

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider - Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département: Génie Electrique
Réf :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم : الهندسة الكهربائية
المرجع :

Thèse présentée en vue de l'obtention

Du Diplôme de

Doctorat 3ème cycle

Spécialité (Option) : ENERGIES RENOUVELABLES

Préparé au laboratoire de Génie Electrique LGEB de Biskra

**Optimisation d'un micro réseau intelligent vert
EOLIENNE/PV/BATTERIES/GROUPE ELECTROGENE
connecté au réseau**

Présentée par :

BOUALEM SASSIA

Soutenu publiquement le :

11 Mai 2023

Devant le jury composé de

Dr. M. SAHRAOUI	Professeur	Université de Biskra	Président
Dr. O. KRAA	Maitre de Conférence A	Université de Biskra	Directeur de thèse
Dr. M. BENMEDDOUR	Maitre de Conférence A	Université de Biskra	Co-directeur de thèse
Dr. R. SAADI	Maitre de Conférence A	Université de Biskra	Examineur
Dr. I. TEGANI	Maitre de Conférence A	ESTI d'Annaba	Examineur

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED KHIDER-BISKRA



— FACULTÉ DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE —
— DÉPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE —

THÈSE

présentée pour obtenir le diplôme de

DOCTEUR 3^{ème} CYCLE GENIE ELECTRIQUE

OPTION : ENERGIES RENOUVELABLES

Par : **BOUALEM SASSIA**

Optimisation d'un micro réseau intelligent vert EOLIENNE/PV/BATTERIES/GROUPE ELECTROGENE connecté au réseau

Soutenue le 11 /05/2023, devant le jury composé de :

Président : Dr. SAHRAOUI MOHAMED, Professeur, Univ. Biskra.

Directeur de thèse : Dr. KRAA OKBA, Maître de Conférence A, Univ. Biskra.

Co-directeur de thèse : Dr. BENMEDDOUR MOSTEFA, Maître de Conférence A, Univ. Biskra.

Examineur : Dr. SAADI RAMZI, Maître de Conférence A, Univ. Biskra.

Examineur : Dr. TEGANI ILYES, Maître de Conférence A, ESTI. Annaba.

BISKRA, ALGERIE. 2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

(وَقُلْ رَبِّ زِدْنِي عِلْمًا)

صدق الله العلي العظيم

سورة طه: من الآية 114

*"Celui qui ne remercie pas les
gens ne remercie pas Allâh "*

Remerciements

Premièrement et avant tout, je remercie Allah le tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.

Les travaux présentés dans cette thèse ont été effectués au sein du Laboratoire de Génie Electrique de Biskra (**LGEB**), faculté des sciences et technologie de l'Université Mohamed Khider, Biskra, sous la direction du **Pr. Zouzou Salah Eddine** , à qui je présente l'expression de ma profonde gratitude pour tous les encouragements qu'il m'a prodigué pendant toute la durée de ce travail.

Je voudrais remercier grandement mon directeur de thèse, **Dr. Okba KRAA** pour m'avoir encadré durant cette thèse.

Je tiens à remercier très chaleureusement mon Co-directeur de thèse ,**Dr. Mostefa BEN-MEDDOUR** , avec qui j'ai eu tant de plaisir à travailler avec au cours de mes recherches, de m'avoir supervisé durant la réalisation de ce travail.

Mes sincères remerciements a messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en participant au jugement de ce travail.

Je tiens également à adresser mes remerciements à mes collègues et amies en particulier **Dr. Madiha MAAMIR** , **Dr.Hakima CHERIF**, **Dr.Hania ABOUB**.

Un grand merci à tous.

BOUALEM Sassia

Dedicace

Je dédie ce modeste travail

À la mémoire de mon père.

À la mémoire de ma chère grand-mère.

À ma chère mère

En témoignage de mon éternelle reconnaissance ,que dieu vous protège et vous prête
bonne santé et longue vie.

À mes soeurs et mon frère .

À tous mes neveux et nièces

Abstract

In this study, an improved energy management controller (EMC) is proposed for a hybrid system (HS), which consists of two renewable energy sources, a diesel generator, and energy storage system, batteries, in grid connected and standalone mode, The main contributions of this study are as follows : first, we developed an intelligent supervisory controller based on a recurrent neural network, namely Elman neural network (ENN), to alleviate the complexity and requirement of a rule-based structure or prior mathematical modeling. Second, we designed an energy management strategy (EMS) using Stateflow approach to extract the training and testing datasets for construction of the ENN controller. Various control strategies were applied to ensure the stability and reliability of the HS can be summarized as follows : DC bus control was achieved using Fuzzy logic control (FLC), which was applied to control the active and reactive grid powers. Second, the MPC was used to control the bidirectional converter in the battery to control the charge and discharge operations. the MPPT (Maximum power point)of the wind turbine has been achieved based on sliding mode control.The obtained results demonstrate that the proposed strategy offers the most advanced modeling features for EMCs to achieve high reliability and to minimize the computational complexity compared with classical strategies. The EMS proposed was compared with a multilayer perceptron neural network (MLPNN) strategy to evaluate their performances. The results indicated that the ENN controller was more accurate than the MLPNN. Thus, the strategy proposed is a suitable option to efficient energy management control based on a predictive model, as it is not very complex and does not require a high processing machine.

Keywords :

Energy management strategy ;Elman neural network ;Multilayer perceptron neural network ; Stateflow ;Grid-connected ; Fuzzy logic ; Model predictive control.

Résumé

Dans cette étude, un contrôleur de gestion de l'énergie (SGE) amélioré est proposé pour un système d'énergie hybride (SEH), d'un système d'énergie hybride, qui est constitué de deux sources d'énergie renouvelable, d'un générateur diesel, et d'un système de stockage, batteries en mode connecté au réseau et en mode charge isolée. Nos principales contributions dans cette étude sont les suivantes : premièrement, nous avons développé un système de supervision , en utilisant les réseaux de neurones récurrent Elman (ENN), pour atténuer la complexité et l'exigence d'une structure basée sur des règles ou d'une modélisation mathématique préalable. Deuxièmement, nous avons conçu une stratégie de gestion de l'énergie (SGE) en utilisant l'approche le simulateur Stateflow pour extraire les ensembles des données d'apprentissage et de test du contrôleur ENN. Diverses techniques de commande ont été appliquées pour assurer la stabilité et la fiabilité du SEH qui peuvent être résumées comme suit : La commande du bus continu a été réalisé à l'aide de logique floue, ce dernier a été appliqué pour contrôler les puissances active et réactive du réseau. Ensuite, la commande prédictive (MPC) a été utilisé pour contrôler le courant de la batterie et le convertisseur bidirectionnel afin de contrôler les opérations de charge et de décharge. L'MPPT par mode glissant a été utilisé pour extraire la puissance maximale de l'éolienne. Le contrôleur prédictif utilisé pour générer le courant de référence pour l'éolienne en régulant la vitesse mécanique à la valeur de référence. Les résultats obtenus démontrent que la stratégie proposée offre les fonctionnalités de modélisation les plus avancées pour les SGE afin d'atteindre une fiabilité élevée et de minimiser la complexité de calcul. Par rapport aux stratégies classiques. L'SGE propose est comparé à une stratégie de réseau de neurones perceptrons multicouches (MLP) pour évaluer leurs performances. Les résultats ont montré que le contrôleur ENN est plus précis que le MLPNN. Ainsi, la stratégie proposée est une solution appropriée pour un contrôle efficace de la gestion de l'énergie basée sur un modèle prédictif, car elle n'est pas très complexe et ne nécessite pas une machine de traitement élevée.

Mots clés stratégie de gestion de l'énergie ;réseau de neurones Elman ; réseau de neurones perceptron multicouche ; Stateflow ;système connecté au réseau ;logique floue.

ملخص

تتناول هذه الرسالة تصميم مسير طاقة لنظام هجين يتكون من مصدرين للطاقة المتجددة ، ومولد ديزل ، ونظام تخزين ، وبطاريات في وضع متصل بالشبكة و في وضع التحميل المعزول. مساهمات هذه الدراسة هي كما يلي: أولاً ، قمنا بتطوير وحدة تحكم إشرافية ذكية تعتمد على شبكة المان Elman العصبية المتكررة (ENN) ، للتخفيف من تعقيد ومتطلبات بنية قائمة على القواعد أو نمذجة رياضية سابقة. ثانياً ، قمنا بتصميم إستراتيجية إدارة الطاقة باستخدام النهج القائم على Stateflow لاستخراج مجموعات بيانات التدريب والاختبار لبناء وحدة تحكم ENN. تم تطبيق تقنيات تحكم مختلفة لضمان استقرار وموثوقية النظام الهجين يمكن تلخيصها على النحو التالي:

تم تحقيق التحكم في ناقل التيار المستمر باستخدام وحدة تحكم ضبابية ، وتم تطبيق الأخير للتحكم في القوى النشطة والمتفاعلة للشبكة. ثانياً ، تم استخدام التحكم التنبئي (MPC) للتحكم في تيار البطارية والمحول ثنائي الاتجاه للتحكم في عمليات الشحن والتفريغ. تم استخدام MPPT لاستخراج الطاقة القصوى من توربينات الرياح. تستخدم وحدة التحكم الانزلاقي (mode glissant) لتوليد عزم دوران مرجعي لتوربينات الرياح من خلال تنظيم السرعة الميكانيكية إلى القيمة المرجعية. توضح النتائج التي تم الحصول عليها أن الاستراتيجية المقترحة تقدم ميزات النمذجة الأكثر تقدماً لنظم الإدارة البيئية لتحقيق موثوقية عالية وتقليل التعقيد الحسابي. مقارنة بالاستراتيجيات التقليدية. مقارنة مسير الطاقة المقترحة بإستراتيجية الشبكة العصبية متعددة الطبقات (MLP) لتقييم أدائها. أشارت النتائج إلى أن وحدة تحكم ENN كانت أكثر دقة من MLPNN. وبالتالي ، تعد الإستراتيجية المقترحة خياراً مناسباً للتحكم الفعال في إدارة الطاقة استناداً إلى نموذج تنبؤي ، نظراً لأنها ليست معقدة للغاية ولا تتطلب معالجة عالية.

الكلمات المفتاحية: إستراتيجية إدارة الطاقة ، شبكة إلمان العصبية ، الشبكة العصبية متعددة الطبقات. تدفق الدولة ؛ متصل بالشبكة ؛ المنطق الضبابي؛ نموذج التحكم التنبؤي.

Table des matières

Remerciements	iii
Abstract	v
Résumé	vi
Table des figures	xix
Liste des tableaux	xx
Introduction Général	1
CHAPITRE I : État de l'art des systèmes multi sources	8
1 État de l'art des systèmes multisources	8
1.1 Introduction	10
1.2 Micro et mini réseau	10
1.3 Systèmes hybrides	12
1.4 Systèmes multi sources	17
1.5 Les Systèmes de supervision	33
1.6 Les Outils de dimensionnement du système hybride	36
1.7 Les Stratégies de gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides	39
1.8 Conclusion	48

CHAPITRE II : Description et Modélisation du Système Hybride étudié	52
2 Description et Modélisation du Système Hybride étudié	52
2.1 Introduction	53
2.2 Description du système hybride	53
2.3 Modélisation et commande des composants du SEH	55
2.4 Conclusion	88
CHAPITRE III : Les Techniques de Commande D'un Système d'Energie Hybride	91
3 Les Techniques De Commande D'un Système D'Energie Hybride	91
3.1 Introduction	93
3.2 Description des Modes de fonctionnement du système hybride	94
3.3 Stratégie de gestion de l'énergie basée sur Stateflow	99
3.4 Stratégie de gestion de l'énergie basée sur Réseaux de neurones artificiels	103
3.5 Commande rapprochée des convertisseurs statiques	114
3.6 Conclusion	140
CHAPITRE IV : Résultats et discussion	144
4 Résultats et discussion	144
4.1 Introduction	146
4.2 Résultats et discussion	146
4.3 Conclusion	173
Conclusion	175
Perspective	178
A PARAMÈTRES DES SOURCES DU SEH	179
A.1 Paramètres du générateur PV	179
A.2 Paramètres de l'aérogénérateur	180
A.3 Paramètres du système de stockage d'énergie	181
A.4 Paramètre du générateur diesel	181
A.5 Paramètres du système d'énergie hybride	183
B	184

Table des matières

B.1 MÉTHODE DE CONCEPTION DE FILTRE LC	184
Bibliographie	186

Nomenclature

Nomenclature

C_N	Capacité nominale de la batterie	(Ah)
C_{de}	Couple électromagnétique de la génératrice.	(N.m)
C_p	Coefficient de puissance	(-)
G	Gain du multiplicateur	(-)
i_a, i_b, i_c	Courants statoriques	(A)
I_{bat}	Courant de la batterie	(A)
i_{ds}, i_{qs}	courants statoriques des axes d-q	(A)
J_d	Moment d'inertie total(turbine +générateur)	(s)
P	nombre de paires de pôles	(-)
r_{bat}	résistance de la batterie	(Ω)
$SOC(t_0)$	Etat de charge initial de la batterie	(%)
$tansig(n)$	Fonction d'activation	(-)
v_a, v_b, v_c	Tensions statoriques	(V)
V_{ds}, V_{qs}	Tensions statoriques des axes d - q	(V)
α	Rapport cyclique	(-)
α, β	paramètres de régularisation	(-)
α_{bat}	Rapport cyclique du hacheur réversible	(-)
β	Angle d'orientation des pales	(-)

Nomenclature

δ	Coefficient d'auto-réaction de la couche contexte	(W)
λ	Vitesse spécifique	(-)
ω_e	pulsation électrique	(rad/s)
Ω_t	Vitesse de rotation de la turbine	(rad/s)
Ω_{mec}	Vitesse de rotation de la génératrice	(rad/s)
$\psi_{a,b,c}$	Flux magnétiques statoriques dans le repère abc	(Wb)
ψ	Débit de carburant(turbine diesel)	(-)
$\psi_{f,D,Q}$	Flux rotoriques de la machine synchrone	(Wb)
ρ	Masse volumique de l'air	(Kg/m)
θ_e	Position angulaire du rotor en degré électrique	(Wb)
φ_f	Flux d'excitation constant des aimants permanents	(Wb)
φ_m	Flux crée par l'aimant permanent	(Wb)
φ_{abc}^s	Flux statoriques	(Wb)
C_g	couple issu du multiplicateur	(N.m)
C_{aer}	Couple aérodynamique	(N.m)
C_{dc}	Condensateur du bus continu	(F)
C_{em}	Couple électromagnétique	(N.m)
C_{em}	Couple électromagnétique	(N.m)
$Cp(\lambda, \beta)$	Coefficient de performance de la turbine éolienne	(-)
DoD	Profondeur de décharge de la batterie	(%)
E_D	La somme des carrés des erreurs de réseau	(-)
E_W	La somme des poids du réseau au carré	(-)
E_{bat}	Tension à vide de la batterie	(V)
f	Coefficient de frottement visqueux	(N.m.s.rad ⁻¹)
f_d	Coefficient de frottement total (turbine +générateur)	(N.m.s.rad ⁻¹)
$I_{bat}(t)$	Courant de la batterie	(A)
I_{bat-dc}	Courant du batterie en sortie de l'hacheur	(A)

Nomenclature

I_{ch-dc}	Courant de la charge	(A)
I_{eol-dc}	Courant de l'éolienne en sortie de l'hacheur	(A)
I_{ph}	Courant photo-généré	(A)
I_{pv-dc}	Courant du GPV en sortie de l'hacheur	(A)
I_{pv}	Courant du générateur photovoltaïque	(A)
I_{res-dc}	Courant du réseau électrique	(A)
$I_{bat_{ref}}$	Courant de référence de la batterie	(A)
J	Inertie totale qui apparaît sur le l'arbre du générateur	(kg.m ²)
L_a, L_b, L_c	Inductances propres statoriques	(H)
L_d, L_q	Inductance de l'axe direct et en quadrature	(H)
M_{ab}, M_{bc}, M_{ca}	Inductances mutuelles	(H)
n_{bat}	Nombre de cellules de la batterie	(-)
$P - ch)$	Puissance de la charge	(W)
P_{eol}	Puissance du l'éolienne	(W)
P_{net}	Puissance net	(W)
P_{pv}	Puissance du générateur photovoltaïque	(W)
P_{pv}	Puissance du générateur photovoltaïque	(W)
$P_{bat_{ref}}$	Puissance de référence de la batterie	(W)
P_{charge}	Puissance consommée par la charge	(W)
$P_{réseau_{ref}}$	Puissance de référence du réseau	(W)
r_D, L_D	Résistance et inductance d'amortisseur d'axe D	(Wb)
r_f, L_f	Résistance et inductance de champ	(Wb)
R_p	Résistance parallèle	(Ω)
r_Q, L_Q	Résistance et inductance d'amortisseur d'axe Q	(Wb)
R_s	Résistance des enroulements statoriques	(Ω)
R_s	Résistance série	(Ω)
SOC	Etat de charge de la batterie	(%)

Nomenclature

T_D	Retard de combustion	(s)
T_s	Période de commutation	(s)
T_{D1}	Constante de temps du moteur diesel	(s)
T_{D2}	Délai de combustion du moteur diesel	(s)
V_v	Vitesse du vent	(m/s)
V_{dcref}	Tension de référence du bus continu	(V)
V_{oc}	Tension de circuit ouvert du module PV	(V)
W^1	Poids de connexion entre la couche de contexte et la couche cachée	(-)
W^3	Poids entre la couche cachée et la couche de sortie	(-)

Acronyms

$P\&O$	Perturbation et observation.
ENN	Elman Neural Network
GD	Générateur diesel
GPV	Générateur photovoltaïque
GSAP	Générateur synchrone à aimant permanent
MAE	Erreur absolue moyenne EAM (MAE pour Mean Absolute Error)
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
MLP	Réseau de neurones multicouche (Multi-Layer perceptron)
MPC	Commande prédictive à modèle de référence (Model predictive control)
MPPT	Suivi du Point de Puissance Maximale (Maximum Power Point Tracking)c
PI	Proportionnel-intégral
PLL	Boucle A Verrouillage De Phase
PV	Photovoltaïque
RLF	Régulateur par logique floue
RMSE	Racine de l'erreur quadratique moyenne
RNA	Réseau de neurone artificiel
SEH	Système d'Energie Hybride

Nomenclature

SF Stateflow

SGE Système de Gestion de l'Energie

STC Conditions d'essai standard(Standard Test Conditions)

Tsr Rapport de vitesse optimal

Table des figures

1	Structure de la thèse	4
1.1	Classification des systèmes hybrides	13
1.2	Architecture d'un système hybride à bus DC	15
1.3	Architecture d'un système hybride à bus AC	16
1.4	Architecture mixte(parallèle).	16
1.5	Effet photovoltaïque	18
1.6	différents types de systèmes photovoltaïques.	19
1.7	Principe de la conversion d'énergie.	20
1.8	Classification des systèmes de conversion d'énergie eolienne	21
1.9	Eolienne à axe horizontal	22
1.10	Eolienne à axe horizontal : (a)Rotor Darrieus,(c)Rotor Hélicoïdal,(c)RotorDarrieus H	22
1.11	Classification des génératrices électriques utilisées dans les systèmes conversion d'énergie eolienne.	26
1.12	Schéma de principe de la batterie.	27
1.13	Séchema de principe d'un générateur diesel.	29
1.14	Séchema de principe d'un moteur diesel à quatre temps.	31
1.15	Architecture du système de supervision centralisé [45]	34
1.16	Architecture du système de supervision distribué [45].	35
1.17	Architecture du système de supervision hybride	36
1.18	Les stratégies de gestion des SEH.	40
2.1	Configuration du système d'énergie hybride proposé	54
2.2	Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.	57
2.3	Caractéristiques du PV pour différents niveaux d'éclairement $25^{\circ}C$	58
2.4	Caractéristiques du PV pour différentes températures	58

Table des figures

2.5	Différentes parties d'un aérogénérateur	59
2.6	Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine (λ).	60
2.7	Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.	61
2.8	Zones de fonctionnement d'une éolienne	62
2.9	Structure de la GSAP dans le repère (a,b,c).	63
2.10	Modèle biphasé de la MSAP.	65
2.11	Modèle équivalent électrique simple d'une batterie.	67
2.12	Conception d'un générateur diesel.	69
2.13	Modèle simplifié du moteur diesel	71
2.14	bloc du système de régulation de la vitesse de la turbine diesel.	72
2.15	Schéma d'étude de la machine synchrone triphasé (repère abc)	74
2.16	Représentation de la génératrice synchrone dans le plan d-q	75
2.17	Schéma équivalents de la génératrice synchrone dans le repère dq	76
2.18	Schéma fonctionnel d'un synchrone système d'excitation du générateur	78
2.19	Schéma de principe d'un hacheur survolteur.	79
2.20	Schéma équivalent de la première séquence de conduction.	79
2.21	Schéma équivalent de la deuxième séquence de conduction.	80
2.22	Schéma de principe d'un Hacheur réversible	81
2.23	Le schéma équivalent de la Première séquence du mode élévateur où $S2$ est ouvert et $S1$ est fermé.	81
2.24	Le schéma équivalent de de la deuxième séquence du mode abaisseur où $S1$ est ouvert et $S2$ est fermé.	82
2.25	Topologie d'un système de production d'énergie éolienne avec redresseur à diodes et convertisseur élévateur continu-continu.	84
2.26	Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux coté réseau	85
2.27	Modèle du bus continu.	87
3.1	Schéma synoptique globale du système hybride.	94
3.2	Organigramme de l'algorithme de gestion du système hybride en mode autonome.	96
3.3	Organigramme de l'algorithme de gestion du système hybride en mode connecté au réseau.	98
3.4	Structure générale d'un diagramme Stateflow.	102
3.5	Structure du bloc de supervision par la technique de Stateflow.. . . .	103
3.6	Schéma d'un neurone biologique.	104
3.7	neurone formel	105
3.8	Diverses fonctions d'activation d'un neurone artificiel [19].	106
3.9	Réseau MLP à trois couches	108

Table des figures

3.10	Structure typique d'ENN	110
3.11	Types d'apprentissage du RNA	111
3.12	Configuration du réseau Elman 8-20-3	114
3.13	Le contrôleur de limitation de puissance photovoltaïque.	115
3.14	Etapes de suivi d'PPM	116
3.15	Organigramme de l'algorithme P&O	117
3.16	Schéma bloc de la commande MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation .	119
3.17	Schéma de commande du convertisseur DC-DC côté GSAP	123
3.18	Organigramme commande predictive	125
3.19	Schéma de commande de la batterie.	127
3.20	Schéma Principe de la logique floue.	128
3.21	Schéma Synoptique du commande bus continu	130
3.22	Régulation du bus continu par le RLF.	131
3.23	Fonctions d'appartenance des entrées et de la sortie.	132
3.24	Contrôle en courant de l'onduleur réseau dans le référentiel d-q.	134
3.25	Schéma bloc de régulation du courant id-q par le RLF	134
3.26	Schéma bloc de contrôle de boucle à verrouillage de phase	136
3.27	Schéma commande du redresseur coté générateur diesel.	138
3.28	La stratégie de contrôle de l'onduleur source de tension côté charge..	140
4.1	les Profils de l'éclairement solaire et de vitesse du vent,(b)Puissance consommée par les charges.	147
4.2	les puissances du système hybride obtenues.	148
4.3	Zoom du mode connecté au réseau.	151
4.4	Zoom du mode autonome.	153
4.5	Performances de sortie du générateur PV sous différents niveaux d'irradiation . . .	155
4.6	Résultats de simulation de la turbine éolienne	155
4.7	performance de la chaine eolienne	156
4.8	Les courants de sortie de la GSAP avec profil incertitude du vent.	157
4.9	Les tensions de sortie de la GSAP avec profil incertitude du vent.	157
4.10	Les Allures de la puissance active et réactive du réseau.	158
4.11	Les courants directs (a) et quadratures (b)en fonction du temps du réseau	159
4.12	Les Courant de sortie du réseau avec l'allure de la tension et du courant du phase a	159
4.13	Les Allures de tensions sortie du réseau.	160
4.14	Performance THD du courant de réseau en mode sollicitation du réseau électrique	161
4.15	Performance THD du courant de réseau en mode d'injection au réseau	162
4.16	(a) Courant de la batterie ,(b) l'état de charge ,(c) la tension de la batterie	163

Table des figures

4.17 la tension du bus DC.	164
4.18 Les Allures de Courants de la charge	164
4.19 la puissance active et réactive du générateur diesel	165
4.20 Les courants directs et quadratures en fonction du temps du générateur diesel.	166
4.21 Les Allures de courants de sortie du générateur diesel.	166
4.22 Les tensions de sortie du générateur diesel.	167
4.23 Les entrées de l'apprentissage du RNA.	168
4.24 L'outil d'apprentissage de réseau de neurones (nntaintool) dans MATLAB.	169
4.25 les sorties de l'apprentissage	171
4.26 les sorties de test RNA	172

Liste des tableaux

1.1	classification des éoliennes selon la puissance nominale	24
3.1	Paramètres du réseau MLP et ENN	113
3.2	Table des règles de décision floues.	132
4.1	Analyse statistique entre ENN et MLPNN	170
A.1	Paramètres du panneau utilisé au STC : Température = $25^{\circ}C$ et Irradiance = $1000W/m^2$	180
A.2	Paramètres du générateur PV utilisé au STC : Température = $25^{\circ}C$ et Irradiance = $1000W/m^2$	180
A.3	Paramètre de la chaîne éolienne	181
A.4	Paramètres de la batterie plomb-acide	181
A.5	Paramètres de générateur diesel	182
A.6	Paramètres du SEH	183

"L'échec est simplement l'occasion de recommencer, cette fois plus intelligemment"

