, le système de stockage d'énergie hybride (SSEH) est chargé et déchargé conformément aux changements dans la demande d'énergie et la production d'énergie pour démontrer l'efficacité de cette approche de gestion proposée par rapport à la gestion classique pour parvenir à une gestion optimale du HES. Cela nous permet d'analyser les résultats obtenus en deux sections, comme suit :

IV.9.2.1. Section 1 : Côté Générateurs

Nous pouvons observer sur les figures IV.38, IV.39 et IV.40 que lorsque la gestion classique de l'énergie est utilisée, la production d'énergie du système photovoltaïque est de 55 watts pendant l'intervalle de temps [4,3 s -5 s], et l'éolienne produit 30 et 40 watts pendant les intervalles de temps [0s-1,3s] et [4,3s-5s], respectivement. En revanche, lorsqu'on utilise la gestion proposée, la puissance de sortie de ces générateurs chute à 0 watts pendant les intervalles de temps mentionnés ci-dessus, et dans les autres champs de temps, la puissance des générateurs reste la même, conséquence des conditions programmées dans la gestion proposée. Quant à l'énergie produite par la pile à combustible, elle est à peu près égale dans les deux stratégies.

De la différence mentionnée ci-dessus, on peut conclure qu'en utilisant la gestion proposée, le générateur photovoltaïque et l'éolienne cessent de fonctionner lorsque le rayonnement solaire et la vitesse du vent chutent à des valeurs spécifiques (dans notre cas, Irradiation solaire est inférieur à 60 W/m², et la vitesse de vent est inférieure à 2 m/s). Cette action augmente la durée de vie des générateurs et réduit la maintenance.

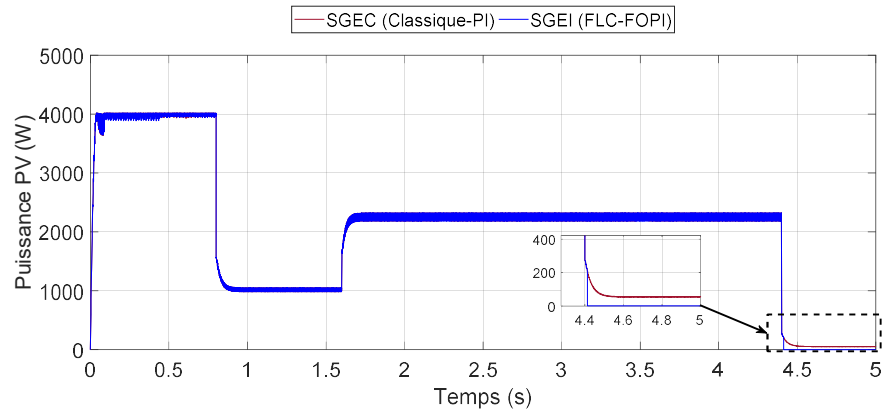


Fig.IV.38 Puissance d'un système photovoltaïque.

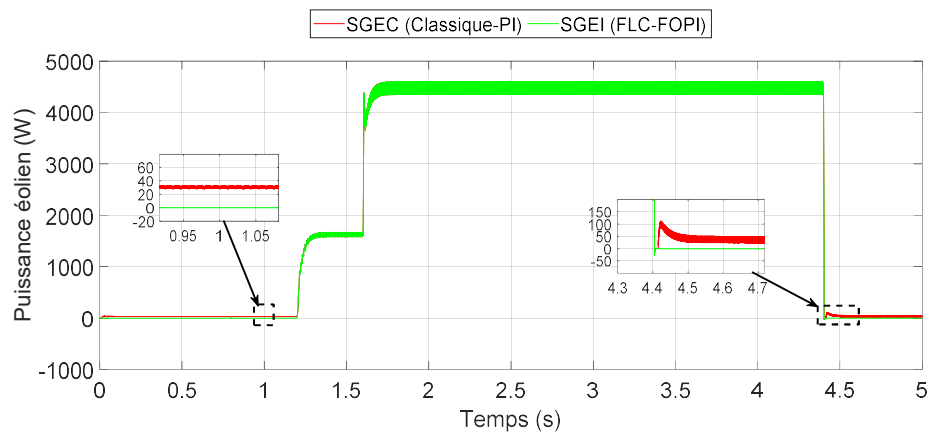


Fig.IV.39 Puissance d'un système éolien.

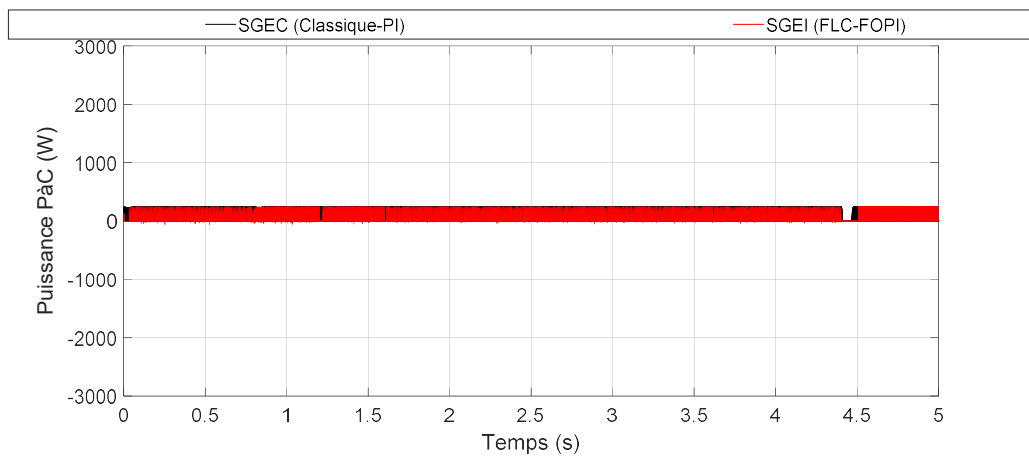


Fig.IV.40 Puissance d'un système pile à combustible.

IV.9.2.2. Section 2 : Côté Gestion (distribution et équilibre énergétique)

1. En ce qui concerne la distribution et le partage de l'énergie entre les éléments du système énergétique hybride, nous pouvons observer à partir des figures IV.41, IV.42 et IV.43, ainsi

que du tableau 2, que lorsqu'on utilise la stratégie de gestion d'énergie classique , à la fois la batterie et le supercondensateur (SC) sont chargés et déchargés avec des valeurs similaires dans tous les modes, sauf lorsque $SOC_bat > SOC_bat\ max$ et $SOC_sc > SOC_sc\max$. En revanche, lors de l'utilisation de la stratégie de gestion d'énergie proposée, nous contrôlons la charge et la décharge du système de stockage d'énergie hybride (SSEH) pour donner la priorité à la batterie comme élément principal et au SC comme élément secondaire, fournissant ainsi une aide à la batterie pendant les processus de charge et de décharge. Par conséquent, la batterie subit des valeurs de charge et de décharge plus élevées, tandis que le SC subit des charges et des décharges avec des valeurs plus petites et des temps de réponse plus courts par rapport à la gestion d'énergie classique. Ces différences sont illustrées dans les figures IV.41, IV.42, IV.43, IV.44 et IV.45 et dans le tableau IV.3.

2. En ce qui concerne en équilibrant l'énergie sur le bus DC, nous remarquons sur la Figure IV.46 que dans le cas de l'utilisation de la stratégie de gestion d'énergie classique, un pic important et un temps de réponse long sont produits, contrairement à la situation lors de l'utilisation la stratégie de gestion d'énergie proposée , où il y a un petit pic et un temps de réponse court. À cet égard, nous concluons que la gestion de l'énergie proposée distribue et équilibre l'énergie de manière efficace et robuste tout en contrôlant intelligemment les éléments SSEH pendant le processus de charge et de décharge, permettant une utilisation optimale de la batterie et du supercondensateur (SC) : un exploit inaccessible grâce à la stratégie de gestion d'énergie classique.

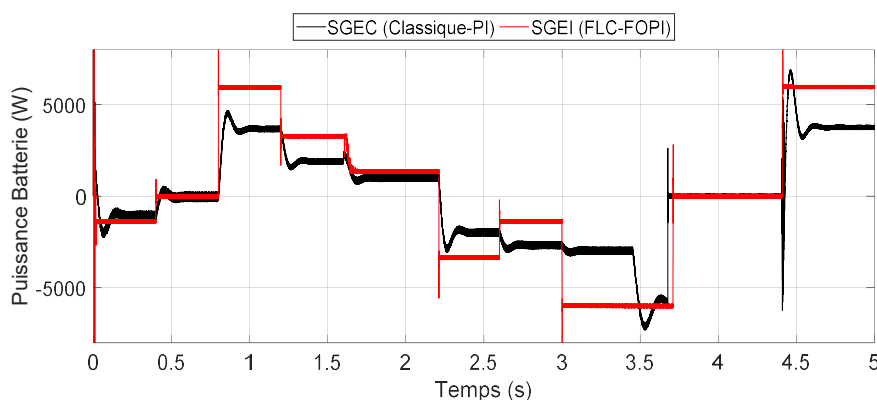


Fig.IV.41 Puissance de la batterie.

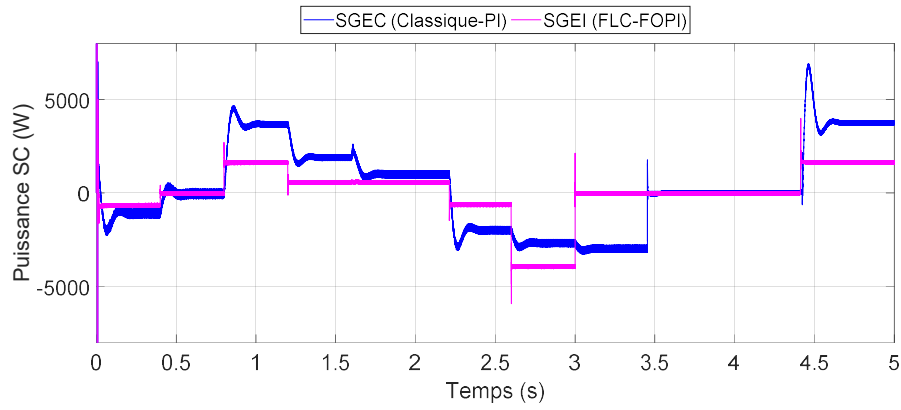


Fig.IV.42 Puissance du supercondensateur.

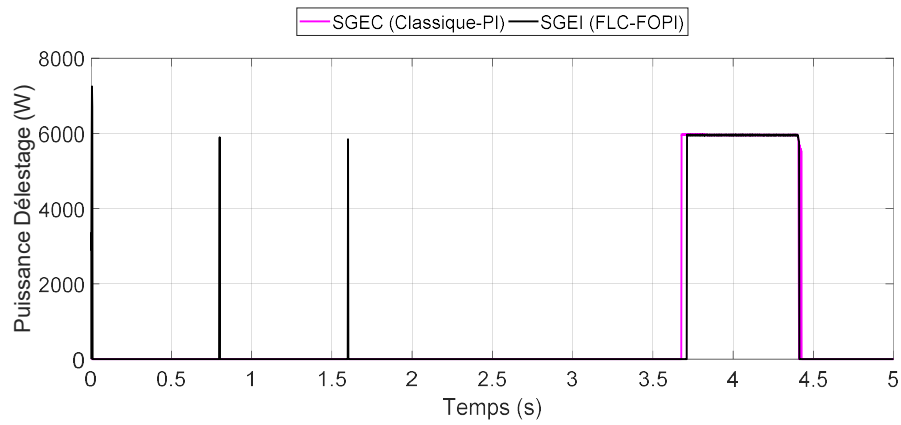


Fig.IV.43 Puissance d'un système délestage.

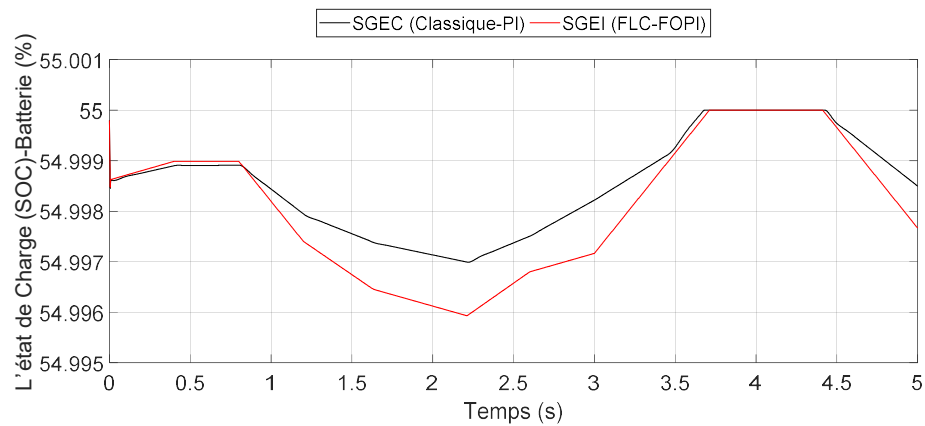


Fig. IV.44 État de charge de la batterie.

Chapitre IV : Simulation et Optimisation de gestion énergétique d'un 1^{ère} SEH proposé basé sur une stratégie d'intelligence artificielle

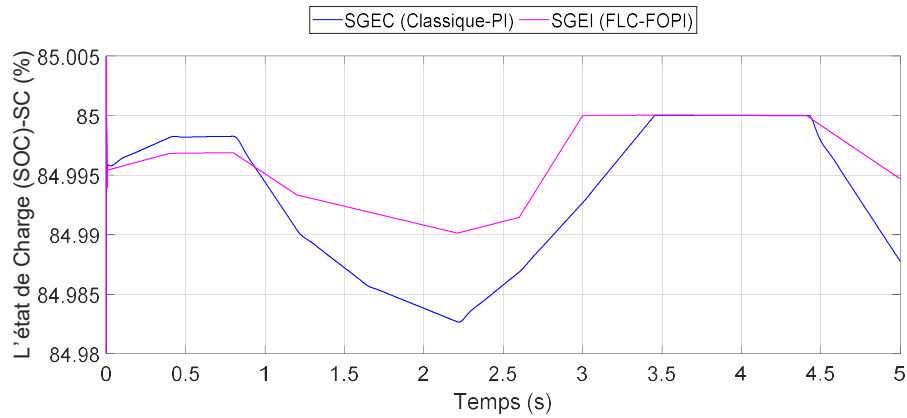


Fig. IV.45 État de charge du supercondensateur.