Henry Ford

Introduction Général

Introduction Générale

Au cours des dernières décennies, avec une population croissante, le monde a connu une consommation exponentielle d'énergie qui a conduit à l'épuisement des ressources conventionnelles comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel. L'exploitation de ces ressources a un impact sévère sur l'environnement avec une augmentation des gaz à effet de serre [1, 2]. Pour atténuer ces effets, une politique a été adoptée par différents pays pour introduire des sources non conventionnelles/renouvelables pour soutenir les domaines de l'électrification et des transports. Dans le domaine de l'électrification, le réseau électrique existant utilise des sources conventionnelles pour la production et manque de qualité de l'énergie. La mauvaise qualité de l'alimentation électrique entraîne des délestages et des coupures de courant, interrompant ainsi les activités quotidiennes des consommateurs. Le réseau conventionnel utilise un tiers du combustible de production total pour le convertir en électricité et, avec une perte de huit pour cent dans les lignes de transmission de l'électricité produite, est aussi utilisé pour répondre à la demande de pointe qui a également une probabilité de se produire de cinq pour cent, avec une réduction fiabilité [3]. Pour inverser ces scénarios indésirables, il y a une croissance remarquable dans le développement et l'utilisation de sources d'énergie nouvelles et plus propres. L'utilisation de ce type d'énergie, obtenue par transformation directe des ressources naturelles, est actuellement étudiée avec grand intérêt par la communauté scientifique, en raison de sa complexité, de sa variabilité et de son imprévisibilité. Cependant, malgré les avantages des énergies renouvelables, il existe des problèmes associés à chaque technologie, tels que la dépendance aux ressources environnementales, le coût élevé, etc. Pour minimiser l'impact négatif de ces inconvénients, les systèmes hybrides sont présentés comme une solution viable, sûre et efficace [4]. L'utilisation de systèmes hybrides avec différentes sources de production est une solution acceptable pour couvrir les déficiences des différents éléments, mais un système de secours est nécessaire pour un fonctionnement optimal [5, 6]. Afin d'assurer le fonctionnement optimal des systèmes hybrides basés sur les énergies renouvelables,

Introduction

et garantit un système énergétique fiable avec un rendement élevé. En revanche, les sources éoliennes et solaires peuvent être plus appropriées et elles sont non polluantes [7]. C'est pourquoi la plupart des applications choisissent ces sources pour mettre en place des systèmes hybrides basés sur les énergies renouvelables. La ressource éolienne, bien qu'étant disponible tout au long de la journée, a un caractère aléatoire élevé et de grandes variations à court terme, ce n'est donc pas une source fiable pour alimenter une charge [8]. D'autre part, bien que la ressource solaire soit plus prévisible et subisse des variations moins prononcées, il ne peut y avoir de production solaire pendant la nuit ou à l'aube ou à la tombée de la nuit, donc la production est minimisée en raison de la quantité réduite de rayonnement incident, ce qui entraîne un déficit énergétique [9]. Cependant, l'imprévisibilité pourrait être atténuée par la complémentarité des ressources (systèmes énergétiques hybrides) ou l'introduction de systèmes de stockage d'énergie électrique. De plus, l'intégration d'un générateur diesel, comme une source de secours, avec une source photovoltaïque et une source éolienne pour constituer un SEH est une solution très adéquate pour l'amélioration de la fiabilité des deux sources renouvelables [8]. Le générateur diesel sera utilisé dans les situations de mauvaises conditions météorologiques. Il prendrait le relais automatiquement dans les conditions où l'énergie fournie par l'éolienne et le générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour alimenter la charge dont les batteries ont été déchargées jusqu'à un certain seuil. Pour augmenter la pénétration des énergies renouvelables et résoudre les problèmes posés dans le schéma électrique conventionnel tels que les pertes de transport dans les réseaux de transport et de distribution, le concept de micro réseau a été introduit pour assurer une production fiable à petite échelle, en faisant du lieu de consommation un lieu de production. Les progrès technologiques et les développements dans la production d'énergie électrique ont révélé le concept d'un réseau intelligent. Les applications de réseaux intelligents joueront un rôle clé dans le changement du réseau de distribution d'électricité actuel. Malgré de grands avantages, tels que la flexibilité et la durabilité, il existe des défis importants pour le fonctionnement efficace d'un Micro réseau entraînant certaines difficultés d'intégration du réseau électrique en raison de la nature intermittente de l'énergie électrique générée à partir de sources d'énergie renouvelables et les différences structurelles [10]. Les micro-réseaux évoluent actuellement en termes d'idée et de définition afin d'offrir aux consommateurs des options énergétiques durables en termes d'intégration des énergies renouvelables, de stabilité du réseau, de flexibilité et de coût. La question principale que l'on doit se poser est :

"Comment assurer le fonctionnement d'un micro réseau de manière intelligente et optimale ?"

Motivations

Le fonctionnement des sous-systèmes de micro-réseaux nécessite un système de gestion de l'énergie (SGE) permettant un contrôle optimal . Les objectifs de ces stratégies détermineront le comportement du système, Il est donc très important de définir une stratégie de gestion appropriée. La gestion optimale d'un micro-réseau sur le plan économique et environnemental est un domaine de recherche qui s'est développé notamment après l'objectif fixé par l'Union européenne (UE) de faire face au changement climatique dans le cadre d'action sur le climat et l'énergie pour la période 2021-2030. Suite à l'augmentation de 2018, l'UE s'est fixée trois objectifs : la réduction des émissions de gaz à effet de serre d'au moins 40 %, l'augmentation de la contribution des énergies renouvelables à au moins 32% et l'amélioration de l'efficacité énergétique d'au moins 32,5 %. Cependant, une gestion optimale favorisera le déploiement d'un système de micro-réseaux qui représente une réelle opportunité pour accroître l'attractivité de la production d'énergie renouvelable et ainsi atteindre les objectifs fixés par la communauté européenne. Les principaux objectifs du système de gestion de l'énergie sont :

- Maximiser la production d'électricité à partir de sources renouvelables.
- Réduire la consommation de carburant.
- Prolonger la durée de vie du SEH.
- Développer un contrôle capable de gérer le flux des puissances du système tout en régulant la tension et la fréquence.
- Protéger la batterie contre les surcharges et les décharges excessives.
- Équilibre des puissances active et réactive (P-Q) et bonne communication entre les sous système.
- assurer la Synchronisation du micro-réseau avec le réseau principal.
- Optimisation de coût de production de l'électricité dans un micro-réseau électrique .

Objectifs

Le travail présenté dans cette thèse a plusieurs objectifs principalement : Le développement d'un système intelligent de gestion de l'énergie (SGE) basé sur un réseau de neurones Elman pour assurer un contrôle et une gestion optimaux d'un système de micro-réseaux. Cette stratégie a été principalement choisie pour réduire la complexité du mode opératoire en minimisant le temps d'exécution. De plus, c'est une alternative utile à la méthode de conception populaire qui utilise des logiciels conventionnels. Les ensembles de données de l'apprentissage et de test ont été obtenus via Stateflow (SF) basé sur des règles. En raison de sa simplicité, le Stateflow basé sur des règles minimise la complexité des règles linguistiques dans des scénarios complexes avec moins de temps d'exécution, ce qui garantit et améliore la commutation intelligente entre différents modes

de fonctionnement.

Structure de la thèse

Le travail présenté dans cette thèse est organisé en quatre chapitres qui se représentent dans l'ordre suivant (Figure 1) :

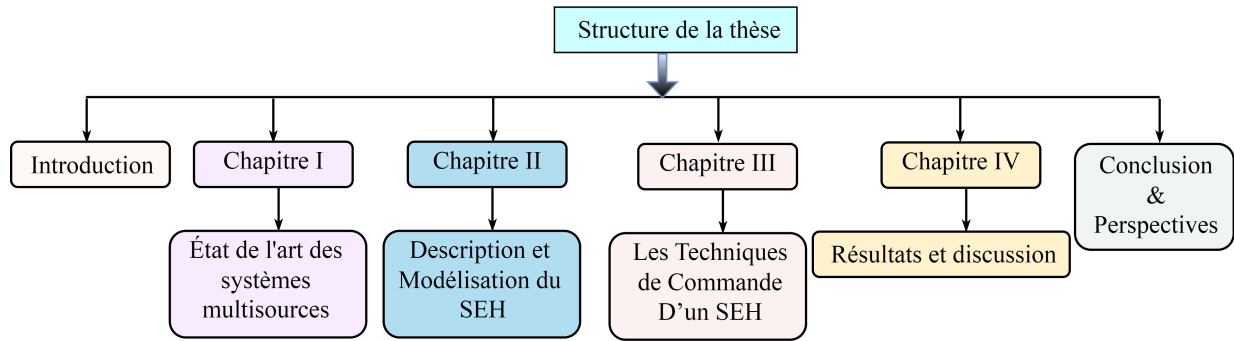


FIGURE 1 – Structure de la thèse

Le Chapitre 1 (Etat de l'Art des Systèmes Multisources), vise à décrire les systèmes multisources (hybride) avec l'importance de leur mise en œuvre, avec une caractérisation des différentes divisions pouvant composer un système de micro-réseaux. Nous présentons quelques connaissances préliminaires et concepts de base pour les micro réseaux et les systèmes hybrides. puis nous présentons un aperçu théorique sur les différentes parties du système hybride étudié. Ensuite, nous présentons les différentes typologies de systèmes hybride, et les systèmes de supervision du micro réseau avec la discussion de ces avantages et ces inconvénients. Ensuite, une présentation détaillée des logiciels de dimensionnement existants pour obtenir une conception optimale et évaluer la performance du systèmes hybrides. En concluant le chapitre par un bref état de l'art sur les stratégies de gestion de l'énergie.

Le chapitre II :est composé de deux parties : la première partie décrit la modélisation de différents sous-systèmes en termes d'équations mathématiques séparément. Nous commençons par modéliser le système photovoltaïque, puis les différents éléments de la chaîne de conversion à savoir la turbine éolienne, la machine synchrone à aimants permanents (MSAP), et par la suite le système de stockage à base de batteries plomb-acide, et le générateur diesel, la deuxième section est consacré à la modélisation moyenne pour les convertisseurs de puissance associés DC-DC, DC-AC, et AC-DC.

Dans le chapitre III (Gestion de l'énergie et les Techniques de Commande d'un SEH) nous avons proposé deux stratégies de gestion. Dans un premier temps, la mise en œuvre du système de gestion de l'énergie proposé dans un environnement Stateflow est expliquée en détail. En suite,

Introduction

nous avons décrit le concept et la mise en œuvre de la deuxième stratégie de gestion basé sur le réseau de neurones. Dans un deuxième temps, les algorithmes de maximisation de la puissance produite par les sources seront définis. Différentes techniques de commandes plus innovantes seront ensuite synthétisées, pour chaque convertisseur des modules contrôlés

Le chapitre IV (Résultats et discussion) présente les résultats obtenus par la mise en œuvre de systèmes de gestion de l'énergie basés sur les approches d'optimisation pour différents modes de fonctionnement sous plate-forme MATLAB, les résultats du réseau de neurones et de Stateflow les approches sont interprétées et justifiées afin d'établir enfin un système de gestion de l'énergie qui garantit une meilleure répartition des flux de puissance dans le micro réseau . Enfin, des notes de synthèse, des perspectives et des orientations futures sont proposées en conclusion.

CHAPITRE I : État de l'art des systèmes multi sources

« N'abandonnez jamais un
rêve juste à cause du temps
qu'il faudra pour l'accomplir.
Le temps passera de toute fa-
çon. »

Earl Nightingale

1

État de l'art des systèmes multisources

Sommaire

1.1	Introduction	10
1.2	Micro et mini réseau	10
1.2.1	Les mini réseaux intelligents	11
1.3	Systèmes hybrides	12
1.3.1	Classification des systèmes hybrides	12
1.4	Systèmes multi sources	17
1.4.1	Générateur photovoltaïque	17
1.4.2	Générateur éolien (Aérogénérateur)	19
1.4.3	Les systèmes de stockage	26
1.4.4	Générateur diesel	29
1.5	Les Systèmes de supervision	33
1.5.1	Les Système de supervision centralisée	33
1.5.2	Les systèmes de supervision hybride :	35
1.6	Les Outils de dimensionnement du système hybride	36

Chapitre 1. État de l'art des systèmes multisources

1.6.1	HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable) . . .	36
1.6.2	Hybrid2	37
1.6.3	RETScreen	37
1.6.4	RAPSIM	38
1.6.5	HOGA (Hybrid Optimization by Genetic Algorithms)	38
1.7	Les Stratégies de gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides	39
1.7.1	Les stratégies de gestion à base de règles	40
1.7.2	Les stratégies de gestion basé sur les techniques d'optimisation . . .	42
1.8	Conclusion	48

1.1 Introduction

L'utilisation des énergies renouvelables est croissante dans la communauté mondiale du fait de leurs forts bénéfices environnementaux et économiques (réduction des gaz à effet de serre, réchauffement climatique), elles sont inépuisables, sources disponibles et respectueuses de l'environnement ; c'est une solution au problème croissant de la demande d'énergie. Principalement, les énergies renouvelables représentent une alternative intéressante pour l'électrification de sites isolés ou difficiles d'accès ; cependant, le principal conflit qui retarde le déploiement des sources renouvelables est leurs effets intermittents en raison de leur dépendance principale à la Conditions météorologie sont qui sont souvent variables et ne peuvent pas être prédites avec précision . Pour obtenir une production permanente, une combinaison de plusieurs sources renouvelables, un système de stockage, des systèmes de secours conventionnels, et parfois le réseau principal est crucial, par exemple dans un système hybride qui contient les sources photovoltaïques (PV) et éoliennes : le vent peut assurer une production minimale la nuit lorsque la production des panneaux solaires est absente, et inversement, par beau temps, les panneaux solaires peuvent assurer une production plus régulière que celle de l'éolienne . Ainsi, pour avoir un système multi-sources fiable, il est important de prendre en compte deux enjeux, le premier est le dimensionnement optimal qui assure l'autonomie énergétique du site en maximisant la puissance captée par les sources d'énergie, tandis que le second défi est lié à la gestion optimale de la production et de la consommation d'énergie .

Dans ce chapitre l'état de l'art des systèmes multi-sources est présenté. La première partie commence par décrire le micro réseau et les micro réseaux intelligents, puis on donnera une description plus détaillée des différentes technologies des principaux composants de production du système hybride étudié . Ce système est constitué de cinq sous-systèmes. Deux sources à base de l'énergie renouvelable(photovoltaïque (PV) et l'énergie éolienne) et un dispositif de stockage (les batteries), une source conventionnelle (groupe électrogène), et le reseau électrique . De plus, plusieurs configurations de systèmes hybrides qui construisent un micro réseau sont présentées pour choisir la plus adaptée au micro réseau proposé et des outils de dimensionnement appliqués aux micro-réseaux.Enfin, nous terminons par l'état de l'art des stratégies de gestion d'énergie au sein des micro réseaux.

1.2 Micro et mini réseau

Un micro-réseau est un réseau de petite taille et de faible puissance décentralisé peut fonctionner indépendamment ou en collaboration avec d'autres petits réseaux électriques. Les micro-réseaux sont généralement alimentés par des générateurs ou des ressources d'énergie renouvelable

telles que les micro-turbines, les piles à combustible, les éoliennes, les générateurs photovoltaïques (PV) et les dispositifs de stockage tels que les volants d'inertie, les condensateurs d'énergie et les batteries. Les micro-réseaux sont souvent utilisés pour fournir une alimentation de secours ou compléter le réseau électrique principal pendant les périodes de forte demande [11]. Le régime de fonctionnement du micro-réseau est divisé en deux modes : mode îlotage et mode connecté au réseau. En mode îloté, le système doit être suffisamment efficace pour générer et supporter une augmentation soudaine de la demande pour alimenter la charge. D'autre part, en mode connecté au réseau, il peut échanger de l'énergie à partir du réseau principal à des moments où le système est inefficace en matière d'auto-génération et ne remplit pas sa charge [12]. De plus, dans de tels cas, lorsque le micro-réseau génère un excès d'électricité, il peut l'alimenter au réseau principal. De plus, ce système présente un avantage, en cas de perturbations importantes sur le réseau principal, le micro-réseau peut être déconnecté du réseau de distribution pour éviter tout dommage au système. De plus, le mode de fonctionnement est lié à l'élasticité de l'offre, à la demande des charges locales et au marché de l'électricité. Ainsi, les objectifs de la programmation optimale du fonctionnement des micro-réseaux concernent les aspects économiques, techniques et environnementaux.

1.2.1 Les mini réseaux intelligents

Les réseaux existants sont sous pression pour répondre à la demande croissante d'électricité, ainsi que pour fournir un approvisionnement stable et durable en électricité. Ces défis complexes sont à l'origine de l'évolution des technologies de mini-réseaux intelligents [13] (appelés aussi mini Smart-grids) sont des réseaux électriques à petite échelle d'une capacité installée comprise entre 10 kW et 10 MW ou inférieure à 50 MW, élaborés pour assurer une fourniture électrique efficace et de bonne qualité à un petit nombre de consommateurs. et d'une gamme diversifiée de nombreuses installations locales, des organes de stockage, des charges électriques et des instruments et outils de gestion de la puissance demandée. Le système de gestion utilise l'information, les technologies de communication bidirectionnelles et l'intelligence informatique de manière intégrée à travers la production, le transport, les sous-stations, la distribution et la consommation d'électricité pour obtenir un système propre, sûr, sécurisé, fiable, résilient, et efficace. Conceptuellement, les micro ou mini-réseaux peuvent être connectés au réseau de distribution ou fonctionner en mode îloté. Les caractéristiques importantes du Smart Mini Grid sont les suivantes :

- Favoriser la gestion de la demande et la réponse à la demande.
- Réduire les pannes de courant, en augmentant la fiabilité, l'efficacité et la sécurité du réseau.
- Réduire les émissions de carbone des gaz à effet de serre et minimiser la consommation de combustibles fossiles.

Chapitre 1. État de l'art des systèmes multisources

- Offrir une meilleure autonomie aux clients pour gérer leurs besoins en électricité.

Les mini réseaux peuvent être classés selon leur dimension mais aussi selon leur utilité (fiabilité, résilience, complexité d'accès à l'énergie, économies d'énergie, etc.) en quatre grandes catégories [12] :

- Les micro-réseaux dans les secteurs commerciaux, artisanaux ou industriels : des entreprises commerciales comme des magasins, les centres de recharge de téléphones mobiles ; des exploitations agricoles pour le pompage de l'eau servant à l'irrigation ; des exploitations productives pour les moulins et les ateliers de travail du bois ou du métal ; des centres semi-industriels comme des tours de télécommunication.
- Les micro-réseaux en milieu tertiaire campus universitaires ou scolaire.
- Les micro-réseaux alimentant des zones reculées car faiblement ou pas raccordées au réseau électrique : le déploiement des micro-réseaux leur permet d'utiliser des énergies renouvelables locales et de ne plus dépendre des groupes diesel polluants et chers.
- Les micro-réseaux de « base vie » (camp militaire ou hôpital, sites sensibles) : avec ses propres moyens de production et de stockage et ses propres infrastructures de distribution, le micro-réseau assure une autonomie énergétique offrant ainsi une alimentation et une continuité de service durant les moments de pannes d'électricité. Ceci est nécessaire pour les bases militaires .

1.3 Systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybrides (SEH) (ou multi-sources) regroupent deux systèmes d'énergie ou plus de natures différentes, ils désignent généralement l'association d'un ou plusieurs systèmes renouvelables avec un/ des système(s) d'énergie classique, fréquemment des générateurs diesels ou d'autre source d'énergie fossile [14], l'hybridation un/des système(s) classique(s) avec d'un/des système(s) d'énergie renouvelable permet de résoudre le problème d'intermittence de ce dernier et avoir une puissance électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont des systèmes indépendants et autonomes, ils fonctionnent seuls en alimentant des régions isolées, interconnectés entre eux pour former un micro-réseau, ou parfois, ils se trouvent connectés au réseau principal.

1.3.1 Classification des systèmes hybrides

Les systèmes hybrides sont classés selon plusieurs critères. Les plus courants sont présentés sur la Figure 1.1 [11],[15].

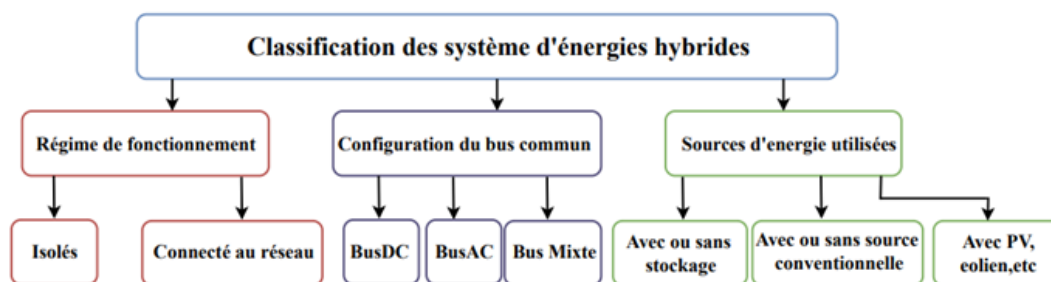


FIGURE 1.1 – Classification des systèmes hybrides

1.3.1.1 Classification Selon le mode de fonctionnement

Les systèmes d'énergie hybrides peuvent être classés en fonction de leur fonctionnement autonome ou connecté au réseau. L'utilisation de l'une ou l'autre topologie est principalement déterminée par l'application et le coût financier.

1.3.1.1.1 Les systèmes isolés

Dans cette topologie, le système est isolé du réseau, il est donc responsable d'assurer la demande de charge à tout moment. Les problèmes associés à cette configuration sont liés à la fiabilité et aux performances. L'utilisation d'un système entièrement isolé peut mettre en danger la sécurité de l'énergie fournie, en raison du nombre limité de ressources disponibles. De même, l'excès d'énergie est un problème et doit donc être éliminé, ce qui réduit les performances du système. Pour ces raisons, cette configuration n'a de viabilité technique et économique que dans des applications où il est impossible ou très coûteux d'accéder au raccordement au réseau.

1.3.1.1.2 Les systèmes connecté au réseau

Dans cette configuration, le système est connecté au réseau. Cette connexion garantit que la demande est satisfaite dans les situations de déficit énergétique et augmente les performances du système pour tirer parti de l'excédent d'énergie à vendre et à distribuer sur le marché de l'énergie. L'utilisation de ce type de topologie conduit à de nouveaux modèles de production et stratégies de gestion de l'énergie basés sur la consommation et la production distribuée à petite, moyenne ou grande échelle.

1.3.1.2 Selon la structure du système hybride

Trois critères peuvent être pris en compte dans le classement en fonction de la structure du système :

- Présence ou non d'une source d'énergie conventionnelle (générateur diesel, une micro turbine à gaz) .
- La présence de dispositifs de stockage pouvant assurer la satisfaction des charges pendant les périodes d'absence de ressources primaires.
- relatif au type de sources d'énergie renouvelable utilisées :système peut contenir un système photovoltaïque, une éolienne, un convertisseur d'énergie hydraulique (centrales hydroélectrique ou utilisation des vagues) ou une combinaison de ces sources.

1.3.1.3 Classification selon la méthode d'intégration

Cette classification distingue le système selon la nature du bus d'interconnexion interne. Le rôle principal de ce bus est de créer un lien physique entre tous les éléments. et prescrit la nature et la valeur de tension, que ce soit pour la puissance générée par les sources elles-mêmes ou conditionnée par les différents convertisseurs. Généralement, il existe trois configurations possibles pour intégrer différentes sources d'énergie renouvelables à savoir[16, 17] : Configuration couplée (DC), configuration couplée CA(AC), configuration couplée hybride DC-AC . Les différentes architectures des bus est détaillée dans les sous sections suivantes[18] :

1.3.1.3.1 Architecture à bus DC

Dans Cette configuration toute la puissance générée est injectée dans le bus DC car toutes les sources d'énergie sont connectées au bus par des circuits d'interface électroniques de puissance appropriés. Les sources d'énergie DC sont connectés au bus via des convertisseurs DC/DC pour maintenir la tension DC constante côté utilisateur. Tandis que les sources d'énergie AC sera redressée et adaptée par un (des) convertisseur(s) AC/DC. L'architecture à bus DC est couramment utilisés dans les applications de faible puissance en raison d'un certain nombre d'avantages par rapport aux autres configurations . Parmi ces avantages, on peut souligner meilleure en termes de flexibilité vu qu'elle offre au système plus de degré de liberté pour le contrôle des flux de puissance. Ceci garantit la continuité de fonctionnement du système global même en cas de défaillance de l'un de ses composants].de plus Cette architecture présente en outre l'avantage de ne pas nécessiter l'étape de synchronisation lors de l'ajout d'une source[19]. Inconvénient, cette configuration nécessite un plus grand nombre d'éléments de conversion ,Cette configuration architecture est plus coûteuse. Un exemple de topologie basée sur un bus DC est présenté sur la Figure 1.2.

1.3.1.3.2 Architecture à bus AC

Cette architecture est largement utilisées dans les applications de Moyenne et Forte Puissance , en raison de la diminution du nombre de convertisseurs et réduisant les pertes de conversion

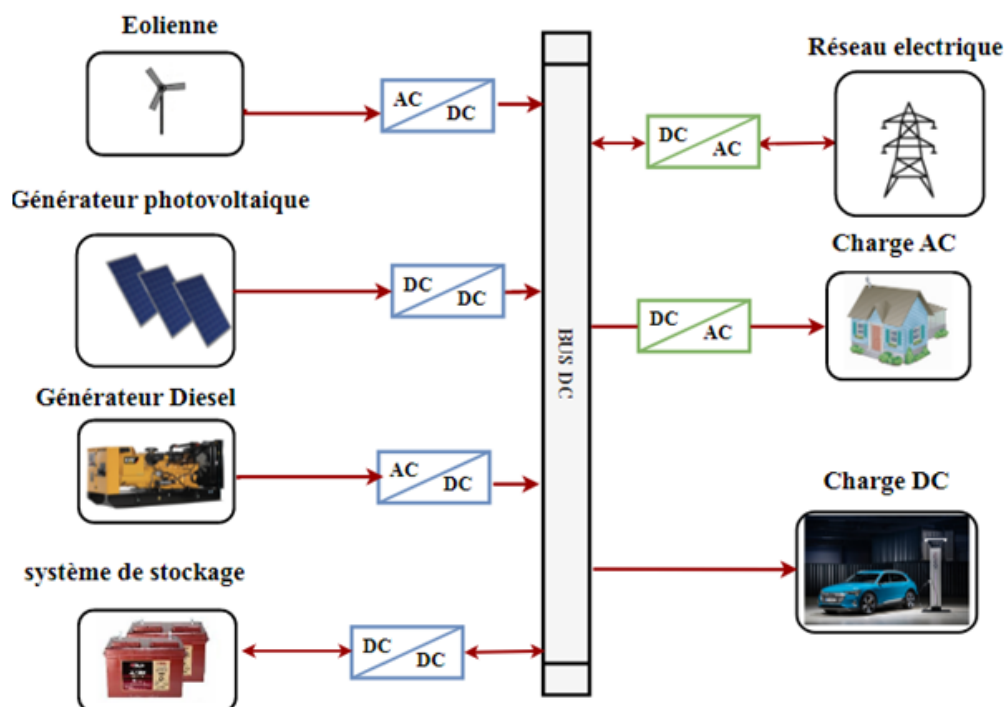


FIGURE 1.2 – Architecture d'un système hybride à bus DC

d'énergie. Dans cette configuration, différentes sources d'énergie sont connectées aux Bus AC via des convertisseurs appropriés. Le système de stockage est connecté au bus via un convertisseur bi-directionnel. Les charges AC sont directement connectées au bus et les charges DC sont connecté au bus via un convertisseur AC/DC. Les inconvénients de cette configuration peuvent souvent mettre en danger la stabilité ou l'intégrité du système. Le principal inconvénient est le besoin d'éléments de correction de qualité de puissance [20, 21]. Il est de plus en plus courant de trouver des charges inductives et électroniques qui réduisent respectivement le facteur de puissance et incluent des harmoniques. Un facteur de puissance réduit et un nombre élevé d'harmoniques peuvent endommager les différents générateurs, et nécessitent l'utilisation d'éléments de filtrage et de compensation, augmentant la complexité et le coût du système. Un exemple de configuration basée sur le bus AC est présenté à la Figure 1.3.

1.3.1.3.3 Architecture mixte (DC&AC)

Dans cette configuration qui permet de combiner les avantages des structures à bus AC et DC, Les deux bus sont interconnectés à l'aide d'un convertisseur DC/AC bidirectionnel et assurent les échanges d'énergies entre les deux bus. La configuration hybride a un coût inférieur et une efficacité énergétique supérieure car par rapport aux schémas couplés DC et couplés AC [22]. mais l'inconvénient majeure de cette configuration est la complexité de sa commande et une

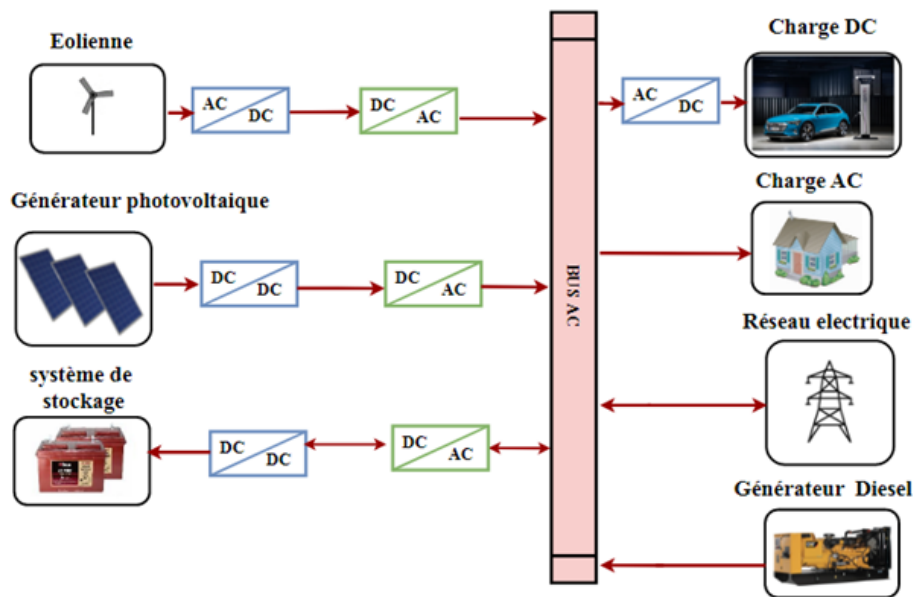


FIGURE 1.3 – Architecture d'un système hybride à bus AC
 gestion de l'énergie relativement complexes. Un exemple de topologie basée sur un bus hybride est présenté à la Figure 1.4.

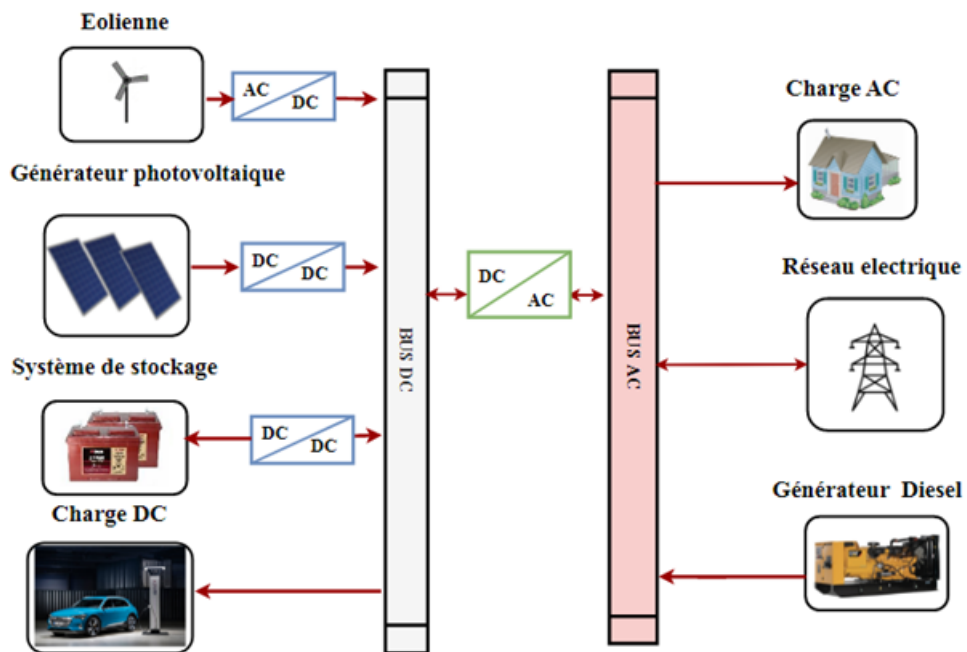


FIGURE 1.4 – Architecture mixte(parallèle).

1.4 Systèmes multi sources

1.4.1 Générateur photovoltaïque

La cellule solaire joue un rôle prédominant pour convertir la lumière du soleil en électricité, qui agit comme un composant de base dans les panneaux photovoltaïques. La structure physique de la cellule solaire est illustrée à la Figure 1.5, qui est similaire au modèle de diode classique de la jonction PN par des matériaux semi-conducteurs. Par conséquent, l'efficacité d'un panneau photovoltaïque dépend de la distribution spectrale de l'éclairement solaire. Lorsque la jonction absorbe la lumière, l'énergie du photon absorbé est transférée dans le système électron-proton. De plus, les porteurs de charge sont séparés à la jonction. Ensuite, les porteurs de charge dans la région de jonction créent un gradient de potentiel, sont accélérés sous le champ électrique et circulent sous forme de courant à travers un circuit externe. Cependant, dans les technologies PV actuelles, ils ont un inconvénient majeur pour leur incapacité à absorber les irradiances solaires du spectre solaire complet. Pendant ce temps, les cellules solaires PV souffrent d'une baisse d'efficacité avec une augmentation de la température. Plus précisément, lorsque la température des cellules solaires PV est augmentée de 1 °C, le rendement électrique sera réduit d'environ 0,4 % à 0,5% pour les cellules solaires PV au silicium cristallin et d'environ 0,25 % pour les cellules solaires PV au silicium amorphe. Les cellules PV sont connectées en série et/ou en parallèle pour former des panneaux ou modules PV. Ensuite, le générateur photovoltaïque est composé de plusieurs panneaux photovoltaïques pour obtenir la tension et/ou le courant de sortie importants. Les performances du générateur photovoltaïque sont affectées si toutes ses cellules ne sont pas également éclairées (partiellement ombragées). Il est probable que de l'ombre tombe sur certaines de ses cellules en raison de la chute de feuilles d'arbres, d'oiseaux ou de litières d'oiseaux sur le générateur, de l'ombre d'une construction voisine, etc.

Dans une chaîne de cellules connectées en série, toutes les cellules transportent le même courant. Même si quelques cellules à l'ombre produisent moins de courant de photons, ces cellules sont également obligées de transporter le même courant que les autres cellules entièrement éclairées. Les cellules ombragées peuvent être polarisées en inverse, agissant comme des charges, drainant l'énergie des cellules entièrement éclairées. Si le système n'est pas correctement protégé, un problème de point chaud peut survenir et, dans plusieurs cas, le système peut être endommagé de manière irréversible.

1.4.1.1 Types de système photovoltaïque

En général, il existe trois types d'installation des systèmes photovoltaïques Figure 1.6 : système connecté au réseau, système autonome et système hybride. Les deux derniers sont indé-

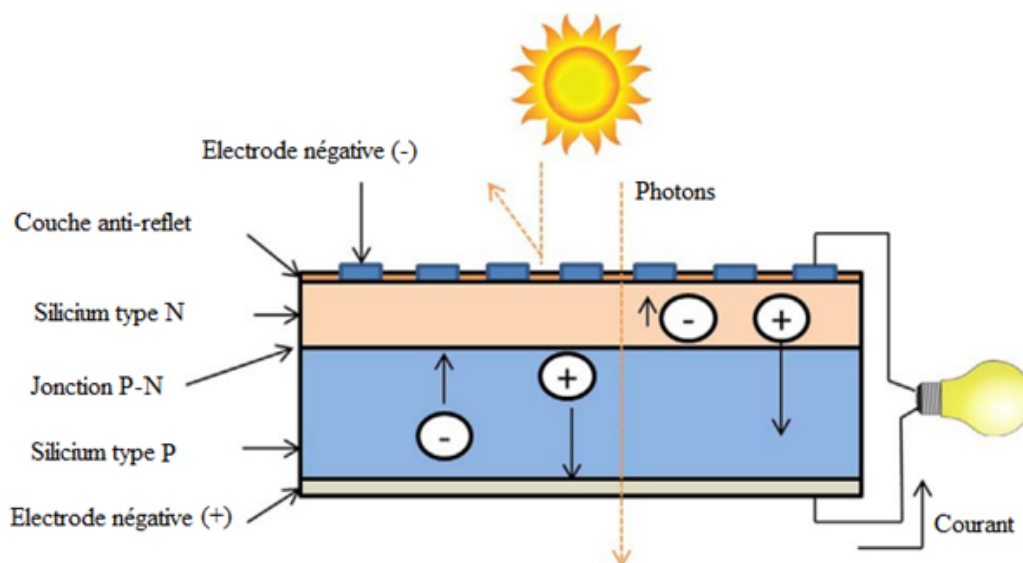


FIGURE 1.5 – Effet photovoltaïque

pendants du service public de distribution d'électricité ; on les retrouve souvent dans les régions éloignées du réseau électrique[23, 24].

1.4.1.1.1 Systèmes connectés au réseau

Dans ce système, l'énergie issue des panneaux PVs est injectée dans le réseau local ou national, Une telle approche permet de produire sa propre électricité en périodes ensoleillées et d'acheminer son excédent d'énergie vers le réseau .On distingue deux types d'installations connectées au réseau :

- **injection totale** : L'énergie produite est entièrement injectée dans le réseau public de distribution pour pouvoir être valorisée dans les meilleures conditions économiques du producteur.
- **Systèmes connectés au réseau avec injection des excédents de production** : L'énergie produite est consommée par la charge. Tout excès d'énergie solaire généré sera injecté dans le réseau de distribution public[25].

1.4.1.1.2 Systèmes autonome

Le système PV autonome est utilisé en général dans les localités isolées. Ces systèmes hors réseau sont principalement utilisés pour fournir des services aux utilisateurs, l'énergie produite est généralement adaptée aux besoins énergétiques par la charge .Ce système est généralement soutenu par des systèmes de stockage, pour stoker l'énergie excédentaire et fourniront de l'électricité lorsqu'il n'y a pas de lumière solaire. L'énergie excédentaire et fourniront de l'électricité

lorsqu'il n'y a pas de lumière solaire.

1.4.1.1.3 Systèmes photovoltaïques hybrides

- Un système photovoltaïque qui comprend d'autres sources de production d'électricité telles que renouvelables ou conventionnelles (combustibles fossiles). On peut considérer deux architectures électriques de systèmes hybrides basées sur l'existence ou absence de stockage.
- systèmes photovoltaïques avec stockage sont connectés à des sources d'énergie renouvelables (biomasse, turbine éolienne, etc).
- systèmes photovoltaïques sans stockage sont couplés avec des groupes électrogènes Un système hybride peut être relié au réseau, fonctionner en autonomie ou être soutenu par le réseau.

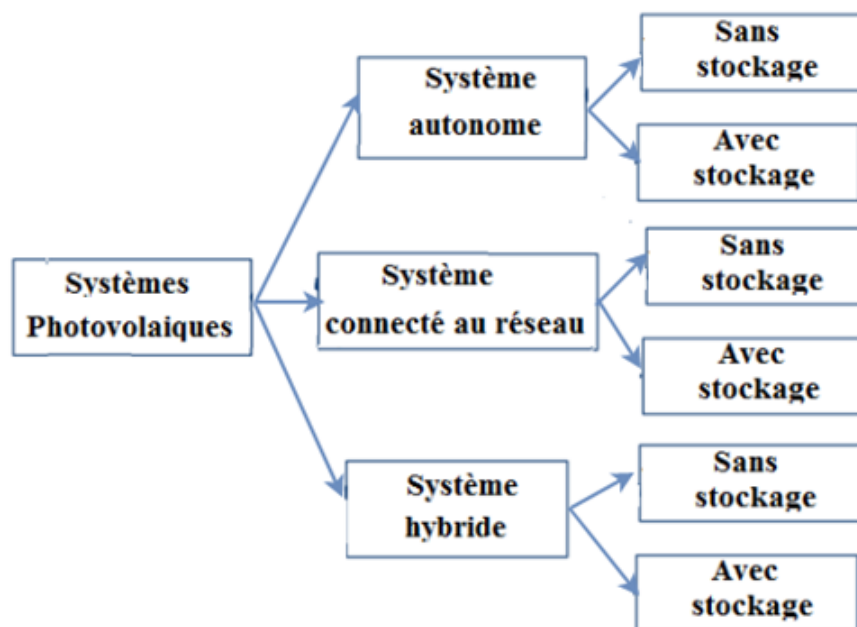


FIGURE 1.6 – différents types de systèmes photovoltaïques.

1.4.2 Générateur éolien (Aérogénérateur)

Les principaux composants d'un système de conversion d'énergie éolienne sont constitués d'une turbine, d'un système de transmission et d'un système électrique (modèle générateur). représentés sur la Figure 1.7 : Premièrement, Au niveau de la turbine L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par les pales montées sur le moyeu du rotor. Deuxièmement, le système de transmission transmet la puissance mécanique captée par le rotor au générateur

Chapitre 1. État de l'art des systèmes multisources

du système électrique. Troisièmement le système de transmission pour augmenter la vitesse du rotor à des valeurs plus adaptées à l'entraînement du générateur. Troisièmement, le générateur transforme la puissance mécanique en puissance électrique. Un dispositif de connexion, les dispositifs électroniques de puissance, qui sont généralement utilisés pour contrôler la puissance de sortie du générateur un dispositif de gestion global Il existe d'autres parties qui ne sont pas directement impliquées dans la conversion de puissance mais qui sont importantes pour assurer le fonctionnement correct, efficace et fiable du système. Exemples (capteurs, régulateurs, protections, etc.)

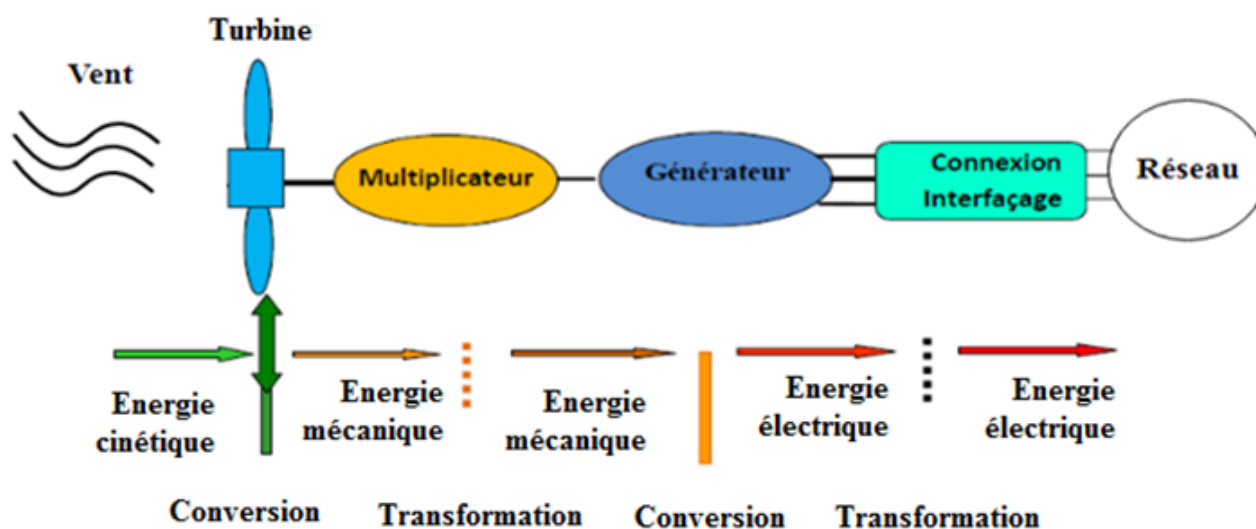


FIGURE 1.7 – Principe de la conversion d'énergie.

1.4.2.1 Classification des éoliennes

L'éolienne est l'un des éléments les plus importants des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Au fil des ans, différents types d'éoliennes ont été développés. Cette section donne un aperçu de la classification des éoliennes selon différents critères, à savoir : l'axe de rotation et de la capacité de puissance des turbines. Il peut également être classé en fonction du diamètre du rotor (m) et de la puissance nominale (KW)[26, 27], du modèle d'entraînement du générateur, le mode de régulation de la vitesse du rotor et de l'emplacement de l'installation de la turbine (localisation géographique) (voir Figure 1.8).

1.4.2.1.1 Selon l'axe de rotation

Lorsque l'on considère la configuration de l'axe de rotation des pales du rotor selon la disposition géométrique de l'axe sur lequel est montée l'hélice, les éoliennes peuvent être

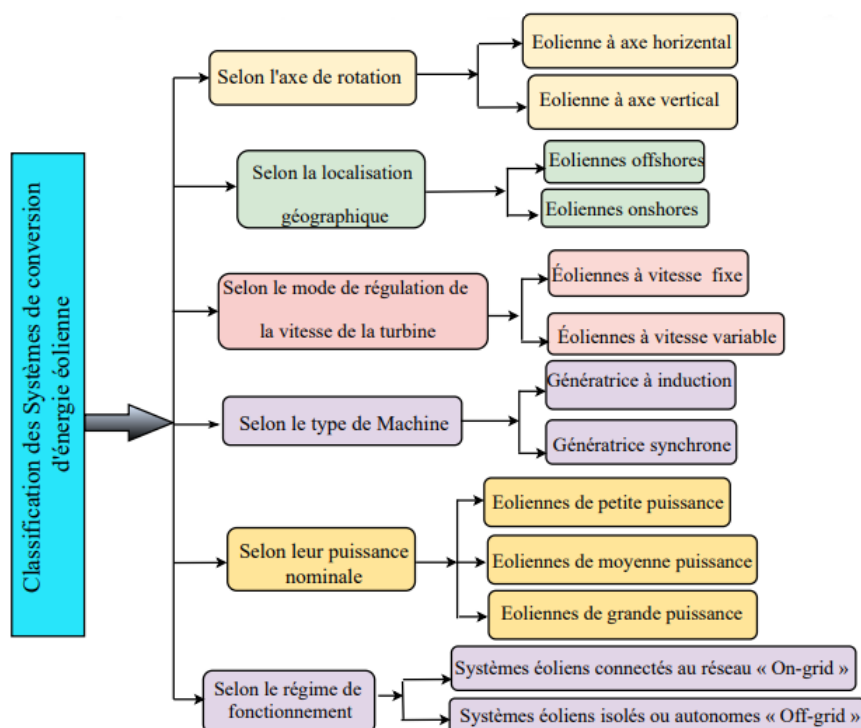


FIGURE 1.8 – Classification des systèmes de conversion d'énergie éolienne classée en deux groupes :

1.4.2.1.1.1 Eolienne à axe horizontal Les éoliennes à axe horizontal sont considérées comme une conception traditionnelle et ressemblent quelque peu aux moulins à vent historiques (voir Figure 1.9). Cette structure la plus utilisée et adaptée pour les applications de forte puissance que les éoliennes verticales. Ces turbines ont deux ou trois pales et sont généralement installées loin des agglomérations à une hauteur plus élevée pour profiter du vent fort et régulier. le grand avantage de cette eolienne est son rendement[28]. et Largement utilisé dans les applications onshore et offshore. L'inconvénient principal de ces eoliennes est qu'elles sont généralement plus lourdes et le bruit qu'elle engendrent.

1.4.2.1.1.2 Eolienne à axe vertical Une éolienne à axe vertical est une turbine dont l'axe de rotation est orienté dans le sens vertical ,ce type est caractérisé par un bon rendement même pour des vitesses faibles du vent .L'éolienne à axe vertical peut produire de l'électricité à partir du vent de n'importe quelle direction avec une faible vitesse de vent de démarrage.ne sont pas optimales pour une application de grande puissance.Ces éoliennes sont nettement plus silencieuses que les éoliennes traditionnelles à axe horizontal, légères et peuvent être facilement intégrées dans les bâtiments. Il a été prédit qu'elles pourraient être une solution efficace pour



FIGURE 1.9 – Eolienne à axe horizontal

les zones bâties où le vent est instable. Les conceptions d'éoliennes à axe vertical peuvent être classées en trois grandes familles Fig 1.10, à savoir Savonius , Darrieus et à axe vertical ("H" ou le rotor de Musgrove)[29].

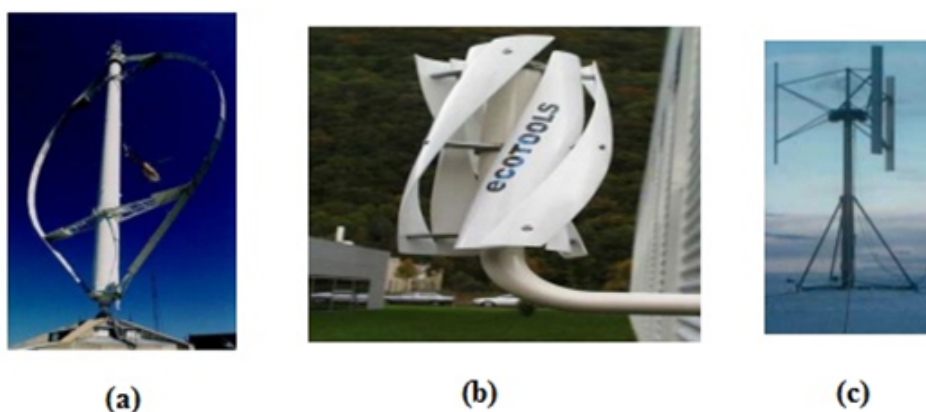


FIGURE 1.10 – Eolienne à axe horizontal : (a)Rotor Darrieus,(c)Rotor Hélicoïdal,(c)RotorDarrieus H

1.4.2.1.2 Selon la localisation géographique

Selon l'endroit où ces éoliennes sont installées, elles peuvent être réparties en deux groupes :

- Les éoliennes peuvent être installées en mer, on parle alors d'éoliennes offshore.
- Les éoliennes peuvent être installées sur la terre ferme, on parle alors d'éoliennes on-shore ou terrestres . Ces deux types ont le même aspect et le même principe de fonctionnement Les parcs éoliens de grande capacité sont traditionnellement installés à terre pour plusieurs raisons : construction facile, faible coût d'entretien et proximité des lignes de transmission. D'autre part, les parcs éoliens offshore sont également commerciale-

ment viables. L'une des principales raisons du développement des parcs éoliens offshore est le manque de ressources éoliennes appropriées sur terre. C'est particulièrement le cas dans les zones densément peuplées comme dans certains pays européens. Une autre raison importante est que la vitesse du vent en mer est souvent beaucoup plus élevée et plus stable que celle sur terre. Considérant que l'énergie obtenue par les éoliennes est proportionnelle au cube de la vitesse du vent, les turbines peuvent capter plus d'énergie lorsqu'elles fonctionnent en mer. De plus, l'impact environnemental, tel que le bruit audible et l'impact visuel, est minime dans les applications offshore. Ces facteurs sont les principaux moteurs du développement de la technologie des éoliennes offshore.

1.4.2.1.3 Selon les modes de régulation de la vitesse

Selon le mode d'exploitation de l'énergie aérodynamique et la vitesse de rotation du générateur ; les éoliennes peuvent être classées en deux catégories [30]

1.4.2.1.3.1 Éoliennes à vitesse fixe elles constituent les premières éoliennes qui ont été conçues. dans cette technologie, la génératrice électrique est directement couplée au réseau via un transformateur de couplage adaptant les niveaux de tensions , et donc, la vitesse de l'éolienne est imposée par la fréquence du réseau et le nombre de paires de pôles de la machine. Aucune commande en fréquence n'est nécessaire. Les éoliennes à vitesse fixe possèdent tout de même quelques avantages, soit la simplicité, l'utilisation d'une technologie peu coûteuse et le faible besoin de maintenance [31].