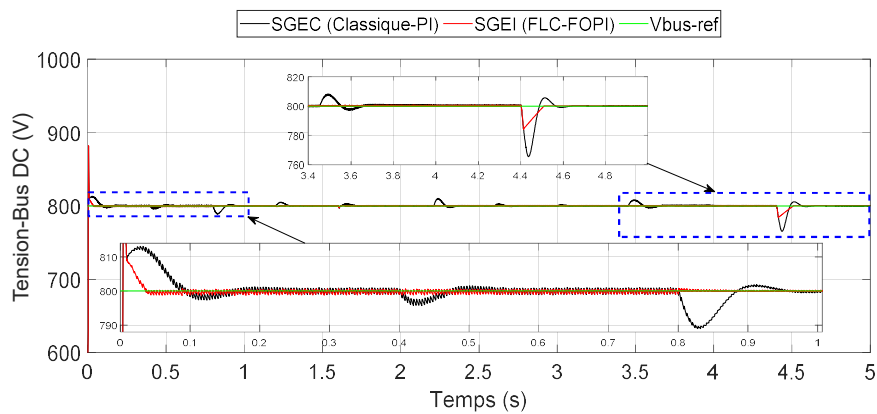


Fig. IV.46 Tension de Bus-DC.

Tableau IV.3 Comparaison des processus de temps de charge et de décharge SSEH utilisant SGEN (Classique-PI) et SGEI (FLC-FOPi).

Modes	SGEN (Classique-PI)				SGEI (FLC-FOPi)			
	Temps de réponse(s) (s) $P_{Batterie}$	Temps de réponse (s) P_{SC}	Temps (s) $SOC_{Bat-max}$	Temps (s) SOC_{SC-max}	Temps de réponse(s) (s) $P_{Batterie}$	Temps de réponse(s) (s) P_{SC}	Temps (s) $SOC_{Bat-max}$	Temps (s) SOC_{SC-max}
M.1	0.25	0.25	/	/	0.035	0.1	/	/
M.2	0.15	0.15	/	/	0.003	0.003	/	/
M.3	0.25	0.25	/	/	0.003	0.0032	/	/
M.4	0.2	0.2	/	/	0.0032	0.0088	/	/
M.5	0.15	0.15	/	/	0.078	0	/	/
M.6	0.188	0.188	/	/	0.0035	0.0045	/	/
M.7	0.15	0.15	/	/	0.003	0.004	/	/

Chapitre IV : Simulation et Optimisation de gestion énergétique d'un 1^{ère} SEH proposé basé sur une stratégie d'intelligence artificielle

M.8	0.15	0.15	/	/	0.0035	0.004	/	3
		0.0038	/	3.4532				
M.9	0.22418	0	/	/	0.0025	0	3.71178	/
	0.002633		3.67756					
M.10	0.35	0.35	/	/	0.142	0.142	/	/

IV.9.3 Analyse des avantages et des inconvénients de chaque approche en termes de performances et de complexité côté gestion d'énergie électrique

Les avantages et les inconvénients de la stratégie de contrôle classique et de la stratégie de contrôle intelligente pour la gestion de l'énergie du système hybride proposé peuvent être analysés en termes de performances et de complexité selon le tableau suivant :

Tableau IV.4 Analyse des avantages et des inconvénients de chaque approche (SGEC et SGEI) en termes de performances et de complexité

Stratégie de Contrôle	Performances	Complexité
SGEC (Classique-PI)	-La performance sous les changements climatiques et à la demande énergétique est moyenne - Temps de réponse sont lents - Les performances de partage d'énergie optimal entre les éléments du système de stockage d'énergie hybride pendant le processus de charge et de décharge sont moyennes.	- Ne nécessite pas une mémoire élevée - Son application est simple
SGEI (FLC-FOPI)	-La performance sous les changements climatiques et à la demande énergétique est très bien - Temps de réponse sont rapides - Les performances de partage d'énergie optimal entre les éléments du système de stockage d'énergie hybride pendant le processus de charge et de décharge sont très bien.	- Nécessite une mémoire élevée - Son application est complexe

IV.9.4 Analyse les résultats de la simulation côté réseaux électrique

Enfin, après s'être assuré que la puissance requise du réseau est assurée via SEH, la qualité de cette énergie dépend des techniques de contrôle mises en œuvre sur les variables associées au réseau. Pour atteindre cet objectif, nous avons utilisé un contrôle basé sur DPC avec contrôle non linéaire SOSMC (DPC-SOSMC) pour contrôler la puissance active et réactive circulant dans le réseau.

Les figures IV.47 et IV.48 montrent la puissance active et réactive contrôlée par le contrôle DPC-SOSMC proposé côté réseau. Comme le montre la figure IV.48, la puissance réactive circulant dans le réseau est ajustée à zéro. Les résultats de simulation montrent que le contrôleur proposé (SOSMC) est efficace qui assure le suivi jusqu'à la trajectoire souhaitée, sans bavardage ni oscillation.

Une évaluation de la distorsion harmonique du contrôleur SOSMC proposé a également été réalisée, comme le montre la figure IV.49. Il ressort clairement de la figure IV.49.b que la distorsion harmonique totale (THD) du courant du réseau (phase A) a été réduite à sa niveau minimum (0,35%).

Les résultats obtenus (figures IV.49.a et IV.49.b) démontrent que l'unité de contrôle SOSMC proposée fonctionne efficacement et avec un contrôle efficace pour suivre la puissance active et réactive en fonction de la demande de puissance du réseau électrique.

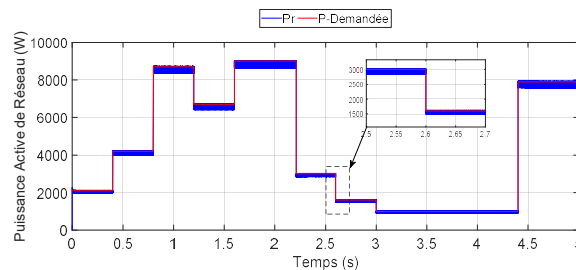


Fig. IV.47 Puissance active du réseau électrique.

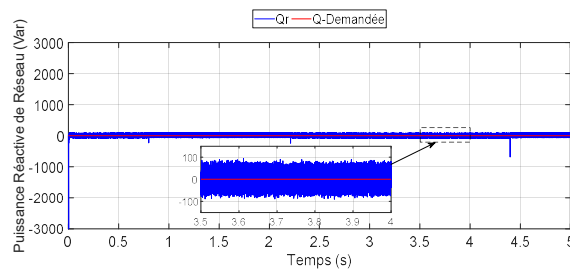


Fig. IV.48 Puissance réactive du réseau électrique.

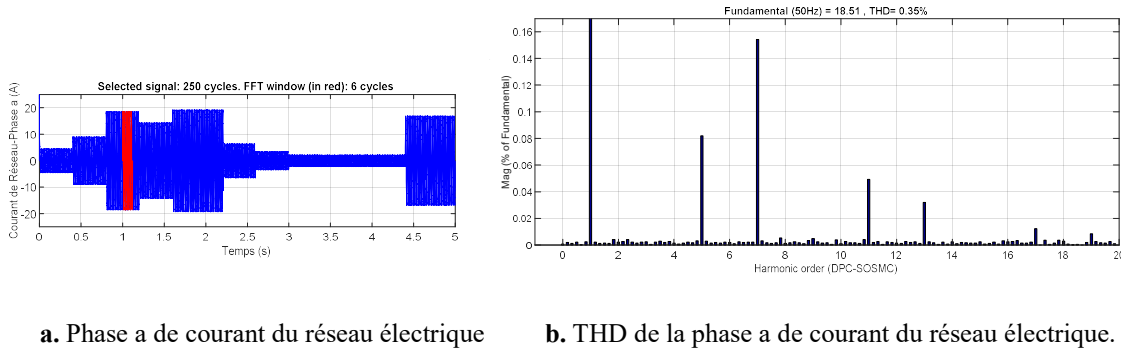


Fig. IV.49. Courant du réseau électrique et THD pour la phase a.

IV.10. Conclusion

Dans ce chapitre, une stratégie de gestion de l'énergie du système hybride éolien/PV/PàC/Batterie/SC basée sur le contrôle de la logique floue et l'intégrale proportionnelle d'ordre fractionnaire (CLF-FOPI) est conçue pour atteindre une gestion optimale de l'énergie et comparée à la stratégie classique.

L'efficacité de la gestion proposée a été vérifiée par des simulations réalisées sous le logiciel MATLAB Simulink dans des conditions variables (changement de rayonnement solaire, changement de la vitesse du vent, changement de la demande d'énergie).

Enfin, les résultats ont montré une fourchette l'efficacité et performance optimale de la stratégie de gestion proposée par rapport à la stratégie classique.

Quant au côté réseau, nous concluons que la quantité de puissance du réseau fournie par la technique SOSMC affiche des formes d'onde lisses avec de bons indicateurs de suivi et un faible THD à 0.35%.

Le chapitre suivant est consacré à la gestion de l'énergie pour le deuxième système énergétique hybride proposé basé sur la technique hybride intelligente.

**Chapitre V : Simulation et Optimisation de
gestion énergétique d'un 2^{ème} SEH proposée
basé sur une stratégie d'intelligence
artificielle hybride**

V.1. Introduction

Dans ce chapitre, pour assurer une gestion optimale du 2^{ème} système énergétique hybride proposé (éolienne/PV/PàC/GD/batterie/SC) (voir CH3-Fig.III.2), une stratégie hybride basée sur l'intelligence artificielle est proposée. De plus, pour contrôler la puissance active et réactive circulant dans le réseau, un contrôle direct de la puissance basé sur un CLF (DPC-FLC) a été proposé pour contrôler le convertisseur DC/AC (ondulière) côté réseau.

Enfin, pour tester l'efficacité et l'efficacité des contrôleurs proposés, le système proposé a été simulé sur le programme MATLAB-Simulink, en plus de discuter des résultats obtenus.

V.2. Procédure de dimensionnement d'un 2^{ème} système hybride proposée

Le dimensionnement d'un 2^{ème} système hybride proposée puisse être mis à dimensionnement comme suit

- Générateur d'énergie éolienne d'une puissance nominale de 6kW
- Générateur PV d'une puissance nominale de 6kW
- Pile à combustible d'une puissance 200 watts

Système de stockage hybride composé d'une batterie et d'un supercondensateur

- Valeur de capacité de la batterie 300Ah
- Valeur de capacité du supercondensateur 99.5F

Le générateur éolien et le générateur photovoltaïque sont considérés comme des sources principales, le générateur diesel et le système de stockage hybride est une solution de secours.

V.2.1. Profil de la charge

Le profil de consommation énergétique du réseau électrique adopté dans cette étude est représenté dans la Figure.V.1

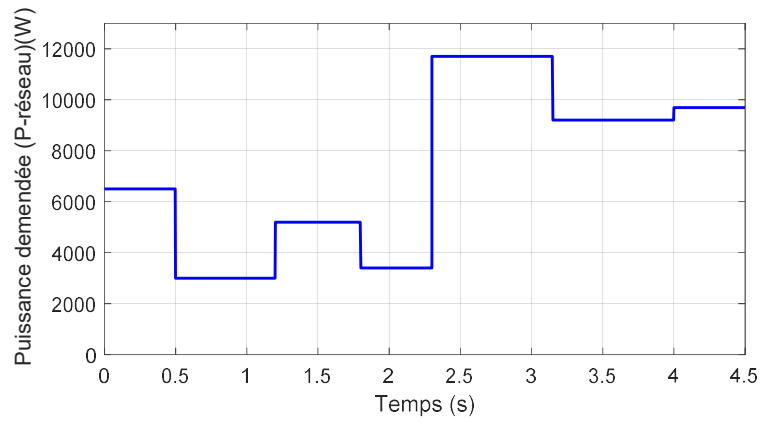


Fig.V.1 Profil de la puissance demandée.

V.2.2. Profil de rayonnement, de température et de vitesse du vent

Le profil de l'irradiation solaire, de la température et de la vitesse du vent adopté dans cette étude est représenté dans les figures V.2, V.3 et V.4.

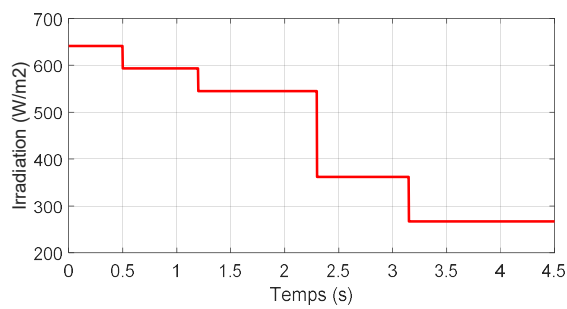


Fig.V.2 Profil de l'irradiation solaire.

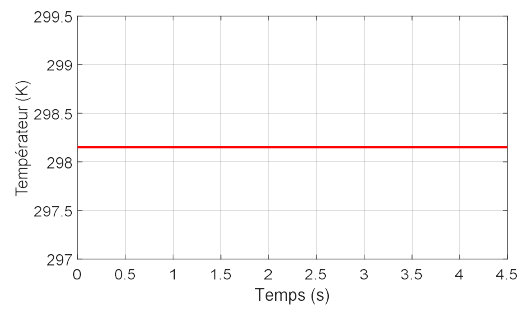


Fig.V.3 Profil de la température ambiante.