1.4.2.1.3.2 Éoliennes à vitesse variable Les éoliennes à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie et les applications de forte puissance. Le terme vitesse variable désigne le fait que la vitesse de rotation de la génératrice s'adapte à la vitesse du vent disponible assurant ainsi une extraction maximale d'énergie , quel que soit le profil du vent disponible. ce type de systèmes éoliens peut offrir un fonctionnement plus stable, face à des profils de vent stochastiques, en minimisant les oscillations au sein de la chaîne de transmission [32]. Le fonctionnement à vitesse variable de ces éoliennes, nécessite des convertisseurs statiques et leurs dispositifs de commande.

1.4.2.1.4 Selon le mode de fonctionnement

Selon le critère du mode de fonctionnement, les éoliennes peuvent être classées en deux en deux catégories [33].

Chapitre 1. État de l'art des systèmes multisources

1.4.2.1.4.1 Système autonome ou isolé « Off-grid » Les éoliennes peuvent fonctionner comme des unités autonomes de petite capacité électrique pour alimenter des villages, des fermes et des îles où l'accès au réseau électrique est éloigné ou coûteux. Étant donné que la puissance générée par le vent n'est pas constante, d'autres sources d'énergie sont normalement nécessaires dans les systèmes autonomes. Il est courant qu'un système d'énergie éolienne autonome fonctionne avec des générateurs diesel, des systèmes d'énergie photovoltaïque ou des systèmes de stockage d'énergie pour former un système de production distribuée plus fiable. En raison de ses applications limitées, l'énergie éolienne autonome ne représente qu'une petite fraction de la capacité éolienne totale installée dans le monde.

1.4.2.1.4.2 Système connectée au réseau électrique « On-grid » l'énergie produite par l'éolienne est injectée vers le réseau de distribution. que ce soit pour les parcs onshore ou offshore.

1.4.2.1.5 Selon la taille de l'éolienne

Le tableau 1.1 montre la classification standard des éoliennes selon la puissance nominale et la surface balayée par le rotor en fonction du diamètre de l'hélice. Les éoliennes sont divisées en quatre catégories [34].

TABLE 1.1 – classification des éoliennes selon la puissance nominale

Echelle	Diamètre de l'hélice / diamètre de la zone balayée	Puissance nominale
Micro	Moins de 3m	50W à 2KW
Petit	3m à 12m	2KW à 40KW
Moyen	12 à 45m	40KW à 999KW
Grand	46m et plus	Plus de 1MW

1.4.2.2 Les machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens

Le générateur électrique est l'unité qui convertit l'énergie mécanique de la turbine en énergie électrique. Les générateurs sont composés d'un stator, d'un rotor, d'un élément tournant et d'un élément statique. Différents types de générateurs sont expliqués ci-dessous (voir Figure 1.11).

1.4.2.2.1 Générateur asynchrone

Les générateurs asynchrones sont également appelés générateurs à induction. Le stator doit être connecté à une source d'alimentation externe pour démarrer la circulation du courant à travers les enroulements du stator. Ce courant tournant est envoyé au rotor à travers le court-circuit pour l'excitation initiale. Le courant du stator produit un flux magnétique rotatif, qui

aidera le rotor à tourner dans le même sens. Bien que le rotor tourne à une vitesse légèrement inférieure au champ magnétique, appelée vitesse de glissement [35]. Les générateurs à induction ne peuvent produire de l'électricité que lorsque le rotor tourne à une vitesse supérieure à la vitesse synchrone. La fréquence synchrone est généralement acceptée comme la fréquence du réseau d'alimentation. Pour chaque générateur, il existe une vitesse, qui correspond à cette fréquence, appelée vitesse synchrone. Cependant, les générateurs à induction ont la capacité de produire de l'énergie à différentes vitesses du rotor. Il existe deux types de rotors couramment utilisés, le rotor à cage d'écureuil et le rotor bobiné. Le rotor à cage d'écureuil a des barres longitudinales conductrices de courant autour de l'arbre qui sont reliées par des anneaux, qui ressemblent à une roue de hamster. Ces barres tourneront en accord avec le champ magnétique tournant du stator. Ce type de rotor est plus couramment utilisé aujourd'hui en raison du fait qu'il nécessite moins d'entretien et qu'il est moins coûteux à fabriquer [36]. Le générateur à induction à rotor bobiné est également appelé générateur à induction à double alimentation ou MADA. En effet, le rotor et le stator ont des enroulements qui participent au processus de conversion électrique. Des bagues collectrices et des balais relient électriquement les deux éléments pour transférer la puissance entre l'arbre du rotor et le système électrique. Ces bagues et balais sont la raison de l'entretien élevé requis pour ces générateurs.

1.4.2.2 Générateur synchrone

Les générateurs synchrones peuvent produire une puissance constante à une vitesse synchrone. Il y a moins d'entretien requis pour ces types de générateurs car ils ne nécessitent pas de bagues collectrices ou de brosses pour transférer l'électricité du rotor au système électrique. Il existe également différents types de rotors pour la famille des génératrices synchrones.

- Le type de rotor bobiné sans balai est une version modifiée du MADA où le rotor contient toujours des enroulements, mais il y a une source de courant continu interne pour commencer l'excitation. L'excitateur interne commencera la rotation du rotor, qui se verrouillera alors dans le flux magnétique rotatif du stator et continuera à tourner à la vitesse synchrone [37].
- Générateur synchrone à aimant permanent (GSAP) PMSG utilise un aimant permanent comme champ d'excitation au lieu d'une bobine électromagnétique. Ces types de générateurs ont tendance à être plus chers en raison du matériel nécessaire à leur fabrication. Cependant, le coût des matériaux continue de baisser et ils deviennent de plus en plus courants dans l'industrie de l'énergie en raison de leur grande fiabilité et de leur faible maintenance [31].

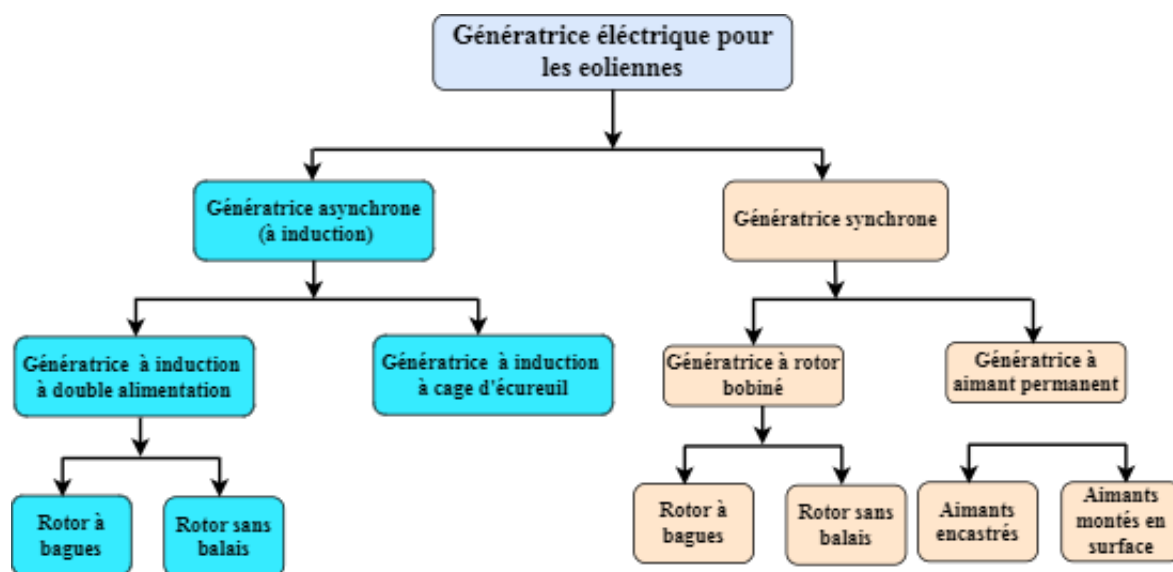


FIGURE 1.11 – Classification des génératrices électriques utilisées dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne.

1.4.3 Les systèmes de stockage

Le micro-réseau avec le système de stockage d'énergie (SSE) est devenu un composant prometteur pour le futur déploiement du réseau intelligent. Cependant, en raison de la nature intermittente des ressources d'énergie renouvelable et des profils de charge fluctuants, l'alimentation électrique du micro-réseau ne parvient parfois pas à atténuer les demandes de charge et provoque une fluctuation de la fréquence du système. Par conséquent, les sources d'énergie renouvelables fluctuantes doivent être lissées avec des systèmes de stockage pour fournir une qualité de puissance élevée. Le système de stockage d'énergie est classé en fonction de l'utilisation de l'énergie sous une forme spécifique. L'SSE peut être classé comme un système de stockage d'énergie mécanique, électrochimique, chimique, électrique, thermique et hybride. De plus, ces systèmes peuvent en outre être classés en fonction du processus de formation et des matériaux utilisés. Batteries, stockage d'énergie à air comprimé, stockage d'énergie du volant d'inertie, supercondensateur, stockage d'énergie magnétique supraconducteur, stockage d'hydrogène et stockages d'énergie hybrides (SEH) sont les technologies de stockage les plus fréquemment utilisées pour les applications Micro réseau.

1.4.3.1 Les batteries

Concernant les systèmes de stockage d'énergie électrochimique, les batteries sont les dispositifs les plus représentatifs, comme on peut le voir sur la figure 1.12. Leur principe de fonctionnement consiste à stocker de l'énergie sur un mode chimique. Ils sont composés de deux électrodes (cathode et anode) immergées dans un électrolyte où les réactions chimiques créent une tension

Chapitre 1. État de l'art des systèmes multisources

potentielle entre les électrodes, nécessaire pour permettre la circulation du courant électrique. Lorsque chaque électrode est plongée dans des électrolytes différents, ces électrolytes sont séparés par une membrane[38].

Lorsque le courant passe de l'anode à la cathode, la batterie est chargée. La batterie est déchargée lorsque le sens du courant est modifié, circulant de la cathode à l'anode. Il faut savoir qu'il existe de nombreuses technologies de différentes batteries : plomb-acide, hybride nickel-métal, lithium-ion, etc. Dans les sous-sections suivantes, nous présenterons, les différents types de de

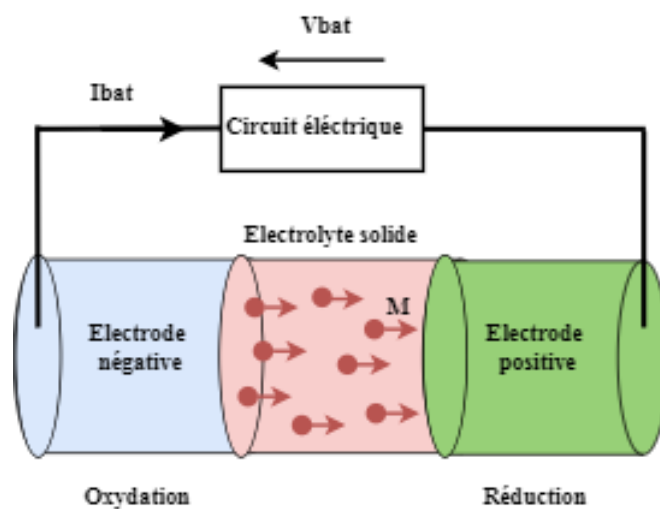


FIGURE 1.12 – Schéma de principe de la batterie.

stockage électrique-chimique (Batteries) et les différents dispositifs qui en découlent en fonction du composant chimique utilisé. Selon le type d'application, Il existe plusieurs types de batteries telles que Ni-métal hydrure (NiMH), plomb-acide, réduction-oxydation (redox), lithium-ion (Li-ion) et sodium-soufre (NaS). Les batteries au plomb, au lithium et au nickel sont principalement les trois types de technologies les plus couramment utilisées.

1.4.3.1.1 Les batteries au plomb-acide

La batterie plomb-acide(PbA) la plus ancienne est la plus largement utilisée dans l'industrie avec différentes tailles et conceptions dans les différentes applications. Parmi toutes les batteries à électrolyte, la batterie PbA présente un rendement élevé (70 % à 80 %) et possède la tension de cellule la plus élevée . La cathode et l'anode sont respectivement constituées de PbO_2 et de Pb . L'acide sulfurique est utilisé comme électrolyte. Ils sont moins chers que d'autres technologies de batteries, telles que NiCd et NiMh, et conviennent parfaitement aux applications de micro-réseaux à grande échelle [39, 40]. Les autres avantages de cette technologie sont que la batterie PbA offre une excellente rétention de charge et une densité d'énergie avec une réponse rapide et

Chapitre 1. État de l'art des systèmes multisources

un long cycle de vie (5 à 15 ans) [41]. Cependant, la batterie PbA traditionnelle a une courte durée de vie (500 à 2 000 cycles), une faible énergie spécifique, un entretien périodique de l'eau et une défaillance prématurée due à la sulfatation. Pour surmonter les limitations mentionnées, des batteries PbA avancées ont été développées, qui possèdent une capacité de gestion de puissance neuf fois supérieure et des cycles de vie quatre à dix fois plus longs.

1.4.3.1.2 Les Batteries au Lithium

Bien que les batteries lithium-ion aient été commercialisées pour la première fois dans les années 1990, cette technologie de stockage d'énergie est devenue la technologie à la croissance la plus rapide ces dernières années [42]. Un dispositif de stockage Li-ion peut stocker de l'énergie à l'échelle du mégawatt. Les batteries lithium présentent de nombreuses caractéristiques telles que le rendement élevé ($> 90\%$), de densité d'énergie élevée, de temps de réponse rapide (en millisecondes) et de taux d'autodécharge. des performances élevées et un long cycle de vie (3000 cycles) et une énergie spécifique plus élevée, variant de 100 à 200 Wh/kg [39]. La cathode et l'anode sont fabriquées respectivement à partir d'oxyde de lithium métallique (LiCoO_2) et de cellules de carbone graphite. Pendant la période de charge, le Li-ion passe de la cathode à l'anode. Le processus est inversé dans le cas de la période de décharge. L'électrolyte utilisé ici peut être formé à l'aide d'un solvant organique avec un sel de lithium dissous ou un polymère solide. Les inconvénients de la batterie Li-ion sont sa profondeur de cycle de décharge (DOD) et son coût élevé. Cependant, le coût de la cellule Li-ion devrait diminuer avec la production à grande échelle. Les batteries Li-ion sont conçues pour les applications à haute température et peuvent être utilisées dans diverses applications telles que les produits mobiles, les véhicules électriques.

1.4.3.1.3 Les batteries au Nickel-cadmium

Les batteries au nickel-cadmium (NiCd) se sont bien établies sur le marché comme les systèmes au plomb en termes de maturité (100 ans) et de popularité. Les batteries à base de nickel ont une densité de puissance plus élevée et une densité d'énergie légèrement supérieure (50–75 Wh/kg), et le nombre de cycles est plus élevé (> 3500 cycles) par rapport aux batteries au plomb. Les batteries NiCd sont constituées d'une cathode en oxyhydroxyde de nickel et d'une anode en cadmium immergées dans un électrolyte alcalin. Les batteries NiCd ont généralement un boîtier métallique avec une plaque d'étanchéité équipée d'une soupape de sécurité auto-obturante. Pendant le cycle de décharge, Ni(OH)_2 est le matériau actif de l'électrode positive et Cd(OH)_2 est le matériau actif de l'électrode négative. Pendant le cycle de charge, NiOOH est le matériau actif de l'électrode positive et le Cd métallique est le matériau actif de l'électrode négative. La batterie NiCd se trouve généralement sous deux formes différentes, selon l'application : sous sa forme scellée dans les équipements portables et sous sa forme inondée dans les applications industrielles.

Chapitre 1. État de l'art des systèmes multisources

générales. cette technologie ancienne .Elles se caractérise par une faible quantité d'énergie (45 et 85 Wh/kg) et une durée de vie d'environ 500 cycles, cette durée de vie peut être doublée si elles ne sont pas déchargées en dessous de 30. les batteries Nickel-Cadmium ont été améliorées pour donner les batteries Lithium-Polymère Métallique elle utilisent des électrodes en oxyhydroxyde de nickel et en hydrure métallique.D'une énergie spécifique autour de 60 Wh/kg, moins polluantes que le cadmium.

1.4.4 Générateur diesel

Un générateur diesel est une combinaison d'un moteur diesel avec un alternateur pour générer de l'énergie électrique (voir Figure 1.13)[43].

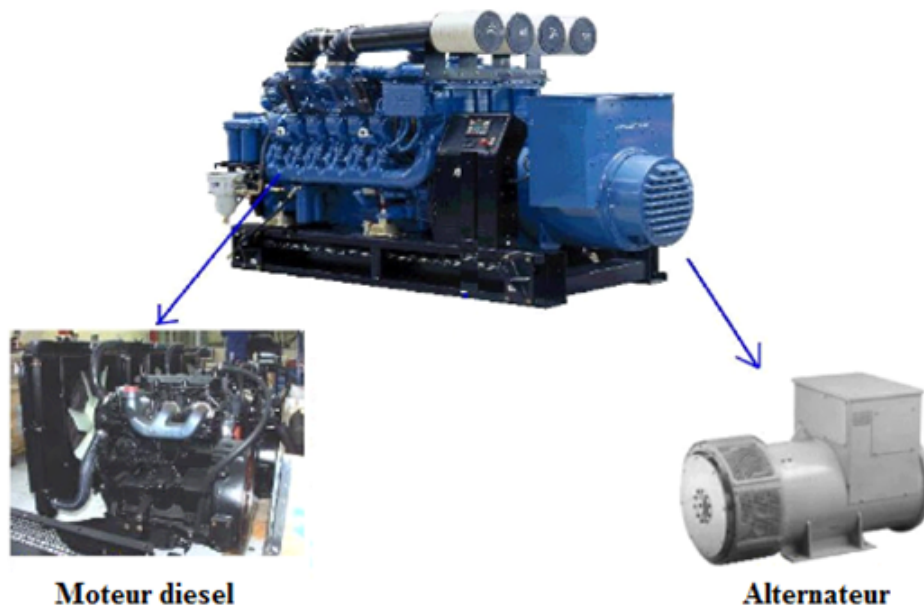


FIGURE 1.13 – Schéma de principe d'un générateur diesel.

Les cas les plus courants d'utilisation de générateurs diesel sont les suivants :

1. Si certains endroits ne sont pas connectés au réseau électrique.
2. Une alimentation électrique de secours en cas de panne du réseau.
3. Pour éviter une faible charge ou une crise d'alimentation.

1.4.4.1 Sélection du générateur diesel

Le générateur diesel doit être sélectionné de manière à répondre aux exigences de charge, mais fonctionne également en moyenne à des niveaux de charge élevée lorsque la puissance de

sortie du vent et du PV n'est pas suffisante pour faire fonctionner cette charge. La cote du générateur diesel doit être suffisamment grande pour atteindre ces tâches.

1.4.4.2 Dimensionnement du générateur diesel dans un système hybride

Le dimensionnement optimal de l'unité d'un générateur diesel nécessite un examen attentif de plusieurs facteurs, notamment une analyse détaillée des fluctuations de charge quotidiennes et saisonnières, de la croissance annuelle de la charge et de l'incorporation de contraintes pratiques pour un fonctionnement diesel réalisable et fiable.

1.4.4.3 Avantages et inconvénients du générateur diesel

L'utilisation du générateur diesel présente les avantages suivants :

- Dans les zones qui ne sont pas connectées au réseau électrique.
- Si le réseau ne fournit pas la demande de puissance souhaitée.
-

Le groupe électrogène diesel présente les inconvénients suivants.

- Il est lourd et difficile à manœuvrer.
- Bruyant.
- Faible efficacité

1.4.4.4 Applications des groupes électrogènes

Les groupes électrogènes diesel sont des équipements qui fonctionnent soit :

- en régime isolé, dans les zones où il n'y a pas de possibilité de se connecter au réseau (par exemple, l'alimentation en énergie électrique des ménages, des chalets, des maisons de vacances, des objectifs isolés, des équipements dans les sites industriels, des installations électriques pour les événements de divertissement en plein air, des équipements militaires, télécommunications, etc.), ou comme régime d'urgence, comme source d'énergie électrique de réserve, en cas de panne d'électricité.
- En régime d'urgence(secours), les groupes électrogènes diesel ne fournissent généralement que des consommateurs vitaux, comme les pompes à incendie, les ascenseurs, les installations d'éclairage de sécurité, les banques, les hôpitaux, les bâtiments gouvernementaux, les bureaux, supermarchés et grands restaurants, hôtels, centres commerciaux, stades, aéroports, stations-service, maisons particulières et sites industriels où des processus spécifiques ne permettent pas de coupures de courant, qui deviennent incontrôlables ou génèrent des pertes importantes sans alimentation électrique, etc. Habituellement, en parallèle des groupes électrogènes diesel, on utilise des systèmes d'ali-

Chapitre 1. État de l'art des systèmes multisources

mentation sans coupure, avec un rôle de tampon, capables d'assurer pendant de courtes périodes la continuité de l'alimentation des consommateurs vitaux, jusqu'au démarrage des groupes électrogènes diesel.

- Dans le cas des systèmes électriques basés sur les énergies renouvelables, compte tenu du caractère fluctuant des sources d'énergie non conventionnelles (par exemple l'énergie éolienne ou solaire), les groupes électrogènes diesel revêtent une importance particulière, leur rôle étant d'assurer la continuité de l'alimentation électrique du réseau local pendant périodes où les sources d'énergie renouvelables deviennent indisponibles ou insuffisantes.

1.4.4.5 Constitution d'un générateur diesel

L'étude du générateur diesel se subdivise généralement en deux grands composants principaux :

- Un moteur diesel transformant par combustion interne l'énergie primaire en énergie mécanique.
- Un générateur synchrone ou alternateur transformant l'énergie mécanique développée par le moteur thermique en énergie électrique.

1.4.4.5.1 Le moteur diesel :

L'élément principal dans la construction du groupe diesel est le moteur diesel. ce dernier transforme l'énergie chimique du carburant en énergie mécanique. pour libérer efficacement l'énergie chimique du diesel le carburant est mis en contact sous forme pulvérisé avec de l'air à haute température et à haute pression cette énergie est transférée avec efficacité sous la forme d'une énergie mécanique par rotation. Le cycle de fonctionnement du moteur diesel se décompose en quatre temps : admission, compression, injection (explosion) et échappement (voir Figure 1.14).

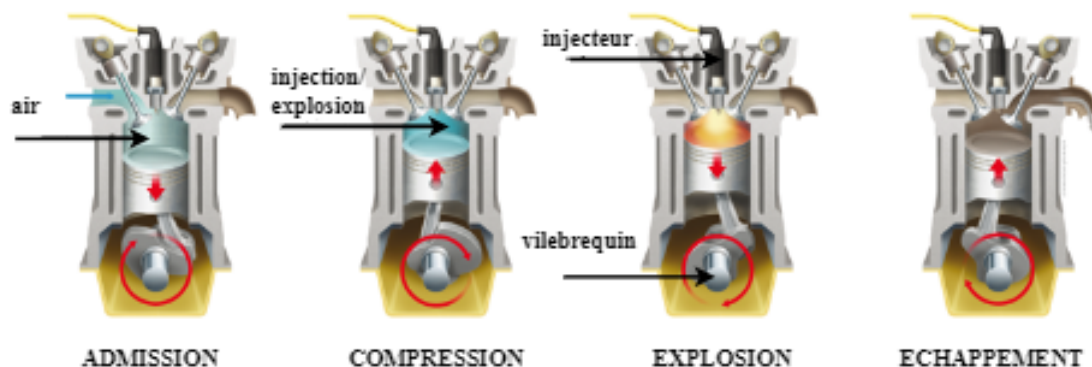


FIGURE 1.14 – Schéma de principe d'un moteur diesel à quatre temps.

la production du couple mécanique se fait suivant les quatre étapes suivantes :

Chapitre 1. État de l'art des systèmes multisources

1. **L'aspiration (ou admission) :** La soupape d'admission est ouverte et celle d'échappement est fermée. Le piston descend, aspirant ainsi l'air frais qui se trouve dans la tuyauterie d'admission.
2. **La compression :** La soupape d'admission se ferme et le piston remonte en comprimant l'air contenu dans le cylindre (chambre de combustion). Il en résulte un échauffement de l'air qui est emmené à une température favorisant l'explosion.
3. **L'injection (explosion) :** Un injecteur projette sous haute pression du gazoil dans la chambre de combustion. Il s'en suit une auto-inflammation explosive du mélange, qui produit une détente brusque du gaz contenu dans la chambre de combustion. Le piston redescend alors, poussé par la pression de l'explosion. Ce troisième temps est généralement appelé temps moteur.
4. **L'échappement :** La soupape d'échappement s'ouvre et le piston remonte en poussant les gaz brûlés vers la tuyauterie d'échappement.

Contrairement à un moteur diesel d'automobile, le moteur diesel doit fonctionner à vitesse constante et couple variable. En effet la fréquence des tensions produites par le générateur respecte la loi[44] :

$$\omega_{syn} = \frac{\omega_e}{P_p} \quad (1.1)$$

Où ω_{syn} est la vitesse angulaire (vitesse synchrone) de l'arbre de la turbine diesel, $\omega_e = 2.\pi.f$ est la pulsation des courants statoriques de la génératrice synchrone du groupe, et P_p est le nombre de paires de pôles de la génératrice.

1.4.4.5.1.1 Le choix de l'énergie primaire du moteur diesel Le moteur du groupe électrogène doit correspondre à plusieurs critères en fonction de son utilisation. Selon ces critères, le moteur sera choisi en fonction de l'énergie nécessaire à son fonctionnement :

- **Groupe électrogène diesel :** puissant et fiable, mais lourd et encombrant.
- **Groupe électrogène essence :** léger et performant, mais à consommation élevée.
- **Groupe électrogène gaz :** puissant et silencieux, mais nécessite un approvisionnement GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié).

1.4.4.5.2 Alternateur :

C'est une machine à courant alternatif qui développe une puissance électrique de sortie exprimée en kVA correctement calibrée. Les machines utilisées dans les groupes électrogènes sont ordinairement des machines synchrones à excitation bobinée. Certes, ce type de machine

possède un bon rendement et une assez bonne puissance massique mais la fragilité des bagues et balais . ou machines synchrones à aimants permanents. Ces générateurs sont plus performants que les machines synchrones classiques et plus simples, car ils ne nécessitent pas d'excitation extérieure . Le bon fonctionnement d'un groupe électrogène diesel est assuré par deux composants principaux, le régulateur de vitesse et le régulateur de tension. La performance de ces composants est vitale pour le fonctionnement et l'utilisation des groupes électrogènes diesel, leur but étant de maintenir précisément les paramètres imposés de la puissance électrique (tension et fréquence). Le régulateur de vitesse est conçu pour maintenir constante la vitesse du moteur à combustion interne en modifiant la quantité de carburant consommée par le moteur. Le résultat direct de cette régulation de vitesse est une fréquence de tension stable aux bornes du générateur (puisque la fréquence est proportionnelle à la vitesse du générateur). Une fréquence constante nécessite une bonne précision et un temps de réponse court du régulateur de vitesse. Le régulateur de vitesse commence à réguler lorsque diverses charges électriques sont connectées ou déconnectées aux bornes du générateur. Il existe de nombreux systèmes de régulation de vitesse, des systèmes à ressort les plus simples aux systèmes hydrauliques et électroniques complexes capables de réguler dynamiquement la soupape d'admission de carburant pour maintenir la vitesse constante dans une plage donnée avec des temps de réponse aux changements de charge inférieurs à 1 -3 secondes. Le rôle principal du régulateur de tension est de contrôler la tension aux bornes du générateur et de la maintenir constante en limitant le plus rapidement possible les pics de tension et les surtensions qui surviennent du fait des variations de charge. La quantité sur laquelle agit le régulateur de tension est le courant d'excitation qui modifie l'amplitude de la tension aux bornes du générateur

1.5 Les Systèmes de supervision

L'efficacité du système de gestion de l'énergie dépend de l'architecture de contrôle du système de gestion de l'énergie et de l'approche adoptée, Généralement, la structure de contrôle du système d'énergie renouvelable pour la gestion d'énergie sont divisées en trois grandes catégories[18] ; Contrôle centralisé, distribué, et l'architectures de contrôle centralisé , distribué ,et hybride. Dans les trois catégories, chaque ressource d'énergie renouvelable possède son propre contrôleur local (contrôleur esclave) qui détermine le fonctionnement optimal de l'unité en fonction des informations actuelles. , Les trois architectures de contrôle du système de gestion de l'énergie sont décrites ci-dessous :

1.5.1 Les Système de supervision centralisée

Les approches de contrôle centralisé permet à toutes les différentes entités de collaborer avec le contrôleur central de gestion de l'énergie tout en garantissant un fonctionnement flexible

Chapitre 1. État de l'art des systèmes multisources

du Micro réseau dans les modes connecté au réseau et autonome . Le contrôleur central collecte des données de toutes les unités d'énergie, telles que les sources, charges, stockage ,convertisseurs ,le prix de l'énergie des opérateurs du marché et les conditions météorologiques , puis prend les décisions afin de gérer différentes entités du système pour assurer une opération optimale et efficace du système (voir Figure 1.15). La structure de contrôle centralisée est la mieux adaptée à la gestion de l'énergie multi objectifs dans un système d'énergie renouvelable qui converge vers des valeurs optimales globales en fonction des informations disponibles. Cependant, cette structure de contrôle souffre d'un temps de calcul important et peut parfois être sujette à des défaillances ponctuelles.

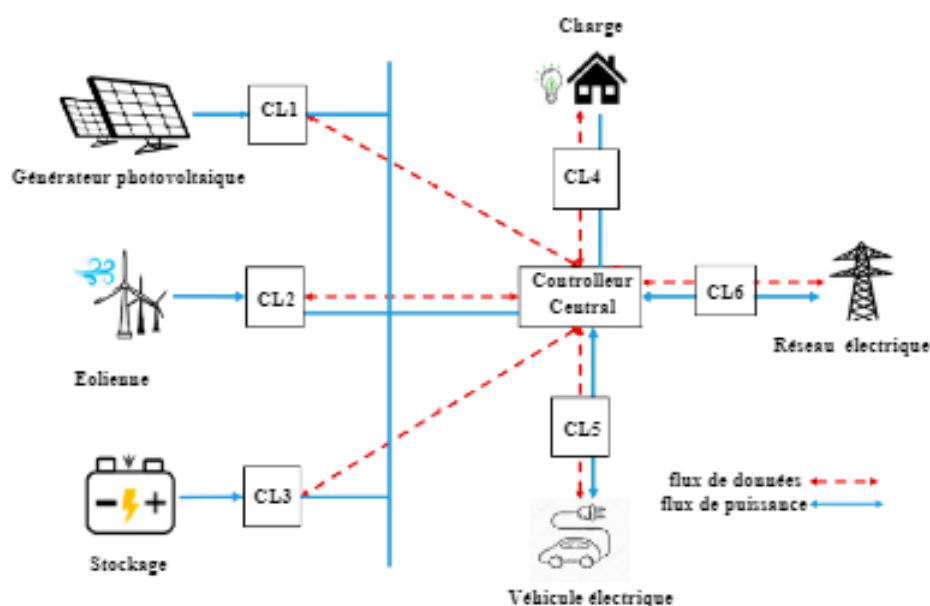


FIGURE 1.15 – Architecture du système de supervision centralisé [45]

1.5.1.1 Les systèmes de supervision distribuée

dans un Système de supervision distribuée, chaque source d'énergie envoie des signaux de mesure à leur unité de commande locale correspondante, comme illustré à la Figure 1.16. Les contrôleurs locaux communiquent entre eux pour prendre les décisions appropriées pour atteindre les objectifs visés. Dans ce schéma, la charge de calcul de chaque contrôleur local est considérablement réduite sans aucun problème de défaillance ponctuelle [46, 47]. Cependant, cette structure de contrôle présente l'inconvénient d'un système de communication complexe entre les contrôleurs locaux. le système multi-agents (SMA) est l'une des approches les plus prometteuses pour les schémas de contrôle distribués. Un système multi-agents a été largement utilisé pour l'intégration des sources d'énergie, restauration et reconfiguration et gestion énergétique des systèmes intégrés.

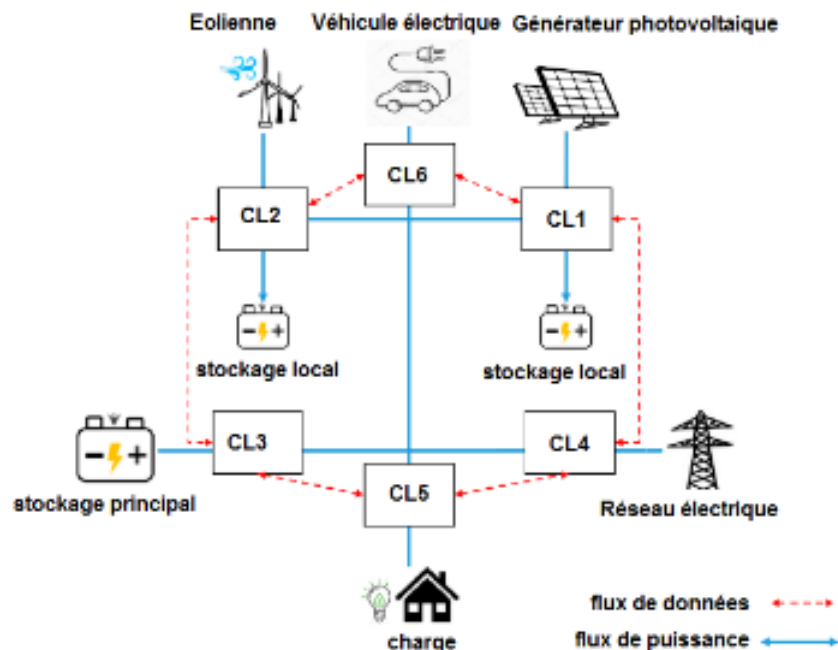


FIGURE 1.16 – Architecture du système de supervision distribué [45].

1.5.2 Les systèmes de supervision hybride :

les systèmes de supervision hybride représentent une combinaison des deux types d'architectures mentionnés précédemment centralisés et distribués. Dans le schéma de contrôle hybride, les sources d'énergie renouvelables sont regroupées dans un système intégré [47, 48]. Un schéma de contrôle centralisé est appliqué au sein de chaque groupe et un schéma de contrôle distribué est utilisé pour assurer la coordination de chaque groupe. Dans un tel schéma de contrôle hybride, l'optimisation locale est obtenue grâce à un contrôle centralisé au sein du groupe et l'optimisation globale entre différents groupes de sources d'énergie est obtenue par un contrôle distribué. le principal avantage de ce système est la réduction le temps de calcul sur les deux contrôleurs centralisés et locaux , minimise les problèmes de défaillance ponctuelle dans le micro réseau . Un schéma de contrôle hybride est illustré à la Figure 1.17 .

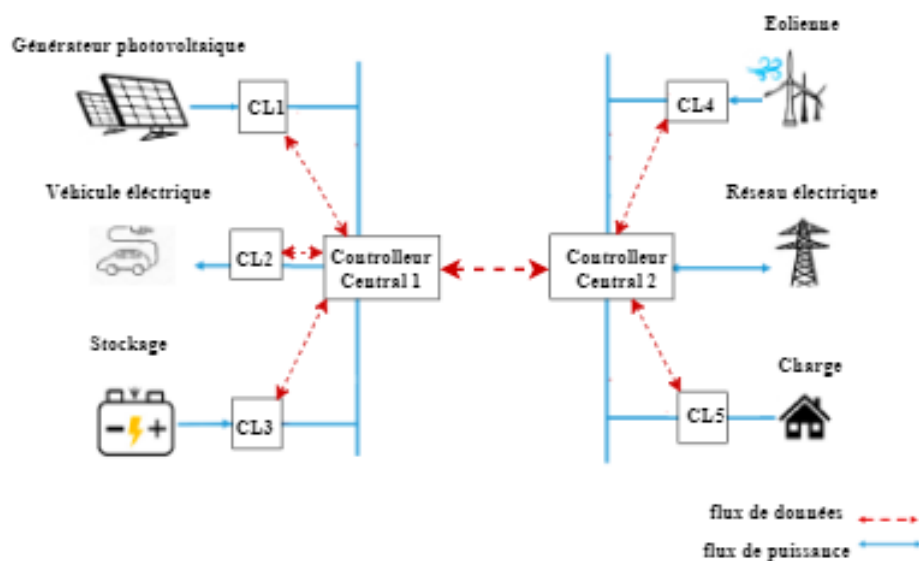


FIGURE 1.17 – Architecture du système de supervision hybride .

1.6 Les Outils de dimensionnement du système hybride

Les outils de dimensionnement sont des petits logiciels compilés conçus pour le dimensionnement et évaluer le comportement global des systèmes d'énergies hybride. plusieurs logiciels sont développés par différentes institutions pour l'analyse des systèmes d'énergies hybrides. Parmi les logiciels les plus utilisés, on trouve :

1.6.1 HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewable)

HOMER est un logiciel très populaire et commercial développé par le NREL (laboratoire national des énergies renouvelables). permet d'optimiser la conception optimale des systèmes énergétiques et étudier les performances des aspects techniques et économiques des systèmes électriques autonomes et connectés au réseau. Une variété de composants SERH peuvent être modélisés dans HOMER tels que les éoliennes, les réseaux solaires photovoltaïques, les piles à combustible, les petites centrales hydroélectriques, la biomasse, le convertisseur, le système de stockage, les batteries et les générateurs diesel/conventionnels. Son processus d'optimisation comprennent trois étapes : simulation, optimisation et analyse de sensibilité [49]. Les étapes de simulation et d'optimisation sont effectuées simultanément, et l'incertitude et/ou le changement

des variables d'entrée sont principalement analysés dans un processus de sensibilité [50]. De plus, comme l'algorithme et le processus de calcul impliqués dans le logiciel ne sont pas visibles, le système n'est pas assez intuitif et les utilisateurs ne peuvent pas modifier la spécification des composants [51].

1.6.2 Hybrid2

HYBRID 1 a été développé en 1994 par l'Université du Massachusetts aux États-Unis avec Plus tard, HYBRID 2 a été conçu en 1996 et maintenant 1.3b est la dernière version d'HYBRID qui est disponible gratuitement pour le téléchargement et l'utilisation, avec un mot de passe pour l'installation sur la version Windows XP [52]. Il utilise la plate-forme Microsoft Visual BASIC pour la programmation et la base de données Microsoft Access. HYBRID 2 utilise une méthode statistique pour les calculs et effectue une analyse économique et une évaluation à long terme et des prévisions des systèmes hybride divers. Le pas de calcul du logiciel est de 10 min à 1 h, de sorte que La simulation réalisée par HYBRID2 est plus précise que celle réalisée par HOMER . Le système peut comporter des générateurs diesel AC et DC, des systèmes de distribution AC et DC, des sources d'énergie renouvelables, des charges, des convertisseurs, un stockage d'énergie, un contrôle de supervision. Des piles à combustible avec des réservoirs d'hydrogène et des électrolyseurs peuvent également être conçues dans ce logiciel. Le logiciel HYBRID2 comprend quatre composants, à savoir l'interface utilisateur graphique (GUI), le module de simulation, le module économique et l'interface graphique des résultats (GRI).

- Le logiciel dispose de fichiers de données pour diverses ressources, mais le logiciel manque de flexibilité car il a un accès limité aux paramètres.
- Bien que HOMER soit le logiciel le plus recommandé par NREL pour l'optimisation et que d'autres améliorations puissent être apportées à la conception en utilisant HYBRID2 [53].

1.6.3 RETScreen

RETScreen est un outil de calcul de faisabilité développé par le ministère des Ressources naturelles du Canada en 1998 pour les applications connectées au réseau, autonome, et les systèmes hybrides. Il peut évaluer les calculs de coûts et d'émissions pour diverses combinaisons de sources renouvelables [52]. Sa base de données contient des données climatiques mondiales de 6000 stations terrestres, des données de température annuelles, des cartes de ressources en énergie éolienne, des données hydrologiques, etc. La base de données climatiques de la NASA est également accessible avec un lien. RETScreen 4 et RETScreen Plus sont deux versions de RETScreen. RETScreen 4 est un logiciel analyses technique et financière de projets d'énergie propre sur Microsoft excel

[54]. RETScreen Plus est utilisé pour l'analyse des performances à l'aide d'un outil de gestion de l'énergie. Grâce au logiciel basé sur Excel, il est facile à utiliser pour l'évaluation technico-économique, mais le principal inconvénient du système est qu'il ne peut pas importer les données ou les fichiers, pas de fonction de visualisation. Il ne prend pas en charge les calculs plus avancés .

1.6.4 RAPSIM

RAPSIM est développé à l'Institut des réseaux et systèmes embarqués de l'Université Alpen Adria, Klagenfurt. Le logiciel est très flexible et convivial grâce à l'interface utilisateur graphique (GUI). Les utilisateurs avancés ayant des compétences en programmation peuvent modifier le modèle en fonction de leurs besoins. Java est le langage utilisé. Il peut fonctionner sous Windows, Linux ou MacOS [55]. Aucune mise à jour de ce logiciel n'est connue. Il s'agit d'un logiciel de simulation de micro-réseau gratuit et open-source pour une meilleure compréhension du comportement du flux d'énergie dans les micro-réseaux intelligents avec des sources renouvelables. Il est capable de simuler des micro-réseaux connectés au réseau ou autonomes avec des sources d'énergie solaire, éolienne ou autres renouvelables. Le logiciel proposé calcule la puissance générée par chaque source dans le micro réseau, puis effectue une analyse du flux de puissance. Ce logiciel est utile pour le placement optimal des unités de production distribuées dans un micro-réseau.

1.6.5 HOGA (Hybrid Optimization by Genetic Algorithms)

HOGA est un logiciel qui utilise les algorithmes génétiques pour l'optimisation des problèmes d'optimisation .développé par le Département de génie électrique de l'Université de Saragosse (Espagne). iHOGA (improved hybrid Optimization by Genetic Algorithm) est la nouvelle version de HOGA. Il fonctionne sur la plate-forme Windows XP ou Vista. Deux versions d'iHOGA sont disponibles, la version EDU et la version PRO. La version EDU est un logiciel éducatif pour la formation qui est disponible gratuitement avec certaines limitations. La version PRO est utilisée pour l'activité de recherche et c'est une version payante. Ce logiciel permet l'optimisation de système solaire photovoltaïque, éolien, batterie, générateur Diesel, générateur de biomasse. iHOGA est disponible en anglais. Il a deux versions, à savoir PRO + et EDU. La version EDU est téléchargeable gratuitement. Cependant, il ne peut simuler qu'une charge quotidienne maximale de 10 kWh .iHOGA utilisée pour le dimensionnement optimal d'un système hybride d'énergie , ce logiciel permet d'optimiser les systèmes dimensionnés. La nouvelle version iHOGA permet d'optimiser la durée de vie et le rendement d'un système hybride à sources d'énergie renouvelables, l'analyse de sensibilité, les nouvelles contraintes, Le programme permet une optimisation mono-objectif et multi-objectif des systèmes hybrides d'énergie renouvelable. Il conçoit des sources

d'énergie renouvelables avec précision pour l'analyse économique et de probabilité, les émissions de carbone pour le cycle de vie du projet sont également calculées. l'inconvénient principal de la version EDU de HOGA est qu'elle nécessite une connexion Internet pour l'activation de la licence. Outre les outils commerciaux pour le dimensionnement susmentionnés sont TRNSYS, HYDRO GEMS, General Algebraic Système de modélisation (GAMS), Opt Quest, LINDO, WDILOG2, Simulation de systèmes d'énergie photovoltaïque (Sim Pho Sys), Optimisation des systèmes hybrides renouvelables connectés au réseau (GRHYSO) et H2RES.

1.7 Les Stratégies de gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides

La complexité des systèmes hybrides rend la prise de décision difficile. Toutefois, une stratégie de gestion d'énergie est nécessaire pour exploiter efficacement les différentes sources d'énergie. Par conséquent, prolonger sa durée de vie et optimiser au mieux la répartition de la puissance d'une manière optimale entre les différents éléments qui constituent le SEH tout en assurant l'amélioration de leurs performances. la gestion de l'énergie devrait permettre de protéger le système de stockage contre les surcharges et les décharges profondes et de minimiser le coût du système et diminuer les émissions des gaz toxiques. Dans cette section , nous nous intéressons à évaluer la stratégie de contrôle optimale qui nous donnera la meilleure répartition possible des flux de puissance au sein du système hybride. Après avoir présenté les grandes familles de méthodes de gestion connues, En outre, elle présente les algorithmes de la littérature tout en surlignant leurs avantages et limites. Nous commençons par présenter les Stratégies de gestion à base de règles et leur importance pour la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides Les stratégies de gestion de l'énergie pour un système hybride peuvent être classées en deux grandes familles(voir 1.18)[56, 57, 58] :

- Les stratégies basées sur des règles prédéfinies .
- Les stratégies basées sur l'optimisation .

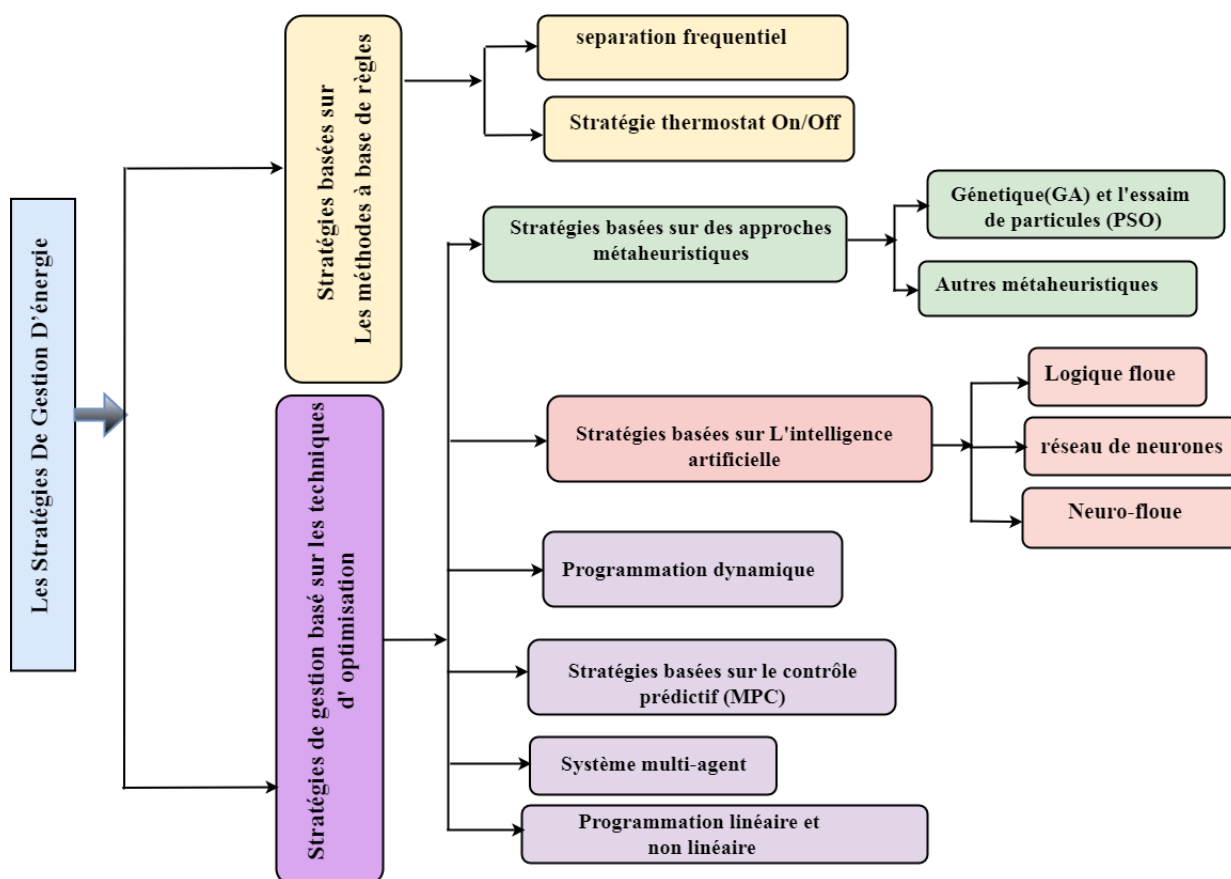


FIGURE 1.18 – Les stratégies de gestion des SEH.

1.7.1 Les stratégies de gestion à base de règles

Les stratégies basées sur des règles sont des algorithmes où les décisions sont prises sur la base de l'état actuel du système. La stratégie basée sur les règles (RBS) énonce un ensemble de conditions, couramment implémentées comme des phrases SI -CONDITION-ALORS, afin de définir les paramètres de contrôle. Ces stratégies se caractérisent par un comportement combinatoire, c'est-à-dire que les décisions sont prises par rapport aux informations courantes de l'application, en négligeant les informations passées ou les estimations futures liées à l'application. Des stratégies basées sur des règles ont été utilisées pour gérer l'énergie provenant de différentes ressources. La plupart des chercheurs ont convenu que les approches de contrôle basées sur des règles sont bien adaptées à une gestion efficace de l'énergie.

Ce type de stratégie de gestion de l'énergie est largement implémenté dans certaines applications photovoltaïques par exemple, la gestion de l'énergie est basée sur des stratégies relativement simples. La stratégie de gestion de l'énergie vérifie la différence entre la production d'énergie du

PV et la puissance de charge afin de définir les paramètres de contrôle du système de stockage d'énergie [59].

1.7.1.1 Séparation fréquentielle

Dans les stratégies de gestion de l'énergie basées sur la séparation fréquentielle, les paramètres de contrôle sont définis en fonction de la dynamique de la puissance consommée par l'application (charges) et de la capacité de réponse des différentes sources d'alimentation (alimentations et systèmes de stockage d'énergie). L'idée est de diviser les besoins en puissance de l'application dans le domaine fréquentiel, en mettant en œuvre des filtres passe-bas afin de filtrer la consommation électrique instantanée du système. Chaque source fonctionne dans sa gamme de fréquences la plus appropriée[12, 60]. Ensuite, les paramètres de contrôle sont définis en fonction de ces exigences et en tenant compte de la dynamique des sources d'alimentation. L'objectif est d'éviter tout dommage dans les sources d'alimentation. Les stratégies basées sur la séparation fréquentielle sont généralement implémentées dans des applications composées de systèmes de stockage d'énergie hybrides. Une application possible peut être implémentée dans les applications éoliennes avec des systèmes de stockage d'énergie composés de batteries et de supercondensateurs, attribuant une dynamique faible aux batteries et une dynamique élevée aux supercondensateurs [61].

- [62] les auteurs ont proposé deux stratégies de gestion d'énergie pour un système hybride dédié à une application d'un ascenseur. l'une est basée sur l'algorithme intelligent par réseaux de neurone et l'autre basé sur la séparation fréquentielle. Le système multi-source proposé comprend un générateur photovoltaïque comme source principale supportée par un banc de batteries et un empilement de super condensateurs (Supercapacitors- SC). L'objectif consiste à diriger la composante basse fréquence de la puissance résultante vers la batterie et sa composante haute fréquence vers le supercondensateurs.
- [63] les auteurs présentent une stratégie de séparation de fréquence pour un système hybride basé sur des systèmes photovoltaïques, éoliens et à pile à combustible destinés à alimenter des appareils résidentiels. Comme les charges domestiques sont généralement caractérisées par un profil spécifique, le système hybride comprend des batteries utilisées pour supporter des variations importantes et rapides de la demande de charge. un filtre passe-bas à réponse impulsionnelle infinie est conçu pour affecter la basse fréquence de charge au FC et la haute fréquence aux batteries.