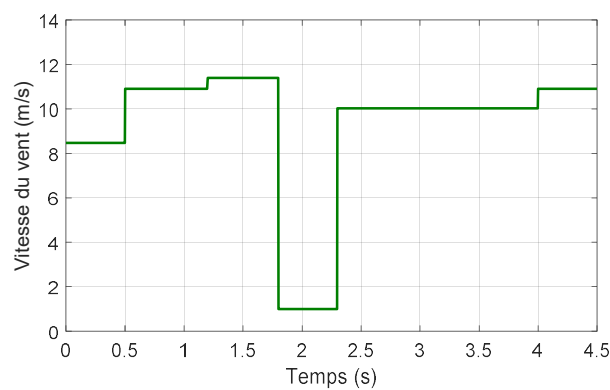


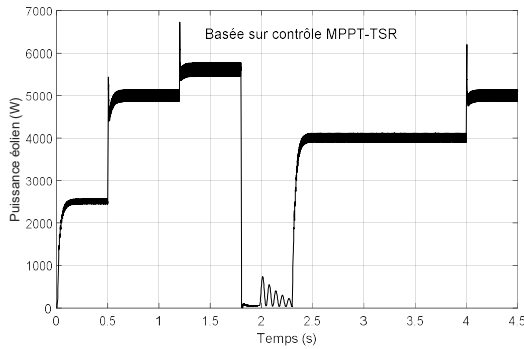
Fig.V.4 Profil de la vitesse du vent.

V.2.3. Energie produite par le système hybride

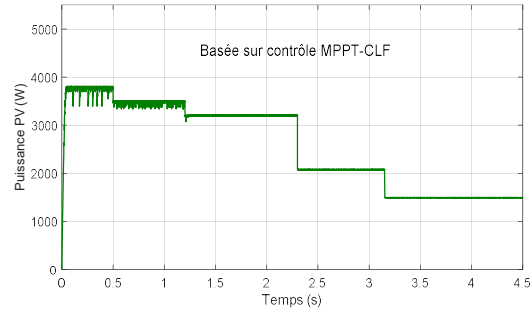
L'énergie produite par le système hybride peut s'expliquer comme suit:

Chapitre V : Simulation et Optimisation de gestion énergétique d'un 2^{ème} SEH proposée basé sur une stratégie d'intelligence artificielle hybride

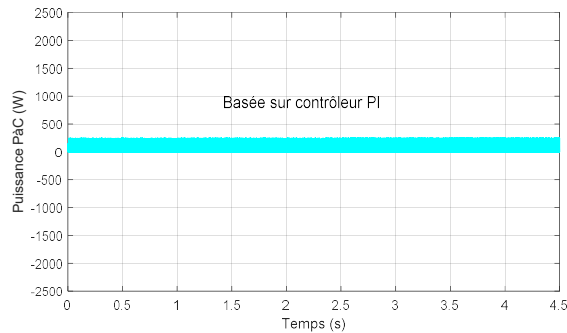
- L'énergie générée par le système éolien est obtenue sur la base du profil de vitesse du vent approuvé selon la Figure.V.5.a
- L'énergie générée par le système photovoltaïque est obtenue en fonction du profil d'irradiation et de la température approuvé selon la Figure.V.5.b.
- La puissance générée par le système de pile à combustible est obtenue selon la figure V.5.c



a. Puissance d'un système éolien.



b. Puissance d'un système photovoltaïque.



c. Puissance d'un système pile à combustible.

Fig.V.5 Puissance produite par les sources d'un système d'énergie hybride.

Dans ce chapitre de la thèse, pour la gestion de l'énergie dans le 2^{ème} SEH étudié, une stratégie hybride basée sur l'intelligence artificielle CLF-CRNA (FLC-ANN) a été proposée [V.1].

V.3. Élaboration d'une (stratégie) technique hybride d'optimisation basée sur Contrôle Logique Floue (CLF)- Contrôle Réseau Neuronale Artificiel (CRNA) pour la gestion de l'énergie électrique du 2^{ème} système hybride proposé

En utilisant deux unités de la famille des unités d'intelligence artificielle (CLF et CRNA, respectivement), nous les combinons pour créer une unité hybride qui fonctionne comme un

Chapitre V : Simulation et Optimisation de gestion énergétique d'un 2^{ème} SEH proposée basé sur une stratégie d'intelligence artificielle hybride

système unique. C'est ainsi que nous avons conçu la stratégie de gestion de l'énergie hybride présentée dans la figure V.6.

En fonction du SOC du SSEH et de la puissance nette, cette unité hybride détermine la puissance de référence SSEH et l'état (ON/OFF) des commutateurs K_{wind} , K_{pv} et K_{DG} pour allumer ou éteindre le système éolien, le système photovoltaïque et le générateur diesel, respectivement. Dans l'unité de gestion proposée, deux régulateurs PI ont été inclus afin de suivre les références énergétiques nécessaires pour le SSEH. De plus, afin de maintenir la stabilité du bus DC dans le système hybride, nous utilisons un troisième régulateur PI pour contrôler la pile à combustible. Le but de cette unité proposée est d'atteindre les objectifs suivants :

- Distribution optimale de la puissance entre les éléments du SSEH
- Assurer la continuité de la fourniture d'énergie à la charge (réseau électrique) et maintenir une tension continue constante malgré les changements de la demande d'énergie et le changement climatique dans le système hybride.
- Maintenir le SSEH contre la surcharge et la décharge profonde dans les limites de l'état de charge (SOC)
- Gestion optimale entre les éléments du SEH.

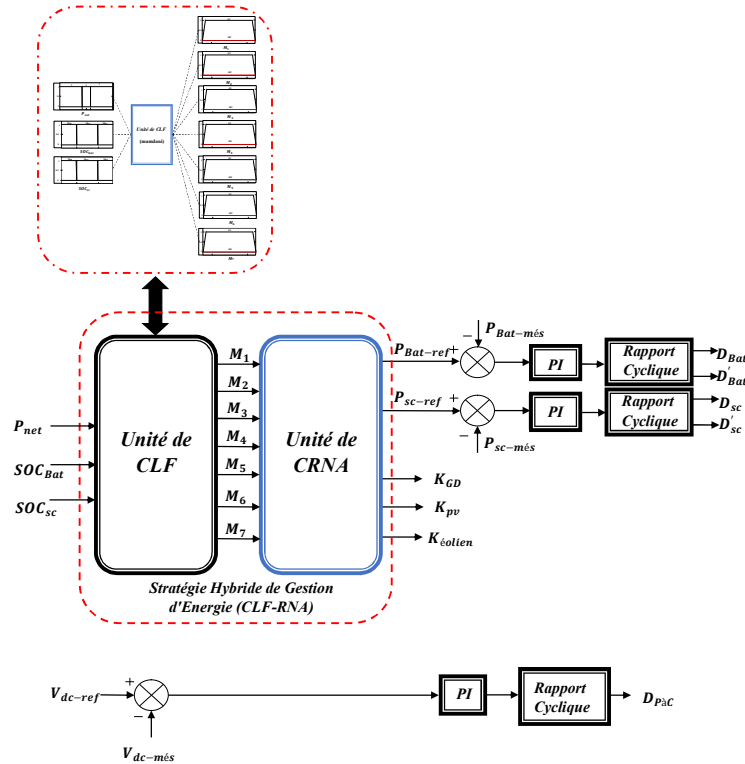


Fig.V.6. Diagramme représentant une stratégie hybride de gestion de l'énergie basée sur un CLF-CRNA (FLC-ANN).

V.3.1. Identification des variables d'entrée et de sortie avec des fonctions d'appartenance pour l'unité de gestion CLF proposée

Comme le montre la figure V.6, le contrôleur logique flou (FLC) est le premier élément essentiel du système de gestion de l'énergie dans l'unité hybride proposée. Selon la figure V.7, cette unité est conçue en utilisant 3 entrées et 7 sorties ainsi que leurs fonctions d'appartenance correspondantes qui sont les suivantes :

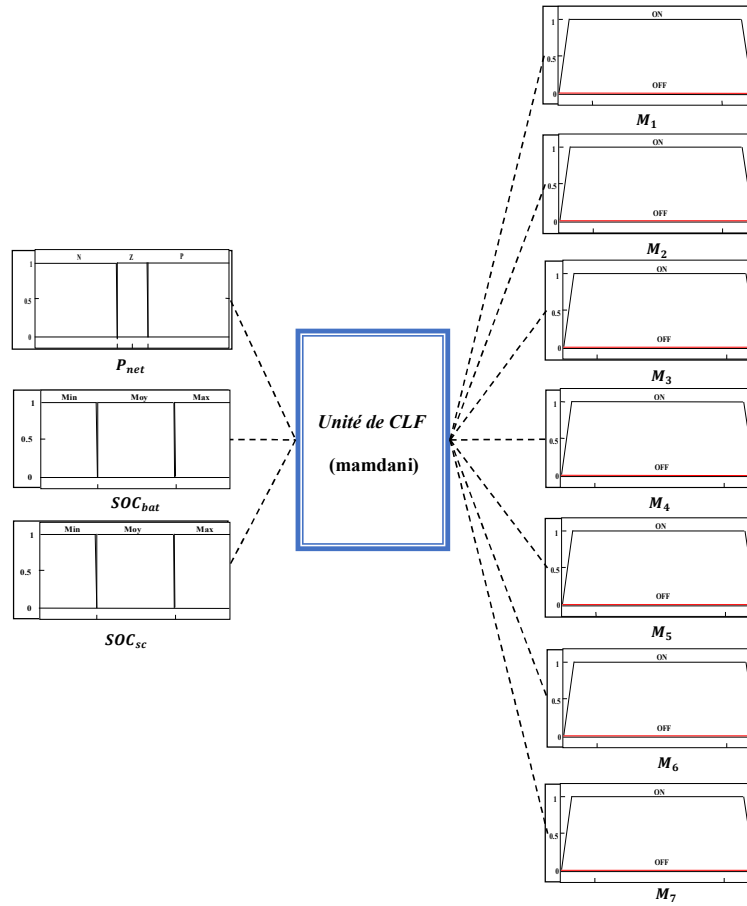


Fig.V.7. Première unité de gestion (FLC).

• **Entrée 1 :** La puissance nette est la première entrée de l'unité FLC et il est lié à la décision d'exploiter l'éolienne, le PV, le générateur diesel et les composants HESS en fonction de la demande d'énergie électrique et les énergies d'un SEH. Il est déterminé comme suit :

$$P_{net} = P_{éolien} + P_{pv} + P_{PaC} + P_{GD} - P_{demandée} \quad (V.1)$$

Comme le montre la figure V.8, trois fonctions d'appartenance : N, Z et P sont attribuées à cette entrée.

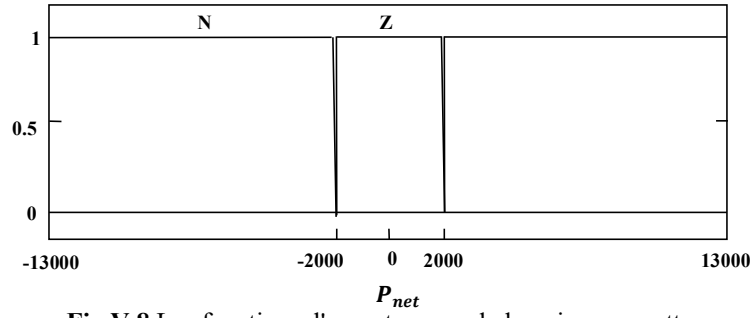


Fig.V.8 Les fonctions d'appartenance de la puissance nette.

• **Entrées 2 et 3** : L'état de charge de la batterie et l'état de charge du SC sont respectivement les deuxième et troisième entrées de l'unité FLC, la batterie servant de réserve d'énergie primaire pour assister les énergies renouvelables en cas de panne. Le SC agit comme une seconde réserve de marche lors de surcharges et de décharges profondes de la batterie, formant ainsi un SSEH. Ces entrées sont nécessaires pour déterminer les puissances de référence (batterie et supercondensateur) indirectement par le biais de modes de fonctionnement basés sur les trois fonctions d'appartenance, qui sont les suivantes : haute, moyenne et basse, comme le montrent la figure V.9.

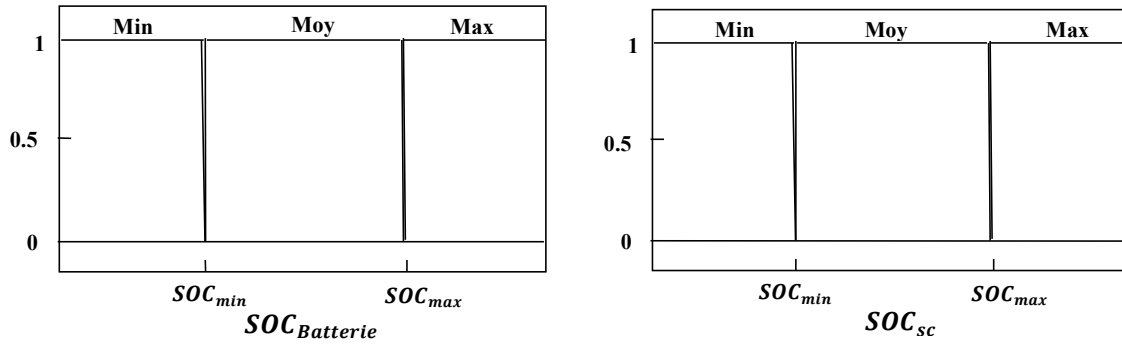


Fig.V.9. Fonctions d'appartenance au SOC de la batterie et SC.

Sorties 1, 2, 3, 4, 5, 6 et 7 : Ce sont les sorties de l'unité CLF, de sorte qu'elles fonctionnent pour déterminer les modes de fonctionnement via l'état (On / Off) de $K_{M1,2,3,4,5,6,7}$. Ces sorties sont nécessaires pour le contrôleur CRNA. Ces sorties se voient attribuer deux fonctions d'appartenance comme suit : ON et OFF, comme indiqué dans la figure V.10.

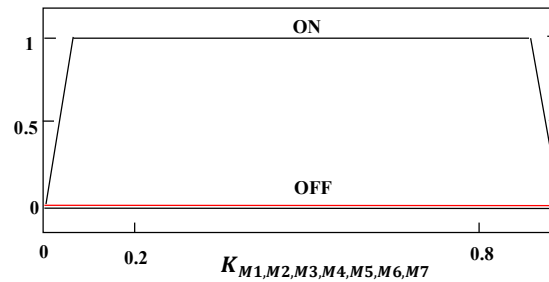


Fig. V.10. Fonctions d'appartenance de $K_{M1,2,3,4,5,6,7}$.

V.3.2. Définition des règles floues pour la prise de décision

Un échantillon des règles conçues pour l'unité CLF qui définissent les sept modes de fonctionnement est représenté dans le tableau V.1.

Tableau V.1. Règles utilisées dans l'unité CLF.

Entrées				sorties						
N.Règle	P_net	SOC_bat	SOC_sc	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
R.1	Positif	Moy	Moy	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
R.2	Positif	Max	Moy	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
R.3	Positif	Max	Max	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF
R.4	Zéro	Moy	Moy	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
R.5	Zéro	Max	Max	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF
R.6	Zéro	Min	Min	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
R.7	Négatif	Min	Moy	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF
R.8	Négatif	Moy	Max	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
R.9	Négatif	Max	Max	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF
R.10	Négatif	Min	Max	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OFF
R.11	Négatif	Min	Min	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON

Définition des règles

- **P_net**

Positif, Zéro, Négatif

SOC_bat et SOC_sc

Minimale=Min, Moyen=Moy, Maximale=Max

V.3.3 Contrôle de Réseau Neuronal Artificiel (CRNA) [V.2]

Le réseau neuronal artificiel tel que représenté sur la figure V.11 et l'équation V.2 est un modèle mathématique qui contient trois règles (multiplication, addition et activation) de sorte que ce dernier fonctionne pour simuler la structure et les fonctions des réseaux neuronaux biologiques à travers trois étapes comme suit :

- **Entrée neuronale artificielle** : les entrées sont pondérées en multipliant chaque valeur d'entrée par un poids individuel.

Chapitre V : Simulation et Optimisation de gestion énergétique d'un 2^{ème} SEH proposée basé sur une stratégie d'intelligence artificielle hybride

- **Milieu neuronal artificiel** : toutes les entrées pondérées sont collectées et biais par la fonction d'addition.
- **Sortie neuronale artificielle** : à l'aide de la fonction d'activation (fonction de transfert), la somme des entrées pondérées et biais est transmise précédemment.

$$y(k) = F\left(\sum_{i=0}^m w_i(k).x_i(k) + b\right) \quad (V.2)$$

Où:

- x est la valeur d'entrée dans le temps discret k où i passe de 0 à m .
- w est la valeur du poids en un temps discret k où i passe de 0 à m .
- b est le biais.
- F est une fonction de transfert.
- y est la valeur de sortie dans temps discret k .

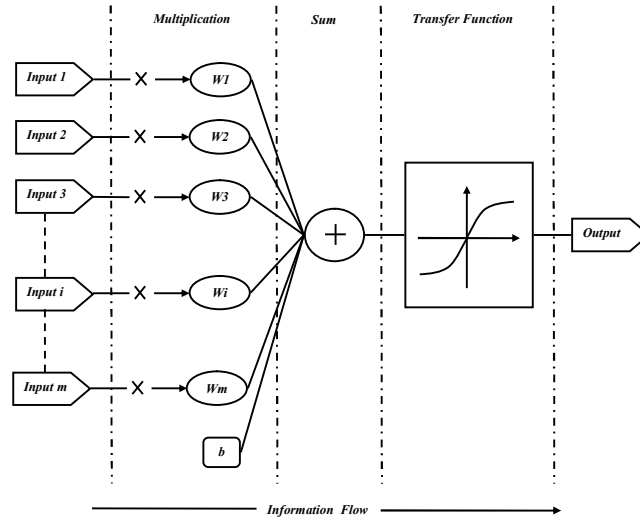


Fig.V.11 Principe de fonctionnement du réseau de neurones artificiels.

V.3.3.1 Unité de CRNA proposé

Dans notre travail visant à obtenir une gestion optimale de l'énergie pour le système proposé, un CRNA a été ajouté au système de gestion hybride proposé comme deuxième partie essentielle, de sorte que la structure du réseau neuronal proposée se compose de 7 entrées ($M_{1,2,3,4,5,6,7}$) et 5 sorties ($P_{ref-Bat}$, P_{ref-sc} , K_{pv} , $K_{éol}$ et K_{GD}) comme le montre la figure V.12.

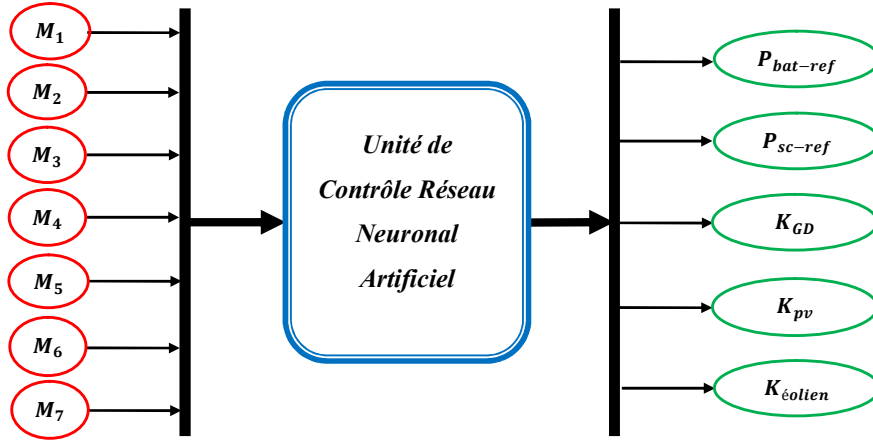


Fig.V.12. Structure de l'unité CRNA proposé.

V.3.3.2 Entraînement d'unité de CRAN proposé

Après avoir conçu le CRAN proposé qui détermine la référence de puissance de la batterie, et SC et l'état de K_pv, K_éol et K_GD est entraînement, par exemple la figure V.13.

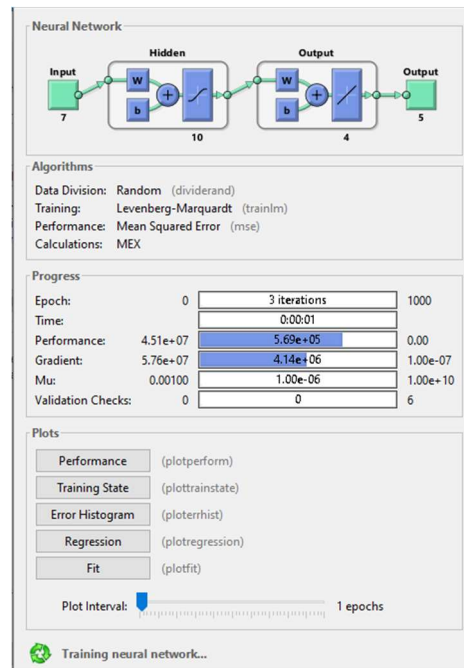


Fig.V.13. L'étape d'entraînement (formation) de l'unité CRNA.

V.3.3.3 Résultats de la formation CRAN

La figure V.14 montre les résultats de sortie du réseau pour la validation, l'entraînement et les tests cibles. Dans ce cadre, 15 % des données de validation (the validation data), 15 % des données de test cible (the target testing) et 70 % des données d'entraînement (the training data) ont été utilisés pour former le CRAN. La figure V.14 présente également l'erreur quadratique moyenne (MSE) pendant l'entraînement, qui indique les meilleures performances

Chapitre V : Simulation et Optimisation de gestion énergétique d'un 2^{ème} SEH proposée basé sur une stratégie d'intelligence artificielle hybride

de validation avec une valeur de $6,7508e-25$ à l'époque 7. Sur la base des courbes de régression présentées, nous concluons que l'unité CRAN proposée a été formée efficacement, de sorte que tous les ensembles de données présentent des valeurs R optimales ($R = 1$ dans tous les cas).

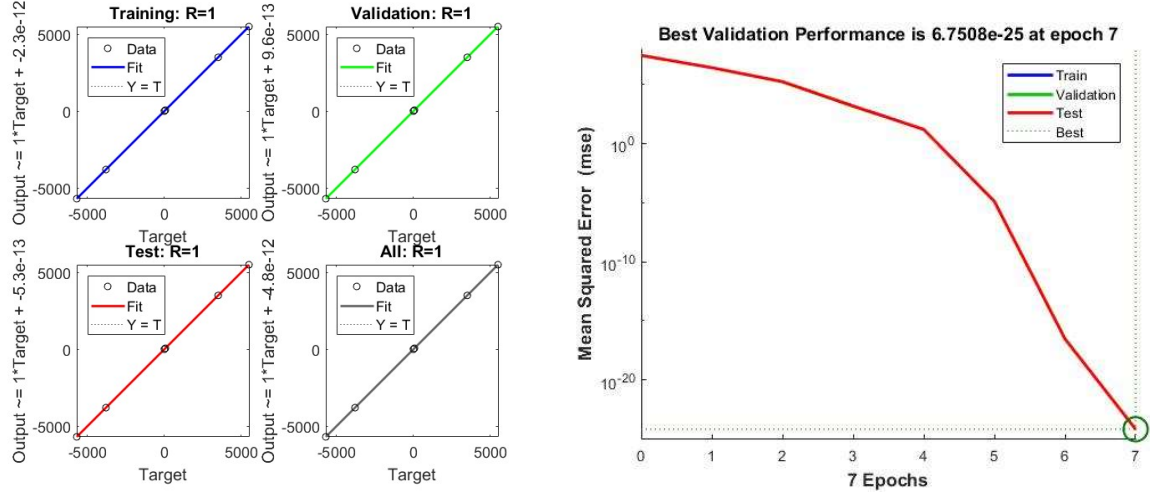


Fig.V.14. Performances de régression et validation de l'unité CRNA.

V.4. Conception d'un algorithme de gestion de l'énergie pour le système hybride basé sur le contrôle logique flou- Contrôle Réseau Neuronal Artificiel (CLF-CRNA)

Pour obtenir une gestion d'énergie optimale du SEH proposé un algorithme de technique intelligente hybride basé sur un contrôle logique flou avec contrôle réseau neuronal artificiel est conçu selon la Figure.V.15

Son principe de fonctionnement peut être brièvement expliqué comme suit :

- Si $P_{net} = 0$: les sources d'un SEH produisent une puissance égale à la demande de puissance du réseau, donc l'unité CLF détermine le mode M1 ou M4 ou M7, puis à partir l'unité CRNA détermine le mode de fonctionnement des sources d'un SEH et le SSEH.
- Si $P_{net} > 0$: les sources d'un SEH produisent un excès de puissance à la demande de puissance du réseau, donc l'unité CLF détermine le mode M2 ou M3 ou M4, puis à partir l'unité CRNA détermine le mode de fonctionnement des sources d'un SEH et le SSEH.
- Si $P_{net} < 0$: les sources d'un SEH produisent une énergie insuffisante à la demande énergétique du réseau, donc l'unité CLF détermine le mode M5 ou M6 ou M7, puis à partir l'unité CRNA détermine le mode de fonctionnement des sources d'un SEH et le SSEH.

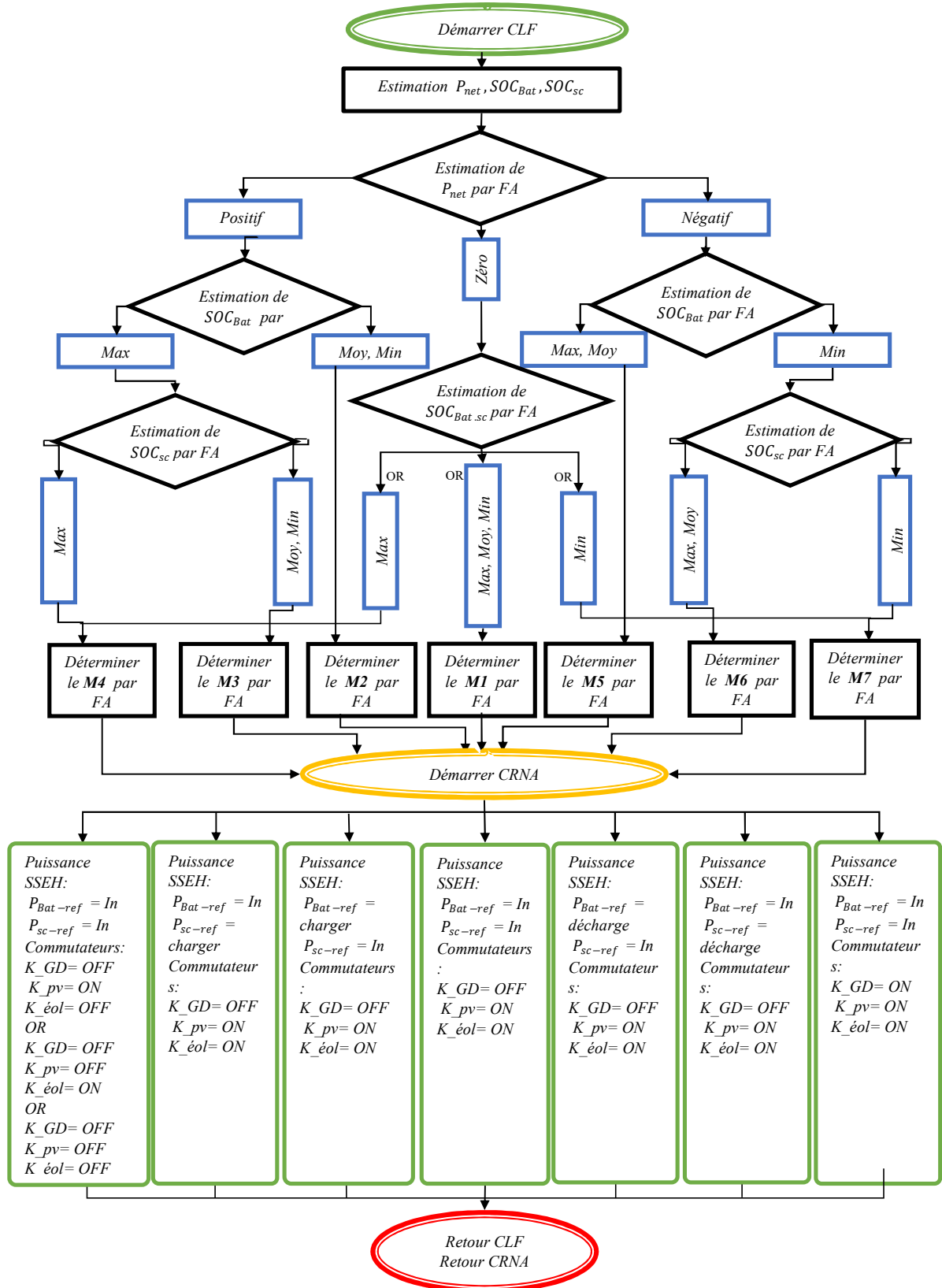


Fig.V.15 Organigramme proposé du système de gestion intelligente hybride (CLF-CRNA)-(FLC-ANN) de l'énergie.