1.7.1.2 La stratégie Thermostat ou On/Off

La stratégie Thermostat est l'une des méthodes de supervision utilisée pour la gestion de l'énergie dans les micro-réseaux des véhicules hybrides[58].

1.7.2 Les stratégies de gestion basé sur les techniques d'optimisation

Dans la section suivante, quelques exemples de stratégies de gestion de l'énergie utilisées dans les applications ont été présentées et analysés. Ces stratégies de gestion sont capables de contrôler les applications, mais elles ne garantissent pas un comportement optimal du système. Le comportement optimal de l'application pourrait être atteint en appliquant des méthodes d'optimisation aux stratégies de gestion [64, 65]. Dans cette section, les principales méthodes d'optimisation appliquées aux stratégies de gestion de l'énergie sont décrites. Toutes les techniques d'optimisation sont composées de trois éléments :

- Fonction d'objectif ou de coût : C'est un élément de mesure qui sert à quantifier la qualité des résultats ou des solutions. Toutes les solutions calculées sont comparées afin de minimiser ou de maximiser cette fonction de coût et de définir la meilleure solution pour le problème d'optimisation.
- Variables : Ce sont les éléments du système qui peuvent être modifiés par le processus d'optimisation afin d'obtenir une famille de solutions potentielles du problème d'optimisation.
- Contraintes : elles représentent les restrictions ou limites des variables système et sont représentées sous forme d'inéquations ou d'équations.

1.7.2.1 Les stratégies basé sur l'intelligence artificiel

1.7.2.1.1 Les Réseaux de Neurones Artificiels

Une autre stratégie intéressante pour la gestion d'énergie dans les systèmes hybride basée sur l'intelligence artificielle les réseaux de neurones artificiels (RNA). Ces derniers sont capable de reproduire des calculs complexes semblables à ceux qu'effectue le cerveau humain. Les réseaux de neurones possède de nombreuses capacités pour les systèmes complexes, telles que la prédiction, la modélisation et le contrôle des performances. Après avoir présenté les RNA, nous exposons par la suite quelques exemples de son application à la gestion de l'énergie dans les systèmes multisources. Jaganmohan Reddy and Pavan Kumar [66] ont proposé un modèle de gestion de l'énergie de prévision de charge d'un micro-réseau qui a prédit des prévisions à court, moyen et long terme. Le réseau de neurones artificiels (RNA) a été utilisé dans cette étude pour évaluer les prévisions statistiques en temps réel des micro-réseaux dans diverses situations, telles que quotidiennes, saisonnières et annuelles. L'algorithme de rétropropagation de Levenberg-Marquardt a été utilisé pour former les couches de réseau de neurones artificiel, ce qui a amélioré la coordination entre les micro-réseaux à divers endroits. MATLAB/Simulink a été utilisé pour créer ce modèle. [67] a proposé Un gestionnaire d'énergie intelligent basé sur les algorithmes des réseaux de neurone d'un

système de dessalement à osmose inverse alimentée par un système hybride éolien-PV associé à un parc de batteries. [62] les auteurs ont présenté une technique de supervision énergétique d'un système hybride dédié au pilotage d'un ascenseur. En effet, la multi-source comprend un générateur photovoltaïque comme source principale supporté par un banc de batteries et un empilement de super condensateurs (SC).

1.7.2.1.2 La Logique Floue

Les stratégies de gestion de l'énergie basées sur la logique floue (FL) sont fréquemment utilisées en raison de leur simplicité d'implémentation. FL sont capables de définir des paramètres de configuration pour des situations où l'information a un degré d'incertitude élevé. L'information ne peut pas être quantifiée de manière absolue et elle est relativement quantifiée entre deux valeurs (appelées règles heuristiques), devenant une information subjective. Cette stratégie de contrôle est divisée en trois étapes. Premièrement, l'information subjective est extraite dans le processus de fuzzification à partir de variables mesurables. Ensuite, ces informations subjectives sont comparées à des règles heuristiques. Pour terminer, le processus de défuzzification est effectué, en définissant les paramètres de contrôle à partir du résultat obtenu dans des règles heuristiques. Ces stratégies de gestion de l'énergie sont généralement exécutées en ligne. Ils nécessitent un faible coût de calcul pour réaliser les trois étapes de l'algorithme. Le processus de fuzzification et de défuzzification est composé d'opérations arithmétiques et les règles heuristiques sont implémentées avec des phrases SI-CONDITION-ALORS[12, 68]. Néanmoins, il est nécessaire d'avoir une large connaissance de l'application pour fixer les règles heuristiques puisque les décisions sont prises en tenant compte d'informations subjectives. Ces stratégies sont capables de gérer plusieurs paramètres de contrôle mais les règles heuristiques augmentent de manière exponentielle. Le principal avantage de ces algorithmes est leur robustesse, car ils utilisent des informations peu précises et subjectives. En plus de cela, ces algorithmes ont en option la capacité d'auto-apprentissage[69].

- [70] Les auteurs proposent une gestion intelligente de l'énergie basée sur la logique floue entre le générateur photovoltaïque, l'éolienne, le banc de batteries, la charge, la charge de décharge et le générateur diesel afin de minimiser le coût d'exploitation et l'impact environnemental d'un micro-réseau tout en améliorant considérablement les performances économiques et techniques de l'alimentation électrique.
- [71] présente une solution de gestion de l'énergie adaptative optimale basée sur la logique floue pour la gestion multi-énergie dans les micro-réseaux en tenant compte de diverses formes d'incertitudes opérationnelles.
- [72] développer un système de gestion de l'énergie basé sur la logique floue pour une application de micro-réseau résidentiel afin de minimiser l'erreur de partage de puissance entre les sources d'énergie renouvelables et la demande.

1.7.2.1.3 Système d'inférence Neuro-Flou Adaptatif (ANFIS)

Le système hybride Neuro-floue combine les avantages de la logique floue et de réseau de neurones, ensemble En conséquence, il y a une réduction considérable de la synchronisation progressive et de l'amélioration de la précision. Peut-être que l'ANFIS est le système neuro-flou efficace suprême [73], car il tire parti du processus parallèle pour ajuster et réformer la construction du système de logique floue. Les caractéristiques de base d'ANFIS sont :

- ce n'est pas compliqué.
- haute précision et gain de temps.
- simplification excessive robuste.
- plus compréhensible .

l'utilisation des connaissances linguistiques et numériques facilite le processus des tâches. Jabash et al. dans [74] ont proposé un système de gestion de l'énergie domestique basé sur le système d'inférence neuro-floue adaptative à sorties multiples (MANFIS). Le contrôleur flou peut interrompre diverses opérations de l'appareil et échanger l'énergie excédentaire des consommateurs via le réseau, réduisant ainsi le flux d'énergie et le coût de l'électricité. La méthode suggérée est vérifiée par rapport aux entrées pour valider les résultats avec l'insolation, les données quotidiennes de la vitesse du vent, les appareils électriques contrôlables et incontrôlables et la qualité de l'énergie électrique.

1.7.2.2 Commande prédictive

Le système de gestion de l'énergie basé sur le contrôle prédictif (MPC "Model Predictive Control" en anglais) est une technique de commande avancée utilisée pour commander des systèmes industriels complexes de plusieurs entrées sorties basée sur l'optimisation dans laquelle le problème d'optimisation est défini sur un horizon de prédiction, bien qu'il nécessite des calculs lourds pour les systèmes complexes et pourrait affecter le temps de réponse. Son principe est basé sur un modèle dynamique du processus afin d'anticiper son comportement futur. Son principe de fonctionnement est simple : L'utilisation du modèle mathématique des composants constituant le système hybride. Pour prédire son comportement futur et simplifier sa manipulation, Le système est écrit sous forme d'équations différentielles . Ensuite, générer la séquence de commande optimale qui minimise une fonction coût sur un horizon temporel fini tout en respectant l'ensemble des contraintes opérationnelles.

nous exposons par la suite quelques exemples de son application à la gestion de l'énergie dans les systèmes multi sources. les auteurs de [75] ont proposé une technique d'optimisation adaptative et dynamique basée sur l'approche MPC stochastique. L'approche de gestion de l'énergie proposée a été appliquée au problème de planification des ressources énergétiques distribuées pour un

ensemble de maisons intelligentes avec différentes sources d'énergie. Un autre travail intéressant a été présenté par les auteurs de [76], qui ont proposé un système de gestion de l'énergie utilisant un MPC, où un modèle d'espace d'état simple a été utilisé pour la modélisation des performances d'un système Micro-réseau. Ce travail a considéré la production d'énergie de source d'énergie renouvelable et la consommation comme paramètres de perturbations mesurés pour le système de gestion de l'énergie. Par conséquent, les systèmes de stockage et le coût ont été modélisés comme des contraintes pour le système Micro-réseau, qui ont été résolues par les équations d'espace d'état. En outre, d'autres travaux ont été présentés dans la littérature qui ont fait référence au contrôle optimal de la source d'énergie renouvelable dans les systèmes de micro-réseaux en considérant les systèmes de stockage hybrides, comme détaillé par les auteurs de [77]. Les auteurs de [78] ont utilisé le MPC pour un contrôle optimal des ressources énergétiques distribuées avec un système de stockage par batterie. Un cadre logique mixte a été appliqué pour modéliser le système domestique déployé.

1.7.2.3 Programmation dynamique

L'objectif de la programmation dynamique est de résoudre un problème de décision de manière optimale, en obtenant une politique de décision optimale. Cette méthode d'optimisation peut être appliquée à des systèmes déterministes ou stochastiques, à des systèmes à temps discret ou continu et à des problèmes d'horizon fini ou infini. La méthode d'optimisation de programmation dynamique divise un grand problème de décision en sous-problèmes plus petits. Le principe d'optimalité signifie que, quels que soient l'état initial et la décision initiale, les décisions restantes doivent constituer une politique optimale par rapport à l'état résultant de la première décision [79]. En tenant compte de ce principe, tout grand problème de décision peut être résolu étape par étape en évaluant tous les sous-problèmes, et finalement, en obtenant la politique de décision optimale. La solution est obtenue en implémentant l'algorithme de programmation dynamique, qui est une manière récursive de résoudre le problème. Le principal avantage de cette méthode est que le coût de calcul est relativement faible car les résultats de l'opération intermédiaire sont stockés dans une table, et plus tard, elles sont utilisées pour les décisions suivantes (du fait du couplage entre toutes les décisions de la séquence). Les auteurs proposent une stratégie de supervision et de gestion basée sur la programmation dynamique pour la gestion et le contrôle d'un micro-réseau autonome. L'algorithme d'apprentissage en profondeur fonctionne en temps réel, ce qui permet une planification intra-journalière pour obtenir une stratégie de contrôle pour l'optimisation du micro-réseau tout en envoyant des informations à partir des contrôleurs locaux dans le cadre d'une gestion centralisée. Zhuo [80], les auteurs présentent un algorithme de gestion et de supervision pour un système hybride utilisant la programmation dynamique pour gérer un micro-réseau avec des sources de production renouvelables et des batteries. L'objectif était de

Chapitre 1. État de l'art des systèmes multisources

maximiser les bénéfices de la vente d'énergie renouvelable et de minimiser les coûts nécessaires pour satisfaire la demande d'énergie. L'auteur a utilisé un marché de l'énergie non régulé où les prix de l'électricité fluctuent et les actions de contrôle de la batterie sont déterminées par une programmation dynamique. Par ailleurs, Choudar et al. [81] propose un modèle de gestion de l'énergie basé sur l'état de charge de la batterie et des ultra-condensateurs. La structure hiérarchique de la gestion optimale comporte quatre états ou modes de fonctionnement : mode de fonctionnement normal, mode de limitation photovoltaïque, récupération et modes autonomes. [82] pour une gestion optimale de l'énergie dans un système hybride en utilisant une programmation dynamique, Le système se compose d'éoliennes, de panneaux photovoltaïques, d'un générateur diesel et d'une batterie. L'optimisation est basée sur la minimisation des coûts en programmant le DG tout en tenant compte des limites de production d'énergie des ressources énergétiques distribuées, de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, de l'équilibrage de la charge et de la production d'énergie électrique.

1.7.2.4 MULTI AGENT

Les systèmes multi-agents (SMA) sont utilisés en général lorsque le problème est trop complexe pour être résolu par un seul système .un système multi-agents est défini comme un ensemble d'agents intelligents qui coopèrent pour atteindre l'objectif global du système. Il traite de la modélisation et du développement d'entités décisionnelles autonomes. De plus, un SMA permet un contrôle intelligent entre tous les micro-réseaux et/ou réseaux intelligents.. Dans ce système, chaque composant réagit indépendamment et est représenté par un agent intelligent et autonome. Théoriquement, l'élément de base d'un SMA est un agent intelligent avec trois caractéristiques communes : réactivité, proactivité et sociabilité. Plus précisément, un agent est réactif lorsqu'il peut réagir rapidement à l'environnement. Il est axé sur les objectifs, il est donc proactif. De plus, la sociabilité de l'agent lui permet de communiquer et de négocier avec d'autres agents en utilisant un langage commun. La négociation est l'enjeu clé du système multi-agents pour coordonner et résoudre les conflits concernant le SMA, les connaissances et ressources [83].

Bogaraaj et Kanakaraj [84] les auteurs proposent une stratégie de gestion basée sur des systèmes multi-agents intelligents pour un système hybride dans le cadre d'une application isolée (autonome), qui maintient l'équilibre énergétique entre les charges, les générateurs distribués et les batteries. Les agents sont constitués de systèmes photovoltaïques, d'éoliennes, de piles à combustible et de bancs de batteries. Les charges sont divisées en trois groupes en fonction de leur priorité. Le système utilise un compensateur dynamique pour équilibrer la puissance réactive. Anvari-Moghaddam et al [85] proposent une stratégie de gestion pour un micro-réseau comprenant des maisons et des bâtiments. Le processus d'optimisation du système de gestion de l'énergie implique la coordination de la gestion en production décentralisée et la réponse à la

demande. Les principaux objectifs de la fonction de coût sont de minimiser les coûts d'exploitation et de répondre aux besoins thermiques et électriques des clients. La plateforme de communication utilisée par les agents est basée sur le protocole de communication hypertexte (HTPP). Xiong et al.[86] ont proposé un schéma de gestion multi-objectifs des énergies renouvelables Multi Agent System pour satisfaire les exigences de diversité dans la communauté des clients. et contrôle la génération des unités de puissance et de consommation.

1.7.2.5 Metaheuristique

La metaheuristique est une branche d'algorithmes de recherche et de génération aléatoires. Ces algorithmes sélectionnent un chemin à travers un algorithme de recherche tel qu'une heuristique (aléatoire) pour trouver une solution optimale dans un problème d'optimisation avec ou sans contraintes. Les algorithmes metaheuristiques sont nombreux ou chaque méthode est caractérisée par sa propre technique de recherche [16]. Parmi les algorithmes heuristiques utilisés dans la planification et la gestion d'énergie dans les micro réseaux, citons les algorithmes génétiques (AG)[87] , L'optimisation par essaim de particules (PSO) , L'optimisation du loup gris(GWO) [88], colonies de fourmis artificielles (ACO) et colonie d'abeilles artificielles (ABC)[89, 90]. qui a été décrite dans plusieurs études. D'autres auteurs ont présenté des méthodes de programmation dynamique stochastique pour optimiser le problème de gestion de l'énergie avec des objectifs multidimensionnels. Ogunjuyigbe [91] ont présenté une technique basée sur un algorithme génétique pour l'emplacement optimal de la génération renouvelable et des batteries dans un système autonome. Les multi-objectifs proposés visent à réduire le coût du cycle de vie (LCC), les émissions de CO₂ et l'énergie de décharge. L'optimisation permet des variations des sources de rayonnement et de vent et extrait les données d'un profil de charge pour optimiser le micro-réseau. [90] a présenté un système de gestion de l'énergie pour un micro réseau isolé en utilisant l'algorithme de colonie d'abeille artificielle (ABC). Une approche stochastique est nécessaire pour analyser la répartition économique(Dispatching Economique) des unités de génération à l'intérieur d'un micro réseau, étant donné la nature intermittente des ressources d'énergie solaire et de la production d'éoliennes. Les résultats ont montré une diminution de 30% des coûts. [92] a présenté une nouvelle méthode pour le dimensionnement des batteries et la gestion de l'énergie dans les micro-réseaux connectés au réseau, qui combine un système expert basé sur l'optimisation de Grey wolf d'algorithme. Cette méthode consiste à minimiser à la fois les coûts des unités de génération et les niveaux d'émission des sources de combustibles fossiles. Cette méthode réduit les coûts MG en considérant la capacité optimale des batteries et en réduisant la consommation de combustibles fossiles. Hosain et al[93] ont proposé une gestion optimale de l'énergie pour un micro-réseau connecté au réseau en utilisant un algorithme d'essaim de particules. Un modèle de charge et de décharge d'une batterie a été formulé. La fonction de coût proposée réduit les coûts de 12 % sur un horizon/période de

temps total de 96 h, avec des intervalles de temps d'une heure. Ces résultats peuvent être ajustés en temps réel.

1.7.2.6 Programmation linéaire et non linéaire

La formulation mathématique d'un problème d'optimisation consiste à maximiser ou minimiser une fonction objective en satisfaisant toutes les contraintes considérées liées aux composants intégrés dans le modèle [94]. Selon la complexité et la difficulté à résoudre le problème du système, cette technique peut être abordée au moyen de méthodes exactes ou approchées. Les méthodes approchées ont l'avantage de pouvoir gérer simplement les contraintes non linéaires et les fonctions objectives mais ne peuvent garantir la qualité des résultats obtenus car elles emploient généralement des méthodes de recherche aléatoire. De plus, la possibilité de trouver une solution globale diminue dès que la taille du problème augmente. Les méthodes mathématiques exactes génèrent une solution optimale lorsqu'elles sont spécifiées dans une région réalisable. Il existe deux catégories de modèles linéaires et non linéaires basés sur toutes les contraintes implémentées et les fonctions objectifs. Les modèles linéaires sont divisés en trois types : programmation linéaire (LP), programmation en nombres entiers et programmation linéaire en nombres entiers mixtes (MILP), selon les variables si elles sont réelles, entières ou les deux types de variables, en conséquence. Troisièmement, les techniques hybrides peuvent joindre plusieurs méthodes pour bénéficier de leurs caractéristiques. Dans [95], l'auteur a choisi, la programmation linéaire en nombres entiers mixtes MILP pour la modélisation du problème de gestion de l'énergie car elle permet généralement d'employer les caractéristiques des ressources énergétiques distribuées intégrées en employant des variables entières et des variables binaires pour prendre une décision sur l'état de fonctionnement des systèmes de production, du système de stockage de batterie, des véhicules électriques et des appareils intelligents dans les maisons intelligentes du micro-réseau.

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, en premier lieu, nous avons présenté quelques notions sur les systèmes hybrides ainsi que leurs classifications ont été également données. Ensuite, nous avons présenté un aperçu complet des différentes configurations existantes pour les systèmes d'énergie hybride. De plus, quelques généralités sur les sources du SEH étudié, y compris les sources renouvelables, et les sources conventionnelles utilisées, les configurations possibles et les outils de dimensionnement sont discutés en détail. Puis nous avons donné un aperçu des différentes configurations existantes pour les systèmes d'énergie hybride. Par la suite, nous avons étudié les différents types différents composants du système d'énergie d'hybride. Finalement, nous avons présenté un état de l'art détaillé des différentes stratégies de gestion de l'énergie proposées la littérature pour le micro-

Chapitre 1. État de l'art des systèmes multisources

réseau, consistant en des algorithmes classiques, heuristiques et intelligents. L'application de stratégies de gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides d'énergie renouvelable est essentielle pour atteindre un niveau élevé de fiabilité du système et d'efficacité opérationnelle. Il a également contribué à réduire le coût de l'énergie générée et à augmenter la durée de vie du sous système d'énergie hybride

CHAPITRE II : Description et Modélisation du Système Hybride étudié

« Il est un agent puissant,
obéissant, qui se plie à tous
les usages :il m'éclaire, il
m'échauffe,il est l'âme de
mes appareils mécaniques.
Cet agent, c'est l'électricité. »

Jules Verne

2

Description et Modélisation du Système Hybride étudié

Sommaire

2.1	Introduction	53
2.2	Description du système hybride	53
2.3	Modélisation et commande des composants du SEH	55
2.3.1	Modèle du générateur photovoltaïque	55
2.3.2	Modélisation des éléments de la chaine éolienne	57
2.3.3	Modèle de la batterie	66
2.3.4	Modèle du générateur diesel	69
2.3.5	Modèles des convertisseurs statiques	78
2.3.6	Modélisation du bus continu	87
2.4	Conclusion	88

2.1 Introduction

Un système d'énergie hybride peut être composé de divers composants de conversion d'énergie renouvelable tels que des éoliennes et des générateurs photovoltaïques, ainsi que de générateurs non renouvelables conventionnels tels que des générateurs diesel, des micro-turbines et des dispositifs de stockage tels que des batteries. Un système énergétique hybride pourrait en avoir tout ou partie. Afin de sélectionner correctement les composants et les sous-systèmes pour un dimensionnement optimal de l'ensemble du système, la première étape est la modélisation des composants individuels. Le processus de modélisation permet d'identifier et d'aider à connaître les caractéristiques des composants et aide à la prise de décision. Les détails de la modélisation sont reflétés par sa prédiction correcte des performances, mais il est trop complexe ou extrêmement long de concevoir un modèle parfait. Un modèle suffisamment approprié devrait être un compromis entre complexité et précision. Les performances des composants individuels sont modélisées par des approches déterministes ou probabilistes. Dans ce chapitre, la modélisation avec la formulation mathématique sera définie pour chacune des sources qui constituent le micro réseau, et choisira une architecture qui peut convenir au système permettant la gestion de la manière la plus optimale.

La méthodologie générale de modélisation du système énergétique est décrite ci-dessous :

2.2 Description du système hybride

Le système énergétique hybride étudié dans cette thèse est montré par la Figure 2.1 est structuré en deux bus-bus DC et bus AC. Il est constitué d'un générateur photovoltaïque (PV) et d'une turbine éolienne qui sont considérés les sources d'énergie principale . ces derniers sont incapables de satisfaire la demande de charge tout au long de la journée en raison des caractéristiques stochastiques des entrées du système, du rayonnement solaire, de la vitesse du vent . le système est soutenu par un système de stockage (batteries) pour la production d'énergie autonome et le stockage en cas d'excès/déficit . dans le cas de l'incapacité de ce dernier à répondre aux besoins énergétiques, le réseau électrique fournit de l'énergie aux différentes charges connectées ou injecte le surplus d'énergie dans le mode connecté au réseau . Le générateur diesel est utilisé pour sécuriser le système contre les interruptions d'alimentation dans les situations de mauvaises conditions météorologiques en mode autonome . Sur le plan structurel, le générateur photovoltaïque est connecté au bus DC au moyen d'un convertisseur DC-DC unidirectionnel élévateur dont le rôle principal est d'extraire le maximum de puissance de l'énergie solaire disponible. Le système de conversion éolienne comprend un générateur synchrone à aimants permanents actionné via une éolienne, un convertisseur élévateur continu-continu, un redresseur à diode triphasé et un suiveur

Chapitre 2. Description et Modélisation du Système Hybride étudié

de point de puissance maximale (MPPT) conçu via le tsr proposé. Le MPPT proposé règle le rapport cyclique du convertisseur élévateur pour extraire la puissance maximale du système éolien. un banc de batteries au plomb et est connecté au bus DC à travers un hacheur réversible en courant. Ainsi, le flux d'énergie pour le système de stockage d'énergie est dans les deux sens. Le réseau électrique est connecté à travers un onduleur triphasé à deux niveaux réversible au bus DC. des charges domestiques sont connectées à travers un onduleur triphasé à deux niveaux au bus DC, Le groupe électrogène est connecté au bus continu par l'intermédiaire d'un redresseur commandé . pour maintenir l'équilibre de puissance du HES, un contrôleur central avec un EMS intégré est utilisé. En raison du contrôle centralisé, le contrôleur a besoin d'informations globales pour répondre aux besoins de gestion de l'énergie ; ainsi, l'infrastructure de communication doit être établie.