V.4.1. Adaptation de l'algorithme proposé pour tenir compte des variations des conditions météorologiques et des besoins du réseau électrique selon les différents modes de fonctionnement

Les figures V.16 à V.22 fournissent une brève explication des sept modes de fonctionnement à travers lesquels l'algorithme proposé est testé en réponse aux variations climatiques et à la demande d'énergie (réseau électrique) à laquelle le système proposé est soumis.

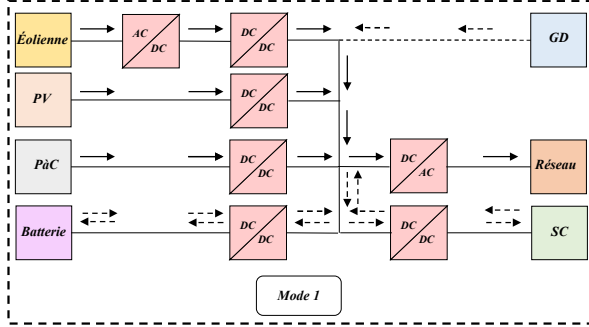


Fig.V.16 mode de fonctionnement 1 du SEH proposé.

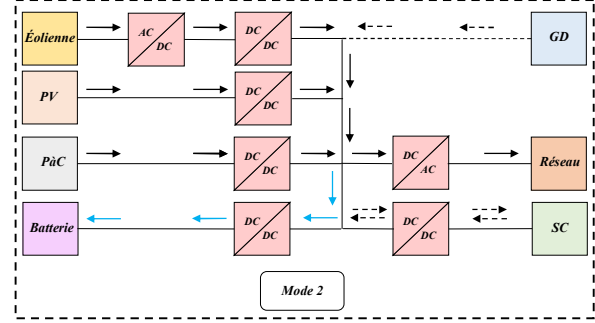


Fig.V.17 mode de fonctionnement 2 du SEH proposé.

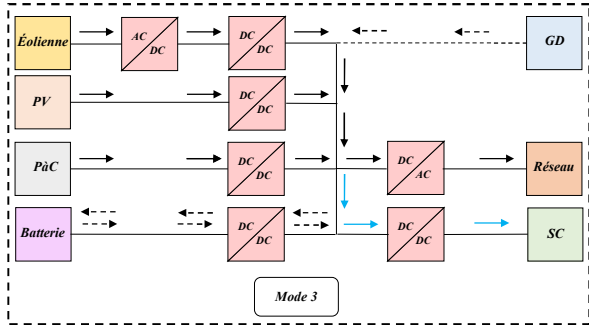


Fig.V.18 mode de fonctionnement 3 du SEH proposé.

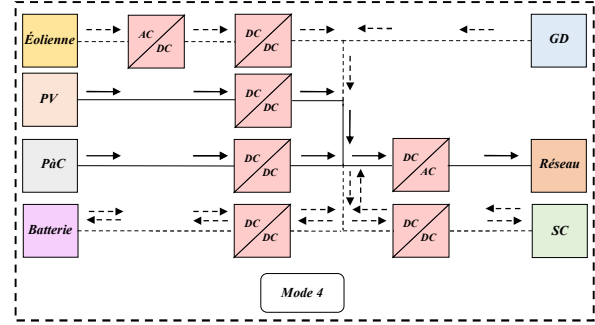


Fig.V.19 mode de fonctionnement 4 du SEH proposé.

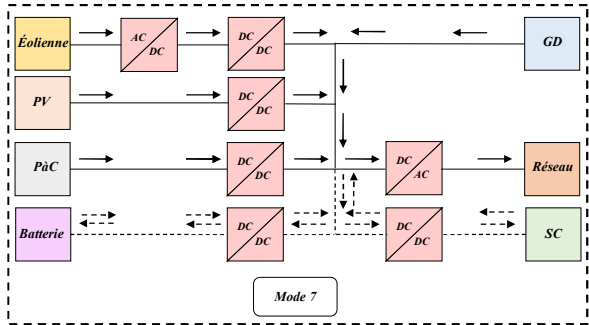


Fig.V.20 mode de fonctionnement 5 du SEH proposé.

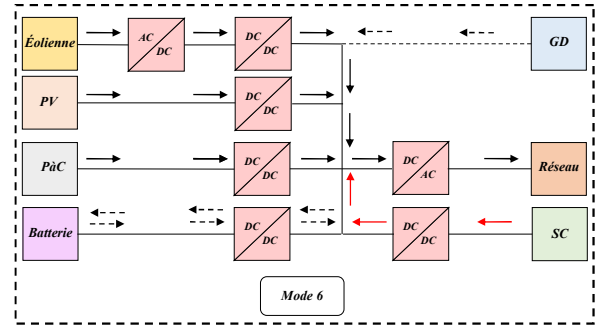


Fig.V.21 mode de fonctionnement 6 du SEH proposé.

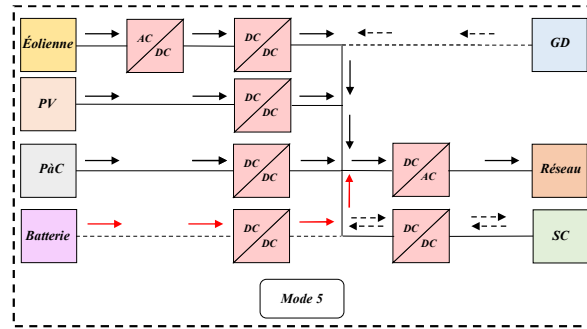


Fig.V.22 mode de fonctionnement 7 du SEH proposé.

V.5. Implémentation du algorithme d'optimisation proposée dans un environnement de simulation « MATLAB SIMULINK »

En effectuant un test de simulation du système hybride proposé (Éolienne/PV/FC/GD/Batterie/SC) connecté au réseau électrique sur la plateforme MATLAB Simulink dans des conditions climatiques et de demande énergétique changeantes (variation de la demande énergétique ($P_{demandée}$) Figure V.1, changement du rayonnement solaire (G) Figure V.2 à une température constante (T) Figure.V.3, variation de la vitesse du vent (V_{wind}) Figure.V.4), nous avons examiné les performances dynamiques de ce dernier en termes d'amélioration de la distribution et de l'équilibre de la puissance entre les différents composants du système hybride et le réseau électrique à travers les contrôleurs proposés en Côté gestion et côté réseau électrique .

V.5.1 Analyse les résultats de la simulation côté gestion d'énergie électrique

À travers les différents scénarios qui peuvent survenir en raison des facteurs mentionnés ci-dessus, qui incluent plusieurs modes de fonctionnement du HES dans notre cas 7 modes, les résultats obtenus dans la figure V.23 peuvent être interprétés comme suit :

Mode 1 : Dans ce mode, les composants HESS sont inactifs (0 W) et le générateur diesel arrête de fonctionner. Cela est dû au fait que la puissance demandée est égale à la puissance produite ($P_{net} = 0$, figure V.24), là où le générateur photovoltaïque produit 3 800 watts, le générateur éolienne 2500 watts et la source FC produit 200 watts.

Mode 2 : Dans ce mode, Bien que le supercondensateur soit au repos (charge/décharge 0 W) et que le générateur diesel ne fonctionne pas, la batterie est en mode charge (charge 5700 W). De ce fait, la puissance demandée de 3000 watts est inférieure à la puissance produite ($P_{net} > 0$, figure V.24), de sorte que le générateur photovoltaïque produit 3500 watts, la source PàC produit 200 watts tandis que l'éolienne produit 5000 watts.

**Chapitre V : Simulation et Optimisation de gestion énergétique d'un 2^{ème} SEH proposée
basé sur une stratégie d'intelligence artificielle hybride**

Mode 3 : Dans ce mode, comme le montre la figure V.25, le SOCbat a atteint sa charge maximale, ce qui met la batterie au repos (charge de 0 W) et la sortie du générateur diesel est de 0 W (inactif) tandis que le supercondensateur est en mode de charge pour charger l'énergie excédentaire (Charge 3800 watts) cela est dû à la puissance produite qui est supérieure à la puissance requise estimée à 5200 ($P_{net} > 0$, figure V.24), puisque l'éolienne produit 5600 watts, le générateur photovoltaïque produit 3200 watts et la source PàC produit 200 watts.

Mode 4 : Dans ce mode, le générateur PV et le PàC continuent de fonctionner pour fournir la puissance nécessaire de 3 400 W, tandis que l'éolienne est déconnectée et le SC arrête de charger pour éviter une surcharge lorsque l'état de charge du HESS atteint son maximum ($SOC_b > SOC_{max}$ et $SOC_{sc} > SOC_{max}$), comme le montrent les figures V.25 et V.26. Quant au générateur diesel et à la batterie, ils restent dans leur état antérieur.

Mode 5 : Dans ce mode, le générateur diesel reste inactif même lorsque cela est nécessaire, pendant que le HESS se décharge, et la batterie est prioritaire pendant le processus de décharge (décharge de 5 500 W) pour assister les sources et répondre aux besoins électriques du réseau, ce qui signifie que ($P_{net} < 0$, figure V.24) car l'énergie nécessaire est supérieure à l'énergie des sources. Quant au SC, il reste en état de repos (décharge 0 watts) pour assister la batterie lorsqu'elle atteint l'état de charge minimale.

Mode 6 : Dans ce mode, Bien que le SOCbat a atteint son niveau minimale ($SOC_{bat} < SOC_{min}$), comme le montre la Figure V.25, faisant entrer la batterie dans un état de repos (décharge de 0 W), cependant le HESS continue de se décharger car ($P_{net} < 0$, figure V.24) ce qui indique un manque de production d'énergie (la puissance requise est de 9 200 watts, la puissance produite est de 5 700 watts), donc 3 500 watts sont déchargés du supercondensateur pour compenser la puissance nécessaire. Quant au générateur diesel, il reste éteint jusqu'à ce que l'état de charge HESS atteigne son niveau minimale.

Mode 7 : Dans ce mode, comme le montrent les figures V.25 et V.26, le HESS atteint la décharge minimale ($SOC_{min} > SOC_{bat}$ et $SOC_{min} > SOC_{sc}$), et en plus de l'incapacité des sources à fournir de l'énergie au réseau, le générateur diesel est démarrée à remplacer le HESS.

Alors que la Figure V.27 montre les résultats du suivi de la valeur de référence du bus DC (dans notre cas, $V_{dc-ref} = 800$ V) en contrôlant la pile à combustible - qui a participé avec les sources du système hybride d'environ 200 W dans tous les modes, les Figures V.28 et V.29 montrent également les résultats du suivi de la valeur de référence des puissances requises pour

Chapitre V : Simulation et Optimisation de gestion énergétique d'un 2^{ème} SEH proposée basé sur une stratégie d'intelligence artificielle hybride

le batterie et supercondensateur, respectivement, et donc, à travers les résultats obtenus, ils expriment l'efficacité et l'efficacité des contrôleurs proposés pour répondre aux changements survenant dans le système hybride et parvenir à une gestion optimale.

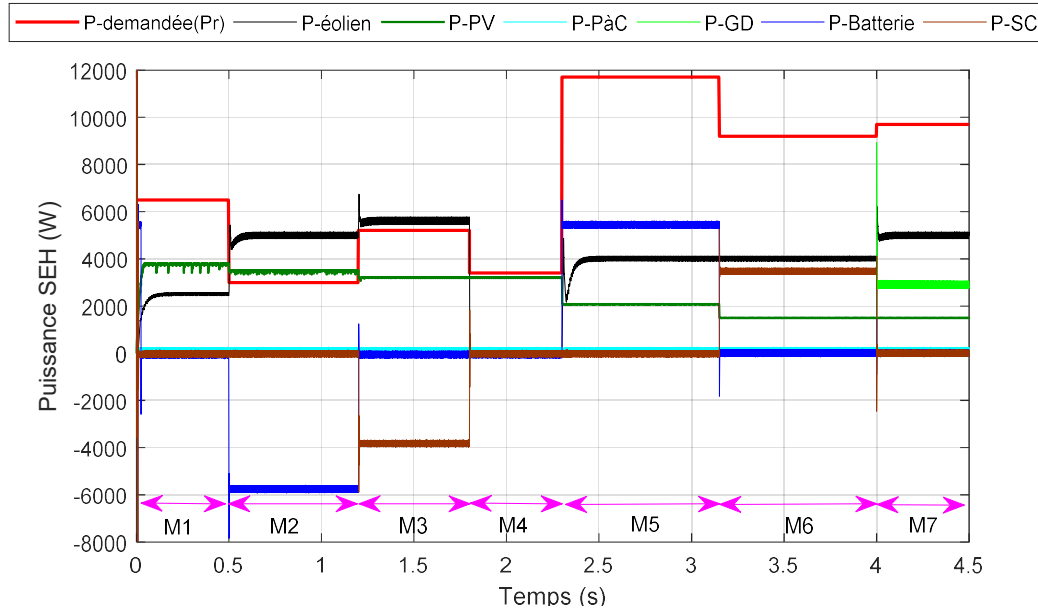


Fig. V.23. Puissances du système énergétique hybride.

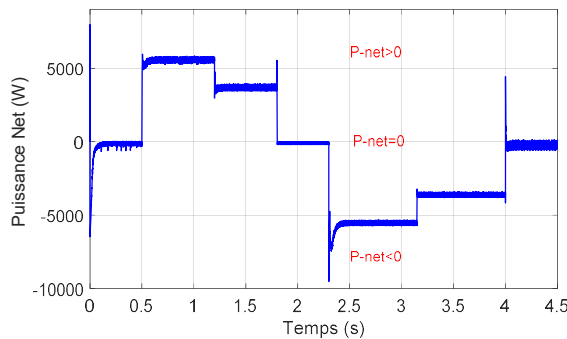


Fig.V.24 Puissances net.

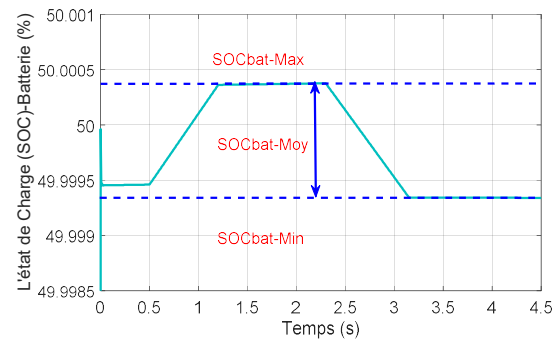


Fig.V.25. État de charge de la batterie.

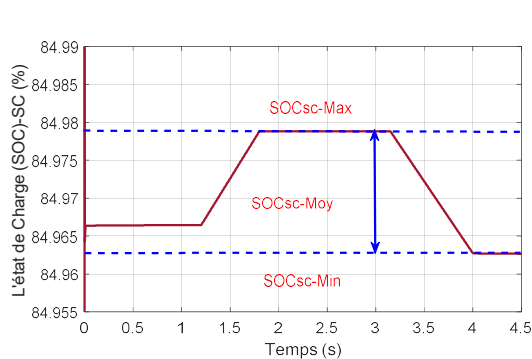


Fig.V.26. État de charge du SC.

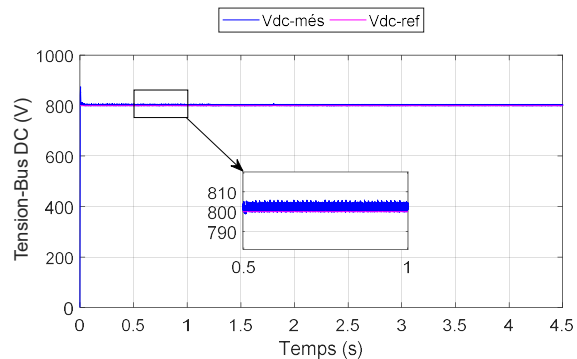


Fig.V.27. Tension de Bus-DC.

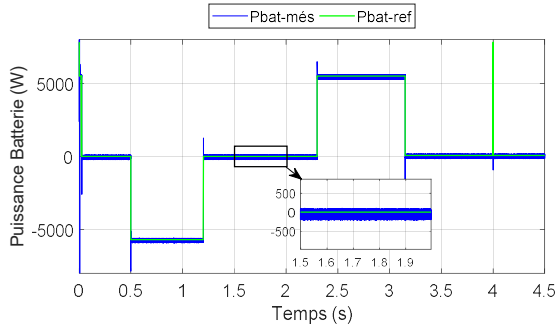


Fig.V.28. Puissance de la batterie.

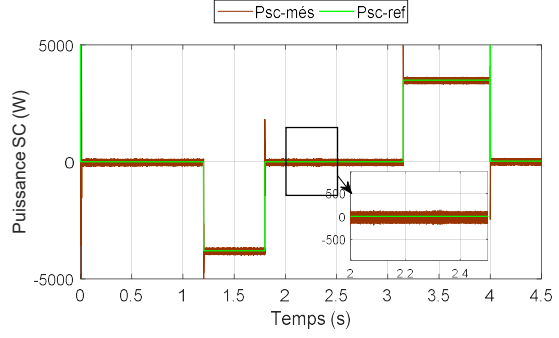


Fig.V.29. Puissance du SC.

V.5.2 Analyse les résultats de la simulation côté réseaux électrique

Du côté du réseau électrique pour contrôler la puissance active et réactive, une technique de contrôle basée sur le contrôle direct de puissance - contrôle de logique floue (DPC-FLC) a été appliquée pour améliorer la qualité de l'énergie circulant dans le réseau électrique fournie par le système hybride.

Les résultats obtenus, comme le montrent les figures V.30 et V.31, montrent l'efficacité du contrôle proposé en réalisant le suivi des références requises pour la puissance active et réactive en plus d'améliorer la qualité des sorties d'énergie électrique qui sont injectées dans le réseau comme le montrent sur les figures V.32 et V.33, où le THD du courant de réseau électrique (phase A) a été réduit au niveau de distorsion le plus bas (il était de 0,34 %), ce qui nous a amené à conclure que la technique de contrôle proposée en termes de distorsion réduite et de THD est plus fiable et efficace.

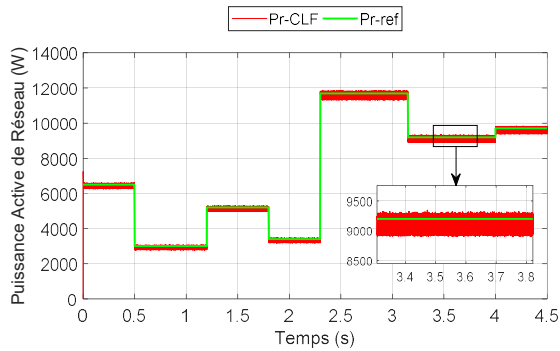


Fig.V.30. Puissance active du RE.

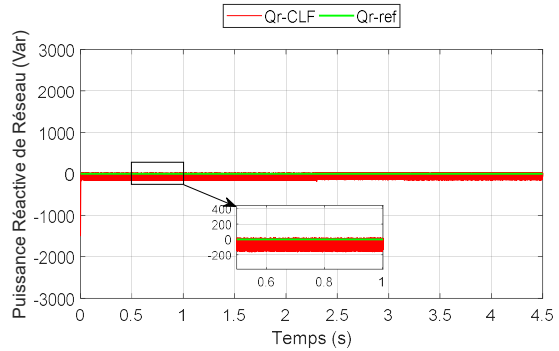


Fig.V.31. Puissance réactive du RE.

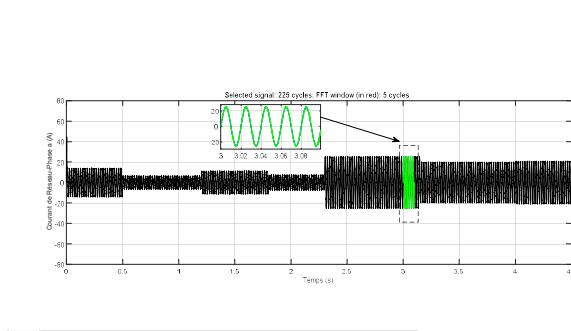


Fig.V.32. Phase a de courant du RE

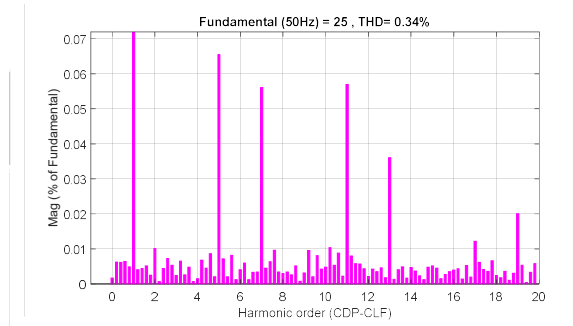


Fig.V.33. THD de la phase a de courant du RE

V.6 Conclusion

Dans ce chapitre, un système énergétique hybride composé d'éolien/PV/PàC/GD/SSEH(batterie/SC) ainsi qu'un système de stockage d'énergie hybride composé de batterie/SC est proposé. Afin d'obtenir une répartition optimale de l'énergie entre les éléments de ce dernier, une stratégie intelligente hybride de gestion énergétique a été appliquée, composée de CLF et CRNA

Après des simulations réalisées sur le système proposé dans des conditions changeantes (climat et demande énergétique) à travers le programme MATLAB Simulink, les résultats obtenus ont montré l'étendue de la supériorité de l'unité de gestion proposée en termes d'efficacité et de performances optimales dans la répartition de l'énergie entre les éléments de cette dernière. . En ce qui concerne le réseau, les résultats ont montré des formes d'onde lisses avec de bons indicateurs de suivi et un faible THD à 0.34%.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

En conclusion, cette thèse affirme que la principale contribution de ce travail réside dans la proposition et le développement de deux stratégies de gestion de l'énergie pour les systèmes énergétiques hybrides connectés au réseau, s'appuyant sur les technologies d'intelligence artificielle, dans le but d'améliorer les performances globales et d'assurer un fonctionnement plus efficace et plus fiable par rapport aux méthodes traditionnelles.

Ces stratégies ont été conçues et mises en œuvre sur deux systèmes hybrides par simulation à l'aide du logiciel Matlab/Simulink, ce qui a permis d'obtenir les résultats suivants :

- La capacité de ces deux stratégies à gérer la nature non linéaire et variable des systèmes hybrides par rapport aux stratégies classiques, de sorte que ces caractéristiques rendent le contrôle traditionnel moins efficace
- Lorsqu'on utilise des stratégies intelligentes, une répartition intelligente de l'énergie est obtenue entre les éléments du système de stockage hybride, par rapport à la stratégie classique qui charge et décharge la même valeur pour ces éléments (batterie/condensateur), comme dans notre cas.
- L'utilisation de stratégies intelligentes permet une réponse plus rapide aux changements du système par rapport à la stratégie classique.

Par conséquent, ces résultats confirment que l'intégration des technologies d'intelligence artificielle dans la gestion de l'énergie représente une solution efficace et prometteuse pour améliorer l'efficacité et la stabilité des systèmes énergétiques hybrides autonome ou connectés au réseau

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

0.5 Références bibliographiques

- [0.1] HELLEL, El Kadi. Fiabilité des systèmes énergétiques multi-sources. 2019. Thèse de doctorat. Université Mouloud Mammeri.
- [0.2] CROCI, Lila. Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs. 2013. Thèse de doctorat. Université de Poitiers.
- [0.3] SAIB, Samia. Contribution à l'optimisation d'un système hybride (PV/éolien) avec stockage d'énergie connecté au réseau électrique. 2018. Thèse de doctorat.
- [0.4] MIDA, Dris. Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Energie Electrique Hybride «Eolien-Photovoltaïque». 2019. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [0.5] HUSSAIN NENGROO, Sarvar, UMAIR ALI, Muhammad, ZAFAR, Amad, et al. An optimized methodology for a hybrid photo-voltaic and energy storage system connected to a low-voltage grid. Electronics, 2019, vol. 8, no 2, p. 176.
- [0.6] EZHILJENEKHA, G. B. et MARSALINEBENO, M. Review of power quality issues in solar and wind energy. Materials Today: Proceedings, 2020, vol. 24, p. 2137-2143.
- [0.7] KRISHNA, K. Shivarama et KUMAR, K. Sathish. A review on hybrid renewable energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, vol. 52, p. 907-916.
- [0.8] LAGHARI, J. A., MOKHLIS, H., BAKAR, A. H. A., et al. Application of computational intelligence techniques for load shedding in power systems: A review. Energy conversion and management, 2013, vol. 75, p. 130-140.

• Références bibliographiques du chapitre I

- [I.1] KAYSAL, Ahmet, KÖROĞLU, Selim, et OĞUZ, Yüksel. Hierarchical energy management system with multiple operation modes for hybrid DC microgrid. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, vol. 141, p. 108149.
- [I.2] VINE, Edward. Breaking down the silos: the integration of energy efficiency, renewable energy, demand response and climate change. Energy efficiency, 2008, vol. 1, no 1, p. 49-63.
- [I.3] HUSSAIN NENGROO, Sarvar, UMAIR ALI, Muhammad, ZAFAR, Amad, et al. An optimized methodology for a hybrid photo-voltaic and energy storage system connected to a low-voltage grid. Electronics, 2019, vol. 8, no 2, p. 176.
- [I.4] KRISHNA, K. Shivarama et KUMAR, K. Sathish. A review on hybrid renewable energy systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, vol. 52, p. 907-916.
- [I.5] <https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/quest-ce-qu'une-energie-fossile>
- [I.6] LAKHDARA, Amira. Contribution à la gestion d'énergie dans un système hybride à énergies renouvelables. 2022. Thèse de doctorat.