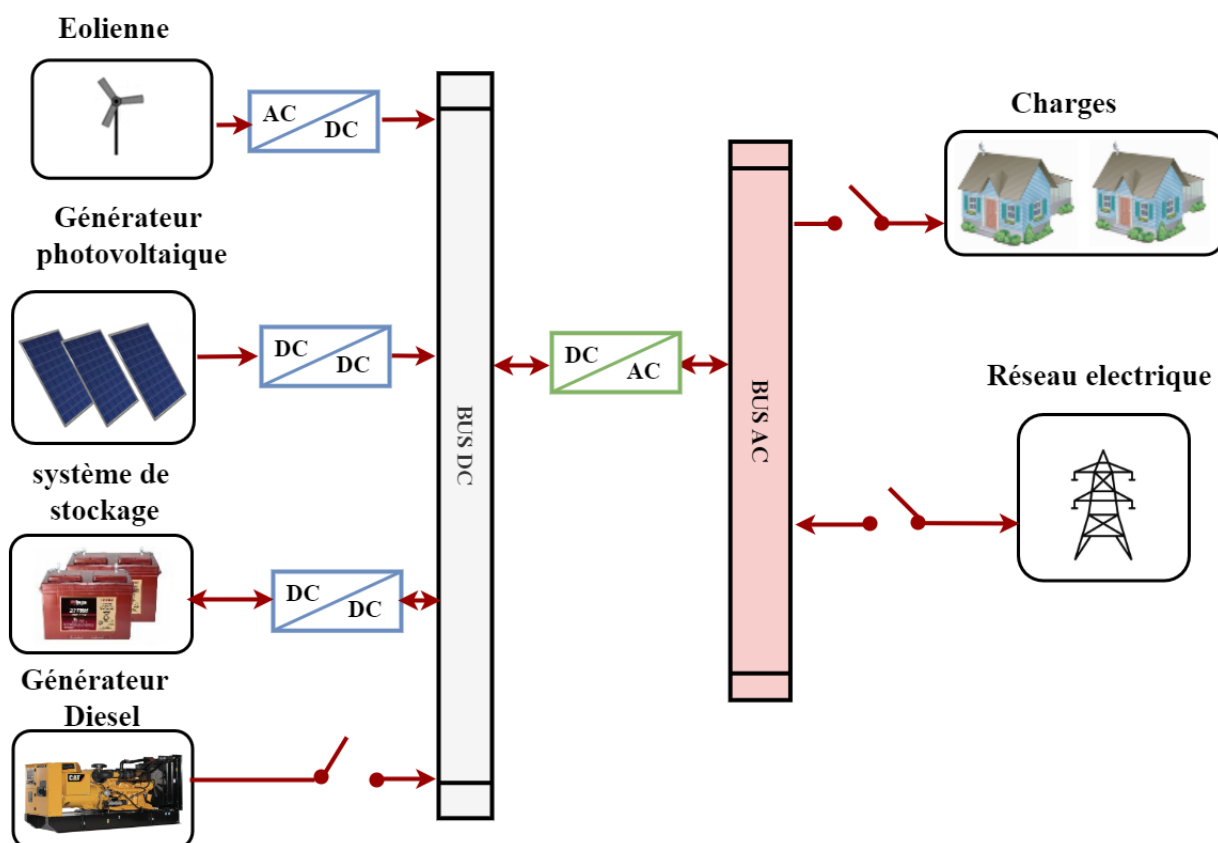


FIGURE 2.1 – Configuration du système d'énergie hybride proposé

2.3 Modélisation et commande des composants du SEH

2.3.1 Modèle du générateur photovoltaïque

Plusieurs modèles ont été proposés dans La littérature afin de simuler des cellules photovoltaïques fonctionnant dans diverses conditions. Essentiellement, chaque modèle est une amélioration du modèle idéal qui contient une source de courant, représentant l'énergie solaire entrante, et une diode, représentant la jonction P-N. Des éléments supplémentaires sont ajoutés pour augmenter la description du comportement de la cellule solaire dans certains quadrants de fonctionnement. Le modèle à une diode est le modèle le plus répandu utilisé pour les cellules PV et les modules PV en raison de sa faible complexité et de sa bonne précision dans le quadrant de production d'énergie. Les évolutions du modèle à une diode ont conduit à des modèles plus précis, tels que le modèle qui décrit le comportement de polarisation inverse d'une cellule solaire [96]. Le modèle à deux diodes améliore le modèle à une diode en considérant à la fois les processus de recombinaison dans la structure du matériau et à sa surface. De plus, des modèles dynamiques ont été proposés en introduisant une capacité afin de modéliser le comportement dynamique de la cellule [97]. La complexité des modèles suit le nombre de paramètres à identifier. L'application visée dans cette section est la modélisation de modules photovoltaïques. Le modèle à une diode a été adopté dans ce travail pour son bon équilibre entre complexité et précision.

2.3.1.1 Modèle à une seule diode

La figure 2.2 illustre Le schéma électrique équivalent du modèle à une diode du PV. La cellule photovoltaïque peut être modélisée comme une source de courant connectée en parallèle à une simple diode p-n et une résistance shunt (R_p), Ces trois composants sont en série avec la résistance série (R_s). Selon la loi actuelle de Kirchhoff, le courant de sortie de la cellule solaire peut être exprimé comme suit [98, 99] :

$$I_{PV} = I_{ph} - I_d - I_p \quad (2.1)$$

Selon l'équation des diodes de Shockley, I_d peut s'écrire :

$$I_d = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{nV_T}\right) - 1 \right] \quad (2.2)$$

$$I = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{nV_T}\right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_p} \quad (2.3)$$

Chapitre 2. Description et Modélisation du Système Hybride étudié

$$V_T = \frac{K_T}{q} \quad (2.4)$$

Avec : I_{pv} Le courant de borne de sortie, I_{ph} est le courant photo-généré, I_d est le courant traversant la diode et I_p est le courant de résistance shunt, I_0 courant de saturation, q charge de l'électron, constante de BOLTZMANN, n facteur d'idéalité relatif au module, T température de jonction de la diode.

$$I_{ph} = \frac{G}{G_{STC}} [I_{ph-n} + K_1 \Delta T] \quad (2.5)$$

Où I_{ph} le courant photonique généré par la cellule sous les conditions de test standard (STC) (STC) : $G = 1000W/m^2$ et $T = 25^\circ C$ Avec

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (2.6)$$

$$I_0 = I_{0, ref} \left(\frac{T}{T_{ref}} \right)^{\frac{3}{n}} \exp \left(\frac{g E_g}{nk} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (2.7)$$

L'efficacité d'une cellule PV ne dépend pas de la variation de la résistance shunt R_p de la cellule, mais l'efficacité d'une cellule PV dépend fortement de la variation de la résistance série R_s . Comme R_p de la cellule est inversement proportionnel au courant de fuite shunt à la terre, on peut donc supposer qu'il s'agit d'une valeur très élevée pour un très petit courant de fuite à la terre. Comme la puissance totale générée par une seule cellule PV est très faible, nous avons utilisé une combinaison de cellules PV pour répondre à nos besoins souhaités. Ce réseau de cellules PV est connu sous le nom de générateur photovoltaïque. Pour un générateur de n_p modules en parallèles et n_s modules en séries, le courant de sortie I_{GPV} est donné par :

$$I_{GPV} = n_p I_{ph} - n_p I_0 \left[\exp \left(\frac{V_{pV} + R_{sG} I}{n n_s V_T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_{sG} I_{pV}}{R_{pG}} \quad (2.8)$$

$$\begin{cases} R_{sG} = \frac{n_s R_s}{n_p} \\ R_{pG} = \frac{n_p R_p}{n_p} \end{cases} \quad (2.9)$$

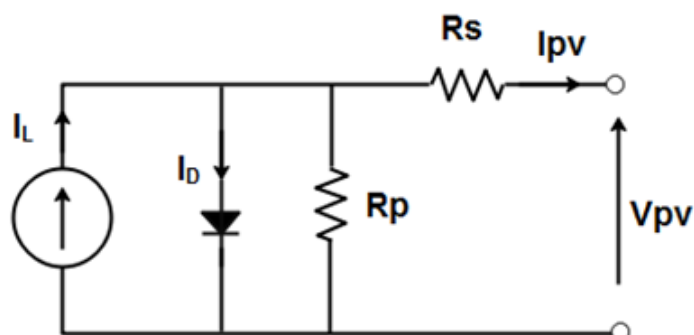


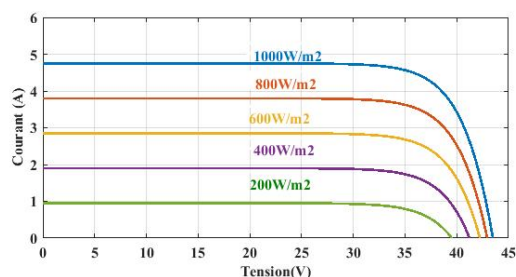
FIGURE 2.2 – Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

2.3.1.2 Les performances du système photovoltaïque

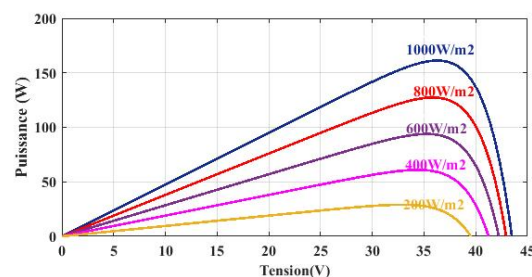
Les courbes caractéristiques du système photovoltaïque sont une relation entre le courant et la tension (I-V), et entre les courbes de puissance et de tension (P-V). Ces courbes non linéaires dépendent du niveau d'ensoleillement et de la température de la cellule. La Figure 2.3a montre la courbe caractéristique I-V de la cellule solaire dans un ensoleillement fixe et à différentes températures. tandis que, La Figure 2.3b montre la courbe caractéristique $P - V$ de la même condition. À partir de la courbe caractéristique, nous pouvons savoir quand la température ambiante augmente, le courant de court-circuit des cellules solaires change légèrement, mais la tension en circuit ouvert des cellules solaires chute considérablement. Cela conduit la puissance de sortie à être faible, nous pouvons donc savoir quand nous utilisons des cellules solaires et quand nous devons éviter à haute température. De plus, selon l'intensité différente de la lumière du soleil, cela affecterait les courbes caractéristiques des cellules solaires. Les Figures (Figure 2.4a et Figure 2.4b) sont des courbes caractéristiques $I - V$ et $P - V$ de cellules solaires à température fixe mais à intensité solaire différente. Avec la variation de G en gardant T_c constant, les effets suivants se produisent : l'augmentation de la puissance de sortie maximale du panneau PV avec l'augmentation de l'intensité du rayonnement, et vice versa. Par ailleurs, Le courant de court-circuit I_{sc} le courant I_{MPP} varie de manière proportionnelle à la variation de l'éclairement énergétique, croissant avec la croissance de l'éclairement. La tension du circuit ouvert (V_{oc}) diminue avec la diminution de l'éclairement énergétique. Il est possible de démontrer que la tension du circuit ouvert varie directement proportionnellement au logarithme de G .

2.3.2 Modélisation des éléments de la chaîne éolienne

le concept de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne est de nature très différente des générateurs conventionnels, et donc des études dynamiques doivent être abordées afin d'intégrer l'énergie éolienne dans le système électrique. Un modèle global d'un système d'énergie éolienne

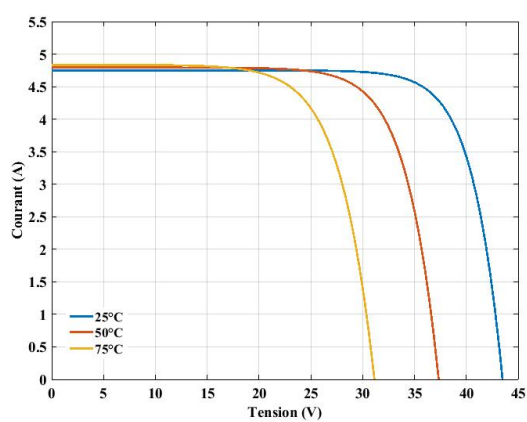


(a) caractéristiques I-V

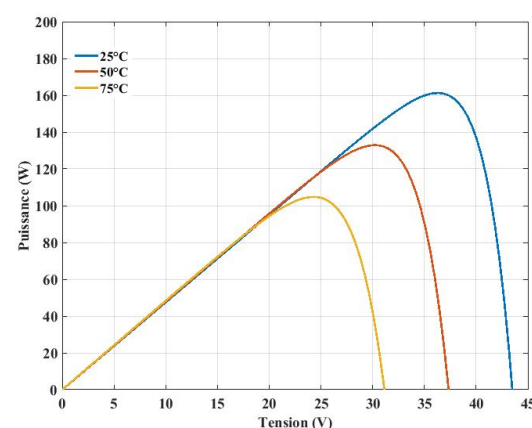


(b) caractéristiques P-V

FIGURE 2.3 – Caractéristiques du PV pour différents niveaux d'éclairement 25°C



(a) caractéristiques I-V



(b) caractéristiques P-V

FIGURE 2.4 – Caractéristiques du PV pour différentes températures
peut être divisé en composants suivants :

1. Modèle de turbine et de transmission.
2. Modèle de générateur.
3. Modèle de convertisseurs.
4. Modèle de système de contrôle.

2.3.2.1 Modélisation de l'aérogénérateur

L'aérogénérateur est composé principalement de deux parties mécaniques, qui sont la turbine et le multiplicateur de vitesse, avec une génératrice, qui est la génératrice synchrone à aimant permanent, la Figure 2.5 montre l'accouplement de ces parties.

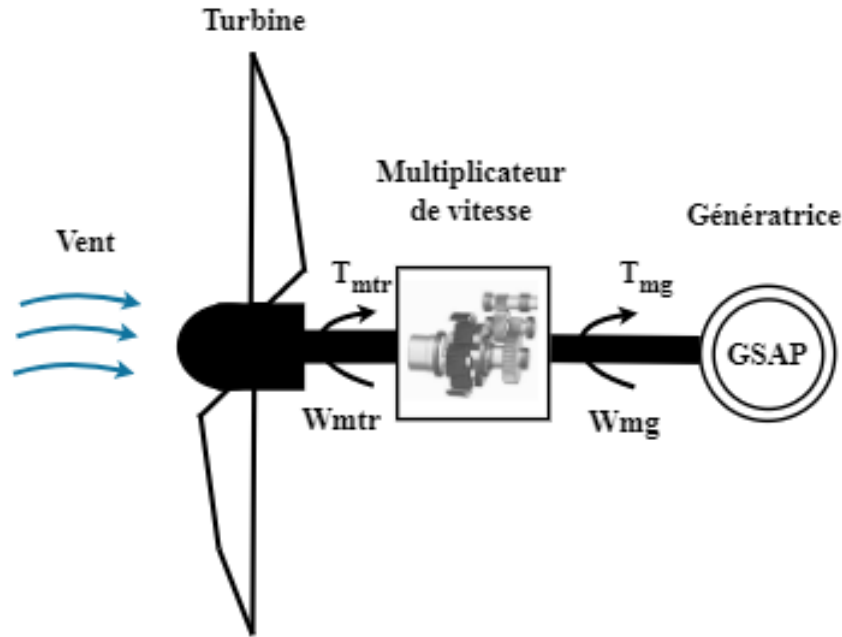


FIGURE 2.5 – Différentes parties d'un aérogénérateur

2.3.2.1.1 Modélisation de la turbine

La production d'énergie éolienne dépend de l'interaction entre le rotor et la vitesse du vent. La puissance extraite par les pales peut être calculée par l'équation 2.10 telle qu'elle est couramment exprimée dans la littérature [100] :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho S_v^3 = \frac{1}{2} \rho \pi R_t^2 V_v^3 \quad (2.10)$$

Où ρ est la masse volumique de l'air ($1,22 \text{ Kg/m}^3$ en conditions normales), R_t est la longueur des pales et V_v est la vitesse du vent. Dans un système éolien, en raison de diverses pertes, la puissance extraite de la turbine est inférieure à la puissance cinétique du vent. Elle est exprimée par [101] :

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \pi R_t C_p(\lambda, \beta) V_v^3 \quad (2.11)$$

Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ est fonction du rapport de vitesse optimal (TSR) λ et l'orientation des pales β , il exprime l'efficacité aérodynamique de la turbine et définit comme étant le rapport entre la puissance captée par la turbine et la puissance du vent, il est donné par l'équation suivante :

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} \quad (2.12)$$

Pour une éolienne à vitesse variable fonctionnant en région 2, l'objectif de contrôle est d'assurer une extraction d'énergie maximale en faisant fonctionner l'éolienne au pic du $C_p \sim TSR$. Le TSR

Chapitre 2. Description et Modélisation du Système Hybride étudié

peut être exprimée par l'équation suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega_t}{R_t} \quad (2.13)$$

Où Ω_t (rad/s) : Vitesse de rotation de la turbine, C_p est une fonction non linéaire de ratio de la vitesse spécifique λ , Le coefficient de puissance peut être approximé numériquement pour des valeurs données du rapport de vitesse de pointe, et d'orientation des pales β . L'approximation utilisée dans cette thèse est donnée par [102] :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{\frac{-C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \quad (2.14)$$

Avec

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.15)$$

Les valeurs des constantes C_1 à C_6 dépendent du type de la turbine et du constructeur. pour la turbine que nous avons utilisée, ces constantes ont successivement les valeurs suivantes ($C_1 = 0.5176, C_2 = 116, C_3 = 0.4, C_4 = 5, C_5 = 21, C_6 = 0.0068$), comme il est illustré à la Figure 2.6 . La valeur maximale de $C_p(0.48)$ est atteinte pour l'angle $\beta = 0^\circ$ et une valeur correspondante de $\lambda = 8.1$, qui est sa valeur optimale (λ_{op}).

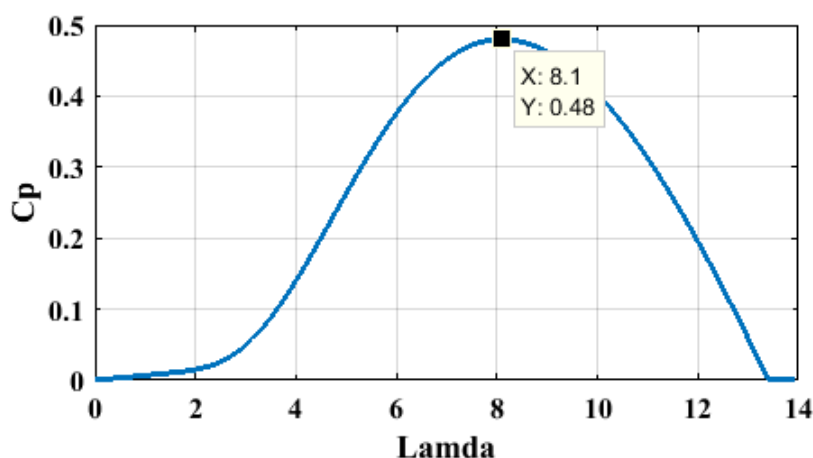


FIGURE 2.6 – Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine (λ).

2.3.2.1.1.1 Transmission mécanique La transmission mécanique peut être modélisée par deux masses tournantes, qui sont le rotor de la turbine et le rotor de la génératrice, reliées ensemble à travers un multiplicateur de vitesse, qui permet d'adapter la vitesse lente du

Chapitre 2. Description et Modélisation du Système Hybride étudié

rotor de la turbine à la vitesse rapide de la génératrice selon l'équations suivante :

$$\Omega_{mec} = G\Omega_t \quad (2.16)$$

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (2.17)$$

Où C_{aer} est le couple aérodynamique, C_g est le couple issu du multiplicateur, Ω_t est la vitesse de rotation de la turbine et Ω_{mec} est la vitesse de rotation de la génératrice. L'équation dynamique de la partie tournante se résume par l'équation suivante :

$$J \frac{d}{dt} \Omega_{mec} = C_g - C_{em} - f \Omega_{mec} \quad (2.18)$$

Où, $J(kg.m^2)$ est l'inertie totale qui apparaît sur le l'arbre du générateur, $C_g(N.m)$ est le couple mécanique, $C_{em}(N.m)$ est le le couple électromagnétique, et $f(N.m.s.rad^{-1})$ est un coefficient de frottement visqueux

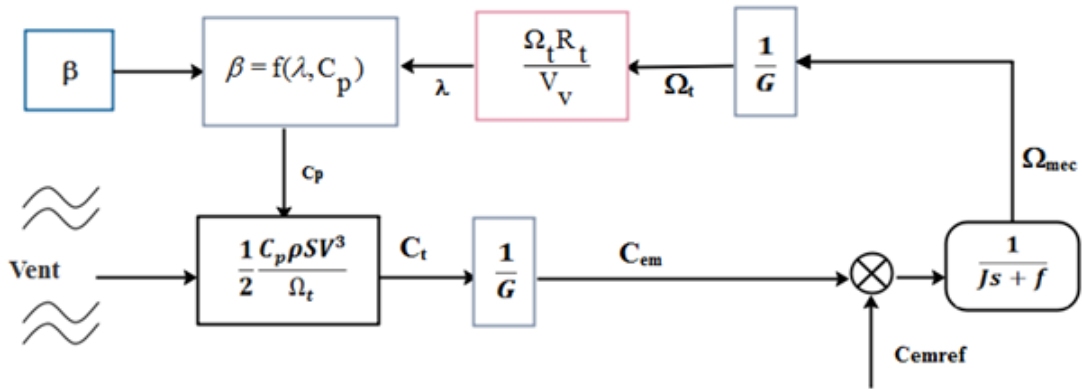


FIGURE 2.7 – Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.

2.3.2.1.1.2 Zones d'exploitation d'une turbine éolienne à vitesse variable

Selon la vitesse du vent et la puissance nominale de la turbine éolienne, on distingue trois zones de fonctionnement, en plus de la première zone où la turbine est à l'arrêt à cause de la faible vitesse du vent. La Figure 2.8 représente ces différentes zones en fonction de diverses valeurs du vent et pour un angle d'orientation de pale fixe [103, 104] :

- **Zone d'arrêt** : Dans cette zone, la turbine est à l'arrêt à cause de la faible vitesse du vent, qui est insuffisante pour démarrer l'éolienne .
- **Zone de démarrage** : La turbine commence à tourner lentement à partir d'une vitesse minimale, on appelle zone de démarrage.

Chapitre 2. Description et Modélisation du Système Hybride étudié

- **Zone de MMPT** : Dans cette zone, après le démarrage de l'éolienne, il devient possible d'extraire le maximum de puissance en exploitant davantage la puissance cinétique du vent. La caractéristique de la turbine montre que pour chaque vitesse du vent, il existe une vitesse de rotation optimale correspondant à la valeur maximale du coefficient de performance (C_{pmax}) ce qui permettra à l'éolienne

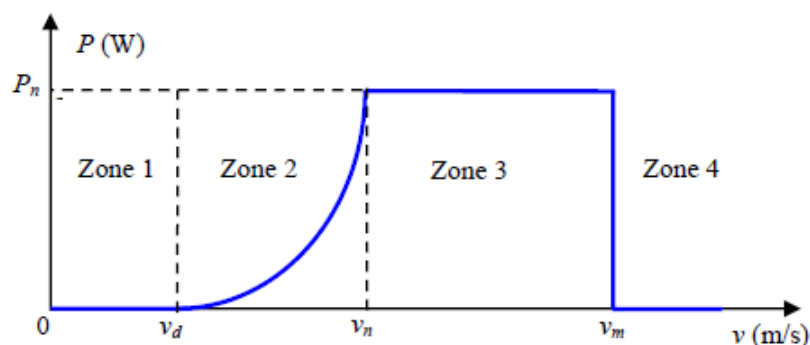


FIGURE 2.8 – Zones de fonctionnement d'une éolienne

2.3.2.1.2 Modélisation de générateurs synchrones à aimants permanents(GSAP)

Les machines/générateurs synchrones à aimants permanents (MSAP/GSAP) jouent un rôle clé dans les systèmes de production d'énergie éolienne à entraînement direct pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. La modélisation mathématique rigoureuse du GSAP est le préalable à la conception des algorithmes de contrôle de la machine ainsi qu'à l'analyse des caractéristiques stationnaires et dynamiques des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Dans cette section, un modèle mathématique du GSAP sera d'abord présenté dans le référentiel triphasé naturel. Ce modèle contient des termes d'inductance qui varient en fonction de l'angle du rotor, et donc en fonction du temps. Cela introduit une grande complexité dans la résolution des problèmes de machines et de systèmes électriques. Par conséquent, le modèle GSAP sera présenté dans le référentiel tournant d-q. Le développement d'un modèle mathématique du générateur synchrone à aimants permanents est grandement simplifié en mettant en œuvre les hypothèses suivantes [105, 106] :

- Les effets de saturation magnétique sont négligés .
- Les pertes par courant de Foucault et par hystérésis sont négligées .
- distribution sinusoïdale de la FMM créée par les enroulements du stator
- effet d'encoche négligeable.
- résistance des enroulements ne variant pas avec la température.

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ces aimants sont

Chapitre 2. Description et Modélisation du Système Hybride étudié

supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air. Pour établir des relations simples entre les tensions d'alimentation du moteur et les courants, nous considérons le modèle de la machine synchrone à aimants permanents suivant [106] :

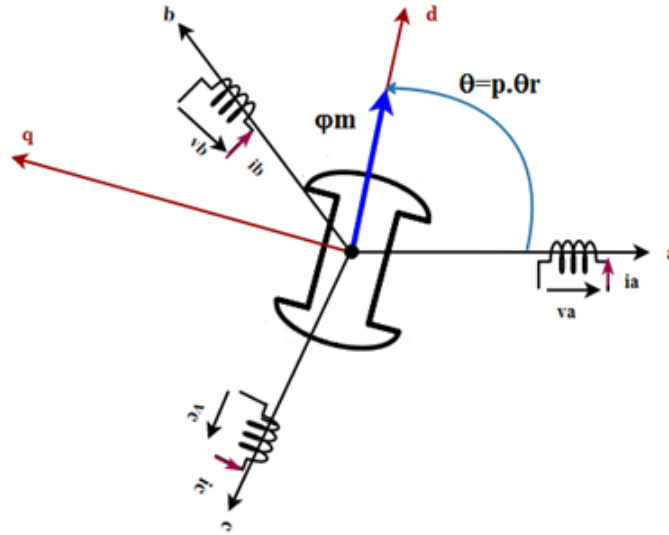


FIGURE 2.9 – Structure de la GSAP dans le repère (a,b,c).

2.3.2.1.2.1 Equations de tensions et de flux Pour un GSAP avec une distribution de flux sinusoïdal, il n'y a pas de différence entre la force contre-électromotrice, induite par un rotor à aimants permanents ou un rotor bobiné. Par conséquent, le modèle mathématique de GSAP est similaire à celui d'une machine synchrone à rotor bobiné. Les équations de tension stator GSAP dans le repère (abc) peuvent être exprimées en termes de courants instantanés et de flux stator comme [107, 108] :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\varphi_s] \quad (2.19)$$

Avec :

$$[V_{abc}^s] = [v_a \ v_b \ v_c]^T, [I_{abc}^s] = [i_a \ i_b \ i_c]^T, [\varphi_{abc}^s] = [\varphi_a \ \varphi_b \ \varphi_c]^T \quad (2.20)$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Chapitre 2. Description et Modélisation du Système Hybride étudié

R_s : Résistance des enroulements statoriques. L'expression des flux dans les bobines statoriques est donnée par l'équation suivante[108] :

$$[\varphi_{abc}^s] = [L][I_{abc}^s] + [\varphi_{mabc}^s] \quad (2.22)$$

Où :

$$[L] = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

où L_a, L_b, L_c sont les inductances propres des enroulements statoriques, M_{ab}, M_{bc}, M_{ca} sont les inductances mutuelles entre les enroulements statoriques. Le flux du stator crée par les aimants est donné par :

$$[\varphi_{mabc}^s] = \varphi_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

Où : φ_m : le flux crée par l'aimant permanent.