- [I.7] SAIB, Samia. Contribution à l'optimisation d'un système hybride (PV/éolien) avec stockage d'énergie connecté au réseau électrique. 2018. Thèse de doctorat.
- [I.8] DAILI, Yacine. Contribution à la commande d'une petite éolienne destinée à l'électrification des sites isolés. 2018. Thèse de doctorat.
- [I.9] <http://ats.energies.free.fr/spip.php?article32>
- [I.10] MIDA, Dris. Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Energie Electrique Hybride «Eolien–Photovoltaïque». 2019. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [I.11] <https://www.alec-grenoble.org/5905-solaire-photovoltaïque.htm#>
- [I.12] https://www.acteurdurable.org/energie-solaire-thermique/#google_vignette
- [I.13] OMAR, FEDDAOUI. Contribution à l'Etude des Systèmes Hybrides de Génération: Application aux Energies Renouvelables. 2014. Mémoire de magister. Université Mohamed Chérif Messaadia de Souk-Ahras.
- [I.14] <https://www.missionenergie.goodplanet.org/fiche/les-energies-hydrauliques-2/>
- [I.15] OUADA, M. Analyse, Conception et optimisation des systèmes de commande relative aux énergies renouvelables. 2017. Thèse de doctorat. Thèse de doctorat, université Badji Mokhtar-Annaba.
- [I.16] <http://ats.energies.free.fr/spip.php?article23>
- [I.17] <https://fr.vecteezy.com/art-vectoriel/1970190-diagramme-montrant-l-energie-geothermique>
- [I.18] <https://www.batirama.com/article/40937-produire-de-l-hydrogene-decarbone-enjeu-industriel-ou-veritable-leurre.html>
- [I.19] <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>
- [I.20] CROS, Sylvain et PINSON, Pierre. Prévision météorologique pour les énergies renouvelables. La Météorologie, 2018, vol. 2018, no 100, p. 67-74.
- [I.21] Imad Eddine, KAID. Détection et localisation des défauts a base de la logique floue appliquée à un système hybride d'énergie renouvelable. 2018. Thèse de doctorat. Université Ziane Achour- Djelfa
- [I.22] Corinne Evangelista, Pascal Lehance, Frédéric Douillet, Pascal Lehance, Gilles Tihon, Patrick Hendrick et all. 2017. Stockage d'énergie : La cigale ou la fourmi ?. Rapport Technique. Wallonie énergie SPW.
- [I.23] KHOUDIRI, Saïd. Commande et Optimisation d'un Système Energétique Hybride (SEH): Application à l'Énergie Renouvelable. 2018. Thèse de doctorat. UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA.

- [I.24] SASSIA, BOUALEM. Optimisation d'un micro réseau intelligent vert EOLIENNE/PV/BATTERIES/GROUPE ELECTROGENE connecté au réseau. 2023. Thèse de doctorat. mohamed khider university biskra.
- [I.25] GASSAB, Samir. Gestion d'énergie d'une centrale à énergie renouvelable hybride dédiée à l'alimentation d'un site isolé. 2019. Thèse de doctorat.
- [I.26] LABOURET, Anne et VILLOZ, Michel. Energie solaire photovoltaïque. Paris : Dunod, 2006.
- [I.27] KELLOGG, William D., NEHRIR, M. Hashem, VENKATARAMANAN, Giri, et al. Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid wind/PV systems. IEEE Transactions on energy conversion, 1998, vol. 13, Issue: 1, p. 70-75.
- [I.28] HANENE, Ben Cheikh Le Hocine. Modélisation nanothermique des systèmes Thermo/Photovoltaïques Applications aux collecteurs hybrides PVT. 2015. Thèse de doctorat. Thèse.
- [I.29] ABDELLI, Abdenour. Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive. 2007. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT.
- [I.30] MULTON, Bernard, GERGAUD, Olivier, AHMED, Hamid Ben, et al. Etat de l'art des aérogénérateurs. L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables, 2002, p. pp. 97-154.
- [I.31] REZK, Hegazy, NASSEF, Ahmed M., ABDELKAREEM, Mohammad Ali, et al. Comparison among various energy management strategies for reducing hydrogen consumption in a hybrid fuel cell/supercapacitor/battery system. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, vol. 46, no 8, p. 6110-6126.
- [I.32] A. KAMEL, Ahmed, REZK, Hegazy, SHEHATA, Nabila, et al. Energy management of a DC microgrid composed of photovoltaic/fuel cell/battery/supercapacitor systems. Batteries, 2019, vol. 5, no 3, p. 63.
- [I.33] BOUTHAINA, Madaci. Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multi-systèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs. Pour l'obtention du diplôme de doctorat 3^{ème} cycle en Electrotechnique, Université des Frères Mentouri Constantine, 2018.
- [I.34] OUBBATI Brahim Khalil , Control and Energy management of renewable energy system associated a storage system.2021. Thèse de doctorat. Université Amar Telidji-Laghouat
- [I.35] http://physchileborgne.free.fr/1.musee_accumulateurs_2021.php
- [I.36] https://img.directindustry.fr/images_di/photo-g/234855-16560990.webp
- [I.37] B. Azoui. Energies renouvelables/stockage- Chapitre : Les systèmes de stockage d'énergie. 2020/2021. Notes de cours.
- [I.38] https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/album_images/volant-inertie_zoom.jpg

[I.39] HANNAN, M. A., HOQUE, Md Murshadul, MOHAMED, Azah, et al. Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, vol. 69, p. 771-789.

[I.40] VECHIU, Ionel. Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome. 2005. Thèse de doctorat. Université du Havre.

[I.41] BAKIR, Hale, MERABET, Adel, et KIEHBADROUDINEZHAD, Mohammad ali. Optimized control of a hybrid water pumping system integrated with solar photovoltaic and battery storage: Towards sustainable and green water-power supply. *Energies*, 2023, vol. 16, no 13, p. 5209.

[I.42] ATTIK Nadjah. Contribution à la modélisation et au contrôle des systèmes à énergies renouvelable, application sur un système hybride PV/Éolien/système de stockage. 2023. Thèse de doctorat. Université ferhat abbas - Setif1

[I.43] WANG, Peng, LIU, Xiong, JIN, Chi, et al. A hybrid AC/DC micro-grid architecture, operation and control. In : 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. IEEE, 2011. p. 1-8.

[I.44] FACCIO, Maurizio, GAMBERI, Mauro, BORTOLINI, Marco, et al. State-of-art review of the optimization methods to design the configuration of hybrid renewable energy systems (HRESs). *Frontiers in Energy*, 2018, vol. 12, no 4, p. 591-622.

[I.45] AHMED, Idda, SAID, Bentouba, et HASSEN, Sellami Mohamed. ENERGY TRANSITION IN ALGERIA'S DESERT: CURRENT STATE AND FUTURE PERSPECTIVES. *Renewable and Sustainable Energy: An International Journal (RSEJ)*, 2019, vol. 1, no 1, p. 19-32.

[I.46] HAMITI Dalila et BOUZADI-DAOUD Sultana. Les énergies renouvelables en Algérie : aspirations et obstacles. *مجلة بحوث الاقتصاد والمناجمنت* (المجلد -02 العدد 01 / جوان 2021), vol. 2, no 1, p. 187-214

[I.47] تقرير تقني للأمم المتحدة : المبادرة الإقليمية لتعزيز تطبيقات الطاقة المتجددة الصغيرة السعة في المناطق الريفية في المنطقة العربية. 2020.

[I.48] م. أيمن إدريس, د. جبر الرمحين, د. محمد منذر القادري. التصميم الأمثل لنظام توليد طاقة هجين لتأمين تغذية موثوق بها لحمل كهربائي في منطقة نائية. *مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية المجلد الثامن والعشرون- العدد الثاني*. p.81-91.2

• Références bibliographiques du chapitre II

[II.1] MADACI, Bouthaina, CHENNI, Rachid, KURT, Erol, et al. Comparison of two maximum power point tracking techniques applied to a photovoltaic system. In : Third European Conference on Renewable Energy Systems (ECRES), Antalya, Turkey. 2015.

- [II.2] Sumathi, S., Kumar, L. A., & Surekha, P. Solar PV and wind energy conversion systems: an introduction to theory, modeling with MATLAB/SIMULINK, and the role of soft computing techniques (Vol. 1). Switzerland: Springer.2015. p.72,115.
- [II.3] VILLALVA, Marcelo Gradella, GAZOLI, Jonas Rafael, et RUPPERT FILHO, Ernesto. Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays. In : 2009 Brazilian power electronics conference. IEEE, 2009. p. 1244-1254.
- [II.4] MIDA, Dris. Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Energie Electrique Hybride «Eolien-Photovoltaïque». 2019. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [II.5] VASEGHI, Babak. Contribution a l'étude des machines electriques en presence de default entre-spires.2009. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine.
- [II.6] EL AIMANI, Salma. Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension.2004. Thèse de doctorat. Université des sciences et technologies de LILLE (USTL).
- [II.7] NASIRI, M., MILIMONFARED, J., et FATHI, S. H. Modeling, analysis and comparison of TSR and OTC methods for MPPT and power smoothing in permanent magnet synchronous generator-based wind turbines. Energy Conversion and Management, 2014, vol. 86, p. 892-900.
- [II.8] BILLEL, Meghni. Contribution à l'amélioration des performances d'une chaîne énergétique éolienne. 2015. Thèse de doctorat. These Doctorat, université Badji Mokhtar Annaba.
- [II.9] benlahbib boualam. Supervision d'un système hybride éolien-Photovoltaïque connecté au réseau électrique.2019. Thèse de doctorat. Université des sciences de la technologie houari boumediene.
- [II.10] ELHADJ, BOUNADJA. MODELISATION DES MACHINES ELECTRIQUES (Cours et Exercices). en Machines électriques selon le programme officiel, université de Hassiba ben bouali-chlef, 2018, vol. 2019.
- [II.11] KENDOULI, Fairouz. Centrale éolienne et qualité de l'énergie électrique. Thèse doctorat, 2012.
- [II.12] ABDESSEMED, Rachid. Modélisation et simulation des machines électriques: électrotechnique. ellipses, 2011. Livre Technosup. ISBN 978-2-7298-6495-8.
- [II.13] ANER, Mohamed. Improved MPPT dynamics for starting and power extraction of a small wind turbine employing a PMSG and a VSMC. 2014. Thèse de doctorat. l'université de Calgary. Alberta.
- [II.14] TESFAHUNEGN, Samson Gebre. Fuel cell assisted photovoltaic power systems. Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2012.
- [II.15] MOTAPON, Souleman Njoya, TREMBLAY, Olivier, et DESSAINT, Louis-A. Development of a generic fuel cell model: application to a fuel cell vehicle simulation. International Journal of Power Electronics, 2012, vol. 4, no 6, p. 505-522.

- [II.16] Souleman Njoya M., Tremblay, Olivier., et Dessaint, Louis-A. A generic fuel cell model for the simulation of fuel cell vehicles. In : 2009 IEEE vehicle power and propulsion conference. IEEE, 2009. p. 1722-1729.
- [II.17] MOHAMED, Mahmoud M., EL ZOGHBY, Helmy M., SHARAF, Soliman M., et al. Optimal virtual synchronous generator control of battery/supercapacitor hybrid energy storage system for frequency response enhancement of photovoltaic/diesel microgrid. *Journal of Energy Storage*, 2022, vol. 51, p. 104317.
- [II.18] MAAMIR, Madiha. Techniques de supervision d'énergie d'un système d'entraînement Electrique hybride. 2020. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [II.19] SARRIAS, Raúl, FERNÁNDEZ, Luis M., GARCÍA, Carlos A., et al. Coordinate operation of power sources in a doubly-fed induction generator wind turbine/battery hybrid power system. *Journal of Power Sources*, 2012, vol. 205, p. 354-366.
- [II.20] MERABET, Adel, AHMED, Khandker Tawfique, IBRAHIM, Hussein, et al. Energy management and control system for laboratory scale microgrid based wind-PV-battery. *IEEE transactions on sustainable energy*, 2016, vol. 8, no 1, p. 145-154.
- [II.21] REZK, Hegazy, NASSEF, Ahmed M., ABDELKAREEM, Mohammad Ali, et al. Comparison among various energy management strategies for reducing hydrogen consumption in a hybrid fuel cell/supercapacitor/battery system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, vol. 46, no 8, p. 6110-6126.
- [II.22] KANNAYERAM, G., PRAKASH, N. B., et MUNIRAJ, R. Intelligent hybrid controller for power flow management of PV/battery/FC/SC system in smart grid applications. *International journal of hydrogen energy*, 2020, vol. 45, no 41, p. 21779-21795.
- [II.23] ABOUDA, Salim. Contribution à la commande des systemes photovoltaïques: application aux systemes de pompage. 2015. Thèse de doctorat. Universite de Reims Champagne-Ardenne et de l' Université de Sfax.
- [II.24] OUCHEN, Sabir. Contribution a la commande directe de puissance dediee au filtrage actif, associe a une source photovoltaïque. 2017. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.
- [II.25] MEGHNI, Billel, DIB, Djalel, et AZAR, Ahmad Taher. A second-order sliding mode and fuzzy logic control to optimal energy management in wind turbine with battery storage. *Neural Computing and Applications*, 2017, vol. 28, no 6, p. 1417-1434.
- [II.26] F.Bouchafaa. ELECTRONIQUE DE PUISSANCE- LES INTERRUPTEURS SEMI-CONDUCTEURS.2009/2010. Notes de cours. Université des Sciences et de Technologie Houari Boumediene.
- [II.27] BOUTHAINA, Madaci. Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multi-systèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs. Pour l'obtention du diplôme de doctorat 3^{ème} cycle en Electrotechnique, Université des Frères Mentouri Constantine, 2018.
- [II.28] CHINCHILLA, Monica, ARNALTES, Santiago, et BURGOS, Juan Carlos. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid. *IEEE Transactions on energy conversion*, 2006, vol. 21, no 1, p. 130-135.

• **Références bibliographiques du chapitre III**

[III.1] ABDELHALIM, Borni. Etude et optimisation d'un multi système hybride de conversion d'énergie électrique. 2015. Thèse Doctorat en sciences en électrotechnique. Université Constantine 1.

[III.2] HAQUE, Md E., NEGNEVITSKY, Michael, et MUTTAQI, Kashem M. A novel control strategy for a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator. In : 2008 IEEE industry applications society annual meeting. IEEE, 2008. p. 1-8.

[III.3] DAHBI, Abdeldjalil, HACHEMI, Mabrouk, NAIT-SAID, Nasreddine, et al. Realization and control of a wind turbine connected to the grid by using PMSG. Energy Conversion and Management, 2014, vol. 84, p. 346-353.

[III.4] BILLEL, Meghni. Contribution à l'amélioration des performances d'une chaîne énergétique éolienne. 2015. Thèse de doctorat. These Doctorat, université Badji Mokhtar Annaba.

[III.5] BENLAHBIB, Boualam, BOUARROUDJ, Nouredine, MEKHILEF, Saad, et al. Power management and DC link voltage regulation in renewable energy system. In : 2019 International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE). IEEE, 2019. p. 1-6.

[III.6] AZZOUZ, Tamaarat. Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA. 2015. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.

[III.7] BENLAHBIB, Boualam, BOUARROUDJ, Nouredine, MEKHILEF, Saad, et al. Experimental investigation of power management and control of a PV/wind/fuel cell/battery hybrid energy system microgrid. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, vol. 45, no 53, p. 29110-29122.

[III.8] ABBES, Hanen, ABID, Hafedh, LOUKIL, Kais, et al. Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque. Revue des Energies Renouvelables, 2014, vol. 17, no 3, p. 435-445.

[III.9] MIDA, Dris. Contribution à la Modélisation d'un Système de Production d'Energie Electrique Hybride «Eolien-Photovoltaïque». 2019. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider-Biskra.

[III.10] CRISTALDI, Loredana, FAIFER, Marco, ROSSI, Marco, et al. MPPT definition and validation: A new model-based approach. In : 2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. IEEE, 2012. p. 594-599.

[III.11] KANDEMIR, Ekrem, CETIN, Numan S., et BOREKCI, Selim. A comprehensive overview of maximum power extraction methods for PV systems. Renewable and sustainable energy reviews, 2017, vol. 78, p. 93-112.

[III.12] S. Sumathi, L. Ashok Kumar, and P. Surekha, "Solar PV and Wind Energy Conversion Systems," Book, Switzerland: Springer International Publishing, January 2015, p.72.

- [III.13] EL GOURI, R., BEN BRAHIM, M., et HLOU, L. A COMPARATIVE STUDY OF MPPT TECHNICAL BASED ON FUZZY LOGIC AND PERTURB OBSERVE ALGORITHMS FOR PHOTOVOLTAIC SYSTEMS. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 2013, vol. 58, no 2, pp.336-346.
- [III.14] YILMAZ, Unal, KIRCAY, Ali, et BOREKCI, Selim. PV system fuzzy logic MPPT method and PI control as a charge controller. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 81, p. 994-1001.
- [III.15] SALAM, Zainal, AHMED, Jubaer, et MERUGU, Benny S. The application of soft computing methods for MPPT of PV system: A technological and status review. *Applied energy*, 2013, vol. 107, p. 135-148.
- [III.16] TAN, Kelvin et ISLAM, Syed. Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors. *IEEE transactions on energy conversion*, 2004, vol. 19, no 2, p. 392-399.
- [III.17] CHINCHILLA, Monica, ARNALTES, Santiago, et BURGOS, Juan Carlos. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid. *IEEE Transactions on energy conversion*, 2006, vol. 21, no 1, p. 130-135.
- [III.18] MEGHNI, Billel, SAADOUN, Abdallah, DIB, Djalel, et al. Effective MPPT technique and robust power control of the PMSG wind turbine. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 2015, vol. 10, no 6, p. 619-627.
- [III.19] PENA, Ruben, CARDENAS, Roberto, PROBOSTE, Jose, et al. Sensorless control of doubly-fed induction generators using a rotor-current-based MRAS observer. *IEEE Transactions on Industrial electronics*, 2008, vol. 55, no 1, p. 330-339.
- [III.20] TAPIA, Gerardo, TAPIA, Arantxa, et OSTOLAZA, J. Xabier. Proportional–integral regulator-based approach to wind farm reactive power management for secondary voltage control. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, vol. 22, no 2, p. 488-498.
- [III.21] MUNTEANU, Iulian, BACHA, Seddik, BRATCU, Antoneta Iuliana, et al. Energy-reliability optimization of wind energy conversion systems by sliding mode control. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, vol. 23, no 3, p. 975-985.
- [III.22] VALENCIAGA, Fernando et PULESTON, Paul F. Variable structure control of a wind energy conversion system based on a brushless doubly fed reluctance generator. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2007, vol. 22, no 2, p. 499-506.
- [III.23] VIJAYAKUMARI, A., DEVARAJAN, A. T., et DEVARAJAN, N. Decoupled control of grid connected inverter with dynamic online grid impedance measurements for micro grid applications. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, vol. 68, p. 1-14.
- [III.24] MEGHNI, Billel, OUADA, Mehdi, et SAAD, Salah. A novel improved variable-step-size P&O MPPT method and effective supervisory controller to extend optimal energy management in hybrid wind turbine. *Electrical Engineering*, 2020, vol. 102, no 2, p. 763-778.

[III.25] HACHANA, Oussama, MEGHNI, Billel, BENAMOR, Afaf, et al. Efficient PMSG wind turbine with energy storage system control based shuffled complex evolution optimizer. *Isa Transactions*, 2022, vol. 131, p. 377-396.

• **Références bibliographiques du chapitre IV**

[IV.1] BHANDARI, Binayak, LEE, Kyung-Tae, LEE, Gil-Yong, et al. Optimization of hybrid renewable energy power systems: A review. *International journal of precision engineering and manufacturing-green technology*, 2015, vol. 2, no 1, p. 99-112.

[IV.2] VALENTE, Luiz Carlos Guedes et DE ALMEIDA, Silvio Carlos Aníbal. Economic analysis of a diesel/photovoltaic hybrid system for decentralized power generation in northern Brazil. *Energy*, 1998, vol. 23, no 4, p. 317-323.

[IV.3] YANG, H. X., LU, Lin, et BURNETT, J. Weather data and probability analysis of hybrid photovoltaic–wind power generation systems in Hong Kong. *Renewable energy*, 2003, vol. 28, no 11, p. 1813-1824.

[IV.4] BAMBANG, Riyanto Trilaksono, ROHMAN, Arief Syaichu, DRONKERS, Cees Jan, et al. Energy management of fuel cell/battery/supercapacitor hybrid power sources using model predictive control. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2014, vol. 10, no 4, p. 1992-2002.

[IV.5] AGGARWAL, Shivangi, ALAM, Mohd, et KUMAR, Jagdish. Sliding mode control scheme for hybrid energy storage technologies in a DC microgrid. In : 2022 International Mobile and Embedded Technology Conference (MECON). IEEE, 2022. p. 486-489.

[IV.6] ERDİNÇ, Ozan, ELMA, Onur, UZUNOĞLU, Mehmet, et al. Experimental performance assessment of an online energy management strategy for varying renewable power production suppression. *international journal of hydrogen energy*, 2012, vol. 37, no 6, p. 4737-4748.

[IV.7] CHARROUF, Omar, BETKA, Achour, ABDEDDAIM, Sabrina, et al. Artificial Neural Network power manager for hybrid PV-wind desalination system. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2020, vol. 167, p. 443-460.

[IV.8] GABER, Mohab, EL-BANNA, S. H., EL-DABAH, Mahmoud, et al. Intelligent Energy Management System for an all-electric ship based on adaptive neuro-fuzzy inference system. *Energy Reports*, 2021, vol. 7, p. 7989-7998.

[IV.9] BOUTHIBA, Youssef, MEGHNI, Billel, TALEB, Rachid, et al. Power Management Optimization of HES Connected to the Grid-Based IEMS. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2023, Vol.13, Issue 10.

[IV.10] KEEK, Joe Siang, LOH, Ser Lee, et CHONG, Shin Horng. Fractional-order proportional-integral (FOPI) controller for mecanum-wheeled robot (MWR) in path-tracking control. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology (IJMET)*, 2018, vol. 9, no 11, p. 325-337.

[IV.11] BENLAHBIB, Boualam, BOUCHAFAA, Farid, BOUARROUDJ, Noureddine, et al. Fractional order PID controller for DC link voltage regulation in hybrid system including wind turbine-and battery packs-experimental validation. *International Journal of Power Electronics*, 2019, vol. 10, no 3, p. 289-313.

[IV.12]TAHER, Seyed Abbas, FINI, Masoud Hajiakbari, et ALIABADI, Saber Falahati. Fractional order PID controller design for LFC in electric power systems using imperialist competitive algorithm. Ain Shams Engineering Journal, 2014, vol. 5, no 1, p. 121-135.

[IV.13] MOHAMED, Ahmed T., MAHMOUD, Mahmoud F., SWIEF, R. A., et al. Optimal fractional-order PI with DC-DC converter and PV system. Ain shams engineering journal, 2021, vol. 12, no 2, p. 1895-1906.

[IV.14] CHIRANJEEVI, Tirumalasetty, BABU, Naladi Ram, YADAV, Ankit, et al. Control of electric machines using flower pollination algorithm based fractional order PID controller. Global Transitions Proceedings, 2021, vol. 2, no 2, p. 227-232.

Références bibliographiques du chapitre V

[V.1] BOUTHIBA, Youssouf, MEGHNI, Billel, CHERIFI, Abdellatif, et al. Optimal Management of a Grid-Connected Hybrid Energy System Using FLC-ANN Hybrid Technique. Journal Européen des Systèmes Automatisés, 2024, vol. 57, no 3.

[V.2] KRENKER, Andrej, BEŠTER, Janez, et KOS, Andrej. Introduction to the artificial neural networks. Artificial Neural Networks: Methodological Advances and Biomedical Applications. InTech, 2011, p. 1-18.

ANNEXE

ANNEXE

1. Paramètres de GSAP

- Puissance nominale $P_e = 6 \text{ kw}$
- Résistance statorique $R_s = 0.4\Omega$
- Inductance direct statorique $L_d = 0.0084 \text{ H}$
- Inductance quadrature statorique $L_q = 0.0084 \text{ H}$
- Flux d'aimant $\phi = 0.4 \text{ wb}$
- Nombre de pair de pole $n_p = 12$
- Inertie Totale $J_t = 0.089 \text{ kg.m}^2$
- Force de frottement $f = 0.005 \text{ N.m}$

2. Paramètres de la turbine éolienne

- Rotor de la turbine $R_t = 2 \text{ m}$
- Air density $\rho = 1.225 \text{ kg.m}^3$
- L'angle de calage $\beta = 0^\circ$
- La vitesse spécifique optimale $\lambda_{\text{opti}} = 8.1$
- Coefficient de puissance maximale $C_{p_{\text{max}}} = 0.48$

3. Paramètres d'un système photovoltaïque (module -KC200GT)

- Puissance Maximale (P_{max}) = 200.143 W
- Courant de PPM (I_{mp}) = 7.61 A
- Tension de PPM (V_{mp}) = 26.3 V
- Courant généré par la lumière (I_{pv}) = 8.214 A
- Courant de court-circuit (I_{sc}) = 8.21 A
- Tension de circuit ouvert (V_{oc}) = 32.9 V
- Résistance parallèle (R_p) = 415.405 Ω
- Résistance série (R_s) = 0.221 Ω
- Nombre de la cellule en série (N_s) = 54

4. Pile à combustible (PEMFC)

- Puissance= 1.26 KW
- $V_{dc}=24\text{v}$

5. Moteur Synchrone d'un Générateur diésel

- Puissance= 8.1 kVA
- Tension= 400v

- Fréquence= 50Hz

6. Batterie**1^{ère} système**

- Capacité= 100Ah

2^{ème} système

- Capacité= 300Ah

7. Super-condensateur

- Capacité =99.5 F

8. Bus DC

- $C_{dc}=0.009\text{F}$
- $V-C_{dc_initiale}= 600\text{V}$ (1^{ère} système)
- $V-C_{dc_initiale}= 650\text{V}$ (2^{ème} système)
- $V_{dc}=800\text{V}$

9. Réseaux électrique

- Tension de phase = 380v
- Fréquence = 50Hz
- Résistance (R_r) = 0.02 Ω
- Inductance (L_r) = 0.00005H

10. Filtre RL

- Résistance (R_f) = 0.001 Ω
- Inductance (L_f)=0.005H

Production Scientifique

Publications :

- BOUTHIBA, Youssef, MEGHNI, Billel, CHERIFI, Abdellatif, et al. Optimal Management of a Grid-Connected Hybrid Energy System Using FLC-ANN Hybrid Technique. Journal Européen des Systèmes Automatisés, 2024, vol. 57, no 3.
- BOUTHIBA, Youssef, MEGHNI, Billel, TALEB, Rachid, et al. Power Management Optimization of HES Connected to the Grid-Based IEMS. International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 2023, Vol.13, Issue 10.

Conférences:

- BOUTHIBA, Y., MEGHNI, B., BENLAHBIB, B., et al. Power Management Strategy of a Hybrid PV-Battery System Connected to the Grid. In : International Conference on Artificial Intelligence in Renewable Energetic Systems. Cham : Springer International Publishing, 2022. p. 672-681.
- BOUTHIBA, Y., MEGHNI, B., BENLAHBIB, B., OUADA, M. Energy flow management for a grid-connected wind-battery hybrid system, First International Conference on Water & Environment, Mascara 25 & 26th September 2022.