θ_e : La position angulaire du rotor en degré électrique Le flux crée par les aimants dans l'équation 2.24 peut être écrite de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \varphi_m \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

En introduisant (2.23) dans (2.19) on aura :

$$[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}([L_{s2}][I_s] + [\varphi_f]) \quad (2.26)$$

2.3.2.1.2.2 Equations de la machine dans les axes d-q Le modèle dynamique d'un PMSG est dérivé d'un cadre d'axe de référence synchrone à deux phases, direct (d) et quadrature (q) dans lequel l'axe q est à 90° en avant de l'axe d par rapport au sens de rotation. Dans le cas d'un système triphasé équilibré, la transformation du référentiel dq réduit trois grandeurs alternatives à deux grandeurs continues, ce qui permet d'effectuer des calculs simplifiés. La transformation dq appliquée à un système triphasé est comme indiquée par l'équation (2.27) :

$$\begin{bmatrix} d \\ q \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_e) & -\sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Chapitre 2. Description et Modélisation du Système Hybride étudié

Les transformations ci-dessus peuvent être appliquées aux tensions, courants et flux . La séquence zéro est incluse pour donner les degrés de liberté complets lorsque le référentiel stationnaire triphasé est transformé en référentiel dq. Dans des conditions équilibrées, la séquence zéro est égale à zéro. (f) peut représenter des tensions, des courants ou des inductances dont les valeurs dépendent de la position du rotor.

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_e) & -\sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_e + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Equations électriques Les composantes de la tensions statoriques dans le repère de Park sont

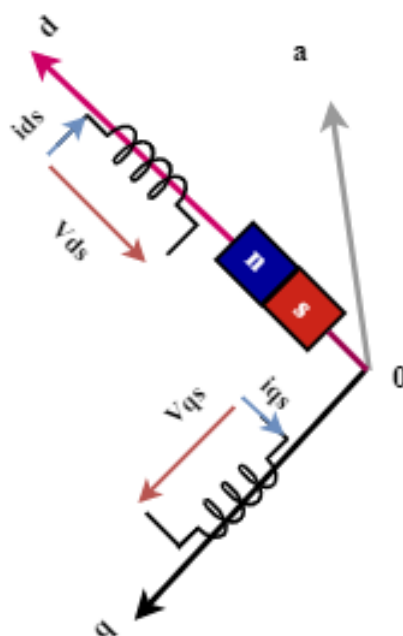


FIGURE 2.10 – Modèle biphasé de la MSAP.

données par [109] :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_{ds}i_{ds} + \frac{d}{dt}\varphi_{ds} - \omega_e i_{qs} \\ V_{qs} = R_{qs}i_{qs} + \frac{d}{dt}\varphi_{qs} + \omega_e i_{ds} \end{cases} \quad (2.29)$$

Equation magnétique Les composante des flux statorique sont données par :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = L_{ds}i_{ds} + \varphi_f \\ \varphi_{qs} = L_{sq}i_{qs} \end{cases} \quad (2.30)$$

Chapitre 2. Description et Modélisation du Système Hybride étudié

Où : φ_f est le flux d'excitation constant des aimants permanents. En introduisant 2.29 dans 2.30 on aura Le modèle électrique du MSAP sous la forme suivante [110] :

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_{ds}i_{ds} - L_{ds}\frac{d}{dt}i_{ds} - \omega_e L_{qs}i_{qs} \\ V_{qs} = -R_{qs}i_{qs} - L_{qs}\frac{d}{dt}i_{qs} - \omega_e L_{ds}i_{ds} + \omega_e \varphi_f \end{cases} \quad (2.31)$$

V_{ds}, V_{qs} : sont les tensions statoriques correspondant aux axes d-q ; i_{ds}, i_{qs} : les courants statoriques ; L_{ds}, L_{qs} : les inductances, ω_e : pulsation électrique, φ_f : le flux magnétique.

Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique C_{em} est produit par l'interaction entre les pôles formés par les aimants au rotor et les pôles engendrés par les FMMs dans l'entrefer généré par les courants statoriques. L'équation du couple électromagnétique est donnée par [111] :

$$C_{em} = \frac{3}{2}P[(L_{ds} - L_{qs})i_{ds}i_{qs} + \varphi_f i_{qs}] \quad (2.32)$$

Où P est le nombre de paires de pôles, L_d est l'inductance de l'axe direct, L_q est l'inductance en quadrature, Après l'orientation des axes de flux, l'équation 2.33 devient comme suit :

$$C_{em} = \frac{3}{2}P\varphi_f i_{qs} = K i_{qs} \quad (2.33)$$

2.3.3 Modèle de la batterie

la modélisation de la batterie de stockage se concentre principalement sur le modèle du circuit équivalent qui est souvent utilisé dans le domaine d'énergie électrique. le modèle de base de la batterie de stockage prend en compte les processus physiques et chimiques, il devient généralement très complexe à cause des équations différentielles multiples d'ordre élevé et d'un grand nombre de paramètres. Par conséquent, le modèle du circuit équivalent est souvent utilisé dans le domaine d'énergie électrique . le circuit équivalent de la batterie est illustré par la Figure 2.10 est composé d'une source de tension E_{bat} , et d'une résistance interne r_{bat} . nous devons comprendre que les valeurs des paramètres du circuit (E et R) ne sont pas constantes. La tension en charge est déduite directement à partir de la tension à vide et de la chute de tension due à la résistance interne série Cela change avec l'état de charge de la batterie [112][19] :

$$V_{bat} = E_{bat} - r_{bat}I_{bat} \quad (2.34)$$

Chapitre 2. Description et Modélisation du Système Hybride étudié

Où r_{bat} est la résistance interne. E_{bat} représente la tension à vide, et I_{bat} est le courant de la batterie. La batterie est en état de charge quand le courant est positif, et dans l'état de décharge, si le courant inverse le sens. L'état de charge de la batterie (SOC) est donné par [113] :

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{1}{C_N} \int_{t_1}^{t_2} i_{bat}(t) dt \quad (2.35)$$

Où, $SOC(t_0)$ est l'état de charge initial, $I_{bat}(t)$ représente le courant traversant la batterie et C_N est la capacité nominale de la batterie exprimée en Ah .

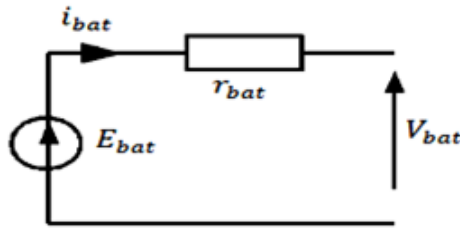


FIGURE 2.11 – Modèle équivalent électrique simple d'une batterie.

Dans le cas de la batterie au plomb, nous avons déjà vu que la tension à vide E_{bat} est approximativement proportionnelle à l'état de charge de la batterie. Cela indique la tension d'une cellule d'une batterie. Si nous proposons une variable de batterie DOD , c'est-à-dire la profondeur de décharge d'une batterie, qui est nulle lorsqu'elle est complètement chargée et 1,0 lorsqu'elle est vide :

$$DOD = 1 - SOC_{bat} \quad (2.36)$$

alors la formule simple pour la tension en circuit ouvert est [114] :

$$DOD = 1 - SOC_{bat} \quad (2.37)$$

$$E_{bat} = n_{bat}(2.15 - DOD(2.15 - 2.00)) \quad (2.38)$$

Où n_{bat} est le nombre de cellules de la batterie DOD est le profondeur de décharge. Cette formule donne des résultats raisonnablement bons pour ce type de batterie, même si une première amélioration serait d'inclure un terme pour la température, car cela a un fort impact.

2.3.3.1 Caractéristiques et paramètres importants des batteries

Les principaux paramètres électriques qui caractérisent une batterie sont les suivants :

1. **Capacité C** : La capacité de la batterie est une mesure de la charge stockée par la batterie exprimée en ampères-heures (Ah), et est déterminée par la masse de matière active contenue dans la batterie. La capacité représente la quantité maximale d'énergie qui peut être extraite de la batterie dans certaines conditions spécifiées. L'énergie présente dans la batterie peut être décrite par la capacité énergétique comme le produit entre la tension en volts et la capacité électrique en Ah, elle s'exprime en Wh.
2. **État de charge (SOC)** : Le SOC est appelé la capacité relative de la batterie en tant que pourcentage de la capacité maximale C_{max} de la batterie. le rapport entre la capacité actuelle et la capacité nominale C_{max} : $SOC = C/C_{max}$. Évidemment $0 < SOC < 1$. Si $SOC = 1$ la batterie est complètement chargée, sinon si $SOC = 0$ la batterie est complètement déchargée. La capacité de la batterie se détériore au fil du temps (vieillessement de la batterie). De nombreuses techniques sont décrites pour déterminer l'état du SOC dans [38][39] mais la méthode couramment utilisée est le courant consommé/fourni pour démontrer la variation de la batterie sur une certaine période de temps.
3. **Profondeur de décharge (DOD)** : La profondeur de décharge décrit généralement la profondeur de décharge de la batterie. Elle est opposée à l'état de charge (SOC). Si la batterie est considérée comme complètement chargée, c'est-à-dire 100% SOC, le DOD de la batterie est de 0%.
4. **Régime de charge (ou de décharge)** : est le paramètre qui reflète la relation entre la capacité nominale d'une batterie et le courant auquel elle est chargée (ou déchargée). Il est exprimé en heures ; par exemple, le régime de décharge est de 30h pour une batterie de 150Ah qui se décharge à 5A.
5. **Efficacité** : est le rapport de la charge extraite (Ah ou énergie) lors de la décharge divisé par la quantité de charge (Ah ou énergie) nécessaire pour rétablir l'état de charge initial. Elle dépend de l'état de charge SOC et du courant de charge et de décharge.
6. **Durée de vie** : La durée de vie des batteries est le nombre de cycles de charge et de décharge qu'une batterie peut effectuer avant de perdre ses performances. La durée de vie des batteries est affectée de manière significative par la profondeur de décharge. Par exemple, une batterie qui n'est déchargée qu'à 20% de sa pleine capacité énergétique a une durée de vie beaucoup plus longue qu'une batterie qui est déchargée plus profondément à 80% de sa capacité, de sorte qu'il ne reste que 20% de sa pleine charge énergétique.
7. **Vieillessement** : Vieillessement des batteries souvent quantifié par le nombre de cycles de charge et de décharge. Le vieillissement réduit les performances de la batterie en réduisant sa capacité à stocker de l'énergie et cela dépend de nombreux facteurs externes tels que la profondeur de décharge, le taux de décharge, les conditions de température.

8. **Auto-décharge** : L'autodécharge est une décharge progressive de la capacité disponible au fil du temps, même lorsqu'aucune charge n'est connectée ou en condition de circuit ouvert. Le taux de décharge varie en fonction de l'état de la batterie. Cela dépend de divers facteurs tels que la température, le vieillissement, le matériau de l'électrode et la fabrication .
9. **Tension** : lorsque les batteries se chargent/se déchargent pour fournir de l'énergie électrique, la tension est l'un des paramètres les plus importants à prendre en compte. La tension en circuit ouvert est déterminée par réaction chimique des paramètres internes de la cellule. En utilisation réelle, cette valeur est différente de la valeur théorique et elle dépend de nombreux facteurs cinétiques .

2.3.4 Modèle du générateur diesel

Comme indiqué dans la section 1.4.4 le modèle de générateur diesel se compose de plusieurs sous-systèmes : moteur à combustion interne, générateur synchrone électrique , et le système d'excitation (voir Figure 2.12) accouplement mécanique, système de régulation automatique de la tension, régulateur de vitesse. La modélisation du générateur diesel se subdivise généralement en quatre parties : les modèles du moteur diesel, du régulateur du moteur diesel, du générateur synchrone, de son système d'excitation et du module de régulation automatique de la tension (AVR). Dans cette section, nous allons présenter une étude d'un groupe électrogène dont les paramètres, issus du cahier des charges (Annexe), L'alternateur est à pôles saillants et sera modélisé en utilisant la transformée de PARK utilisée dans l'étude des machines à courant alternatif.

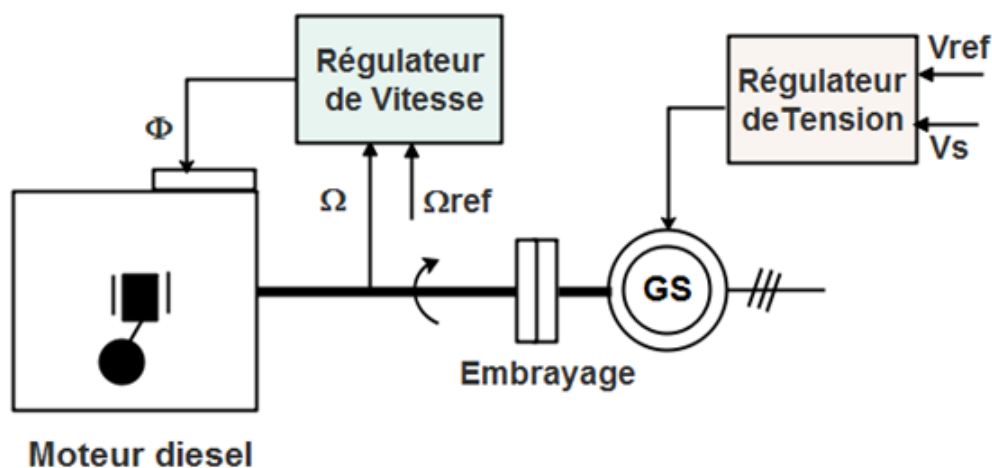


FIGURE 2.12 – Conception d'un générateur diesel.

2.3.4.1 Modèle simplifié du moteur diesel

Les moteurs diesel sont des machines compliquées influencées par de nombreux facteurs. Ainsi, les modèles de moteurs diesel peuvent atteindre des niveaux de complexité élevés. Dans la littérature, la modélisation du moteur diesel se limite généralement à la mise en équation des paramètres qui régissent le comportement du couple mécanique, les développements thermochimiques sont généralement évités à cause des difficultés liées à l'écriture des équations différentielles. Les mesures effectuées sur les turbines diesels montrent un retard entre l'injection du combustible et le changement de couple. Ce retard est dû aux quatre étapes du moteur pour produire un couple (Admission, Compression, Explosion et Échappement) ; il est lié à la vitesse de rotation, le nombre d'explosions par cycle, la propagation des ammes dans les cylindres et à la température. Sa modélisation est largement développée dans .La figure 2.13 représente le modèle de moteur diesel simplifié utilisé dans cette étude. Le moteur est modélisé par une équation de couple et un temps mort (délai d'allumage). Dans notre étude, on travaille avec un retard constant, de l'ordre de 10ms , ce retard peut être calculé pour le régime nominal par l'expression suivante [44, 115, 44] :

$$T_D = \frac{60k}{2nN_d} + \frac{60}{4N_d} [s] \quad (2.39)$$

Avec k est le nombre de temps par cycle 2 ou 4 pour un moteur *2temps* ou *4temps*. respectivement, N_d la vitesse de rotation en tr/min, n est le nombre de cylindre. Cette équation pour le temps mort du moteur est cohérente avec le retard de deux temps de puissance pour être la valeur moyenne utilisée dans les modèles diesel. le temps mort est considéré comme constant car sa dépendance à la vitesse a un effet négligeable sur le modèle par rapport à la variation de vitesse attendue. Souvent, une relation non linéaire entre le couple et le taux de ravitaillement est incluse dans le modèle. Cette étude utilise une équation d'ajustement de couple polynomiale du troisième ordre normalisée ,sa formule générale est donnée par l'équation suivante :

$$f(\psi) = a_3\psi^3 + a_2\psi^2 + a_1\psi + a_0 \quad (2.40)$$

Avec ψ est le débit de carburant et $f(\psi)$ approximation polynomiale de la relation débit de carburant-couple. Mathématiquement, la fonction de transfert du moteur diesel peut être écrite comme suit :

$$C_{dm} = f(\psi)e^{-sT_D} \quad (2.41)$$

Où : T_D est le retard de combustion .

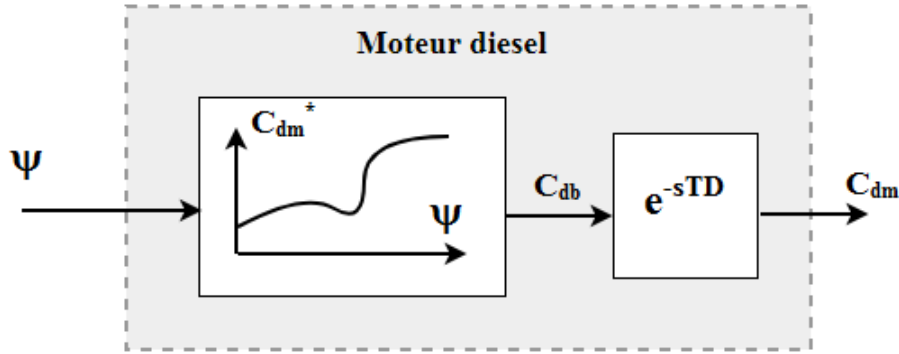


FIGURE 2.13 – Modèle simplifié du moteur diesel

2.3.4.2 Equation mécanique de la turbine

Le modèle mécanique du générateur diesel est composé de deux masses tournantes couplées par un arbre. L'équation dynamique de la partie tournante se résume par l'équation suivante[116] :

$$2J_d \frac{d}{dt} \Omega_{dm} = C_{dm} - C_{de} - f_d \Omega_{dm} \quad (2.42)$$

Avec : $J_d = J_1 + J_2$ est la somme des inerties de la turbine et de la génératrice, f_d : représente la somme des frottements de deux parties aussi, alors que C_{de} est le couple électromagnétique de la génératrice.

2.3.4.3 Le régulateur de vitesse

Les moteurs diesel sont équipés d'un régulateur de vitesse qui permet de contrôler automatiquement la vitesse du moteur diesel en ajustant l'injection de carburant en fonction de la charge. La régulation de la vitesse de rotation permet de fixer la fréquence des grandeurs électriques produites par la génératrice à une valeur voulue (généralement 50Hz). de ce fait, la vitesse de rotation de référence est égale à $2\pi f$, avec f est la fréquence de la tension de sortie de la génératrice. Un régulateur PI simple pourra être utilisé pour réguler cette vitesse. En négligeant les pertes par friction, l'équation précédente (2.42) devient :

$$2J_d s \Omega_{dm}(s) = \left(K_{p\Omega} + \frac{K_{i\Omega}}{s} \right) (\Omega_{dm}^*(s) - \Omega_{dm}(s)) \quad (2.43)$$

d'ou on obtient l'équation de transfert qui régit la régulation de vitesse de la turbine.

$$\frac{\Omega_{dm}}{\Omega_{dm}^*} = \frac{1}{2J_d} (sK_{pd} + K_{id}) \quad (2.44)$$

$$\frac{\Omega_{dm}^*}{s^2 + s\frac{K_{id}}{2J_d} + \frac{K_{id}}{2J_d}}$$

La Figure 2.14 montre clairement le processus de régulation de la vitesse de la turbine diesel.

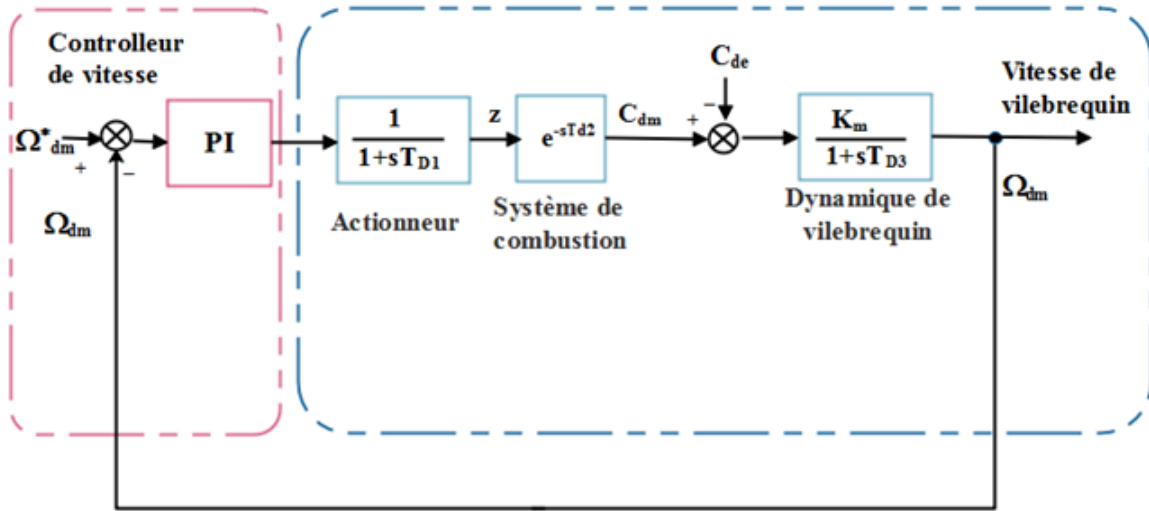


FIGURE 2.14 – bloc du système de régulation de la vitesse de la turbine diesel.

2.3.4.4 Modélisation de la génératrice synchrone

Une machine synchrone est le générateur d'énergie électrique le plus couramment utilisé. Comme son nom l'indique, le rotor tourne de manière synchrone avec le champ magnétique appliqué au stator. Le rotor est magnétisé par une alimentation séparée, qui est utilisée pour contrôler la tension aux bornes de la machine, c'est-à-dire l'excitateur. La vitesse du générateur est généralement contrôlée par un contrôleur de vitesse ou un régulateur agissant sur les machines entraînant le générateur. Dans ce cas, le régulateur de vitesse agit sur l'injection de carburant vers le moteur diesel. cette section concerne la modélisation de la machine synchrone elle-même, c'est-à-dire le modèle électrique . Le modèle électrique présenté ici est basé sur une représentation des enroulements équivalents dans un référentiel tournant, où l'ordre du modèle augmente avec le nombre d'enroulements. Un modèle de cinquième ordre, composé d'enroulements équivalents pour l'induit, le champ et l'amortissement, sont présentés dans cette section.

2.3.4.4.1 Equations électriques de la machine synchrone

La représentation schématique couramment employée dans l'étude de la génératrice synchrone est donné par la Figure 2.15. Le bobinage statorique est ramené à trois bobines orientées

Chapitre 2. Description et Modélisation du Système Hybride étudié

suivant les axes a ; b et c, tandis que les bobines rotoriques sont regroupées en une seule bobine orientée sur l'axe d. Les barres d'amortisseur sont modélisées par deux bobines, l'une est dirigée selon l'axe directe d et la deuxième selon l'axe en quadrature q. Les équations électriques qui régissent le comportement de l'ensemble des bobines indiquées sur la Figure 2.15 sont données par le système d'équations suivant [116] :

$$V = RI + \frac{d}{dt}(\Psi) \Leftrightarrow \begin{pmatrix} v_s^{abc} \\ v_r^{abc} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & R_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \psi_s^{abc} \\ \psi_r^{abc} \end{pmatrix} \quad (2.45)$$

Telles que :

$$\begin{aligned} [v_s^{abc}] &= [v_a \ v_b \ v_c]^T, [v_r^{abc}] = [v_f \ 0 \ 0]^T \\ [R_s] &= \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \text{ et } [R_r] = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.46)$$

$$\begin{pmatrix} v_s^{abc} \\ v_r^{abc} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & R_r \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{pmatrix} + \frac{d}{dt} \left(\begin{bmatrix} -L_{ss}^{abc}(\theta) & L_{sr}^{abc}(\theta) \\ (-L_{sr}^{abc}(\theta))^t & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{pmatrix} \right) \quad (2.47)$$

Les flux sont donnés par le système d'équations suivant :

$$\psi = L(\theta)i \Leftrightarrow \begin{pmatrix} \psi_s^{abc} \\ \psi_r^{abc} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{ss}^{abc}(\theta) & L_{sr}^{abc}(\theta) \\ (-L_{sr}^{abc}(\theta))^t & L_{sr}^{abc}(\theta) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{abc} \\ i_r^{abc} \end{pmatrix} \quad (2.48)$$

Avec :

$$[\psi_s^{abc}] = [\psi_a \ \psi_b \ \psi_c]^T, [\psi_r^{abc}] = [\psi_f \ \psi_D \ \psi_Q]^T \quad (2.49)$$

$$[i_s^{abc}] = [i_a \ i_b \ i_c]^T, [i_r^{abc}] = [i_f \ i_D \ i_Q]^T \quad (2.50)$$

$$L_{ss}^{abc}(\theta) = \begin{bmatrix} L_{aa}(\theta) & L_{ab}(\theta) & L_{ac}(\theta) \\ L_{ba}(\theta) & L_{bb}(\theta) & L_{bc}(\theta) \\ L_{ca}(\theta) & L_{cb}(\theta) & L_{cc}(\theta) \end{bmatrix}; L_{sr}^{abc}(\theta) = \begin{bmatrix} L_{af}(\theta) & L_{aD}(\theta) & L_{aQ}(\theta) \\ L_{bf}(\theta) & L_{bD}(\theta) & L_{bQ}(\theta) \\ L_{cf}(\theta) & L_{cD}(\theta) & L_{cQ}(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.51)$$

$$L_{rr}^{abc}(\theta) = \begin{bmatrix} L_{ff} & L_{fD} & L_{fQ} \\ L_{Df} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qf} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix}$$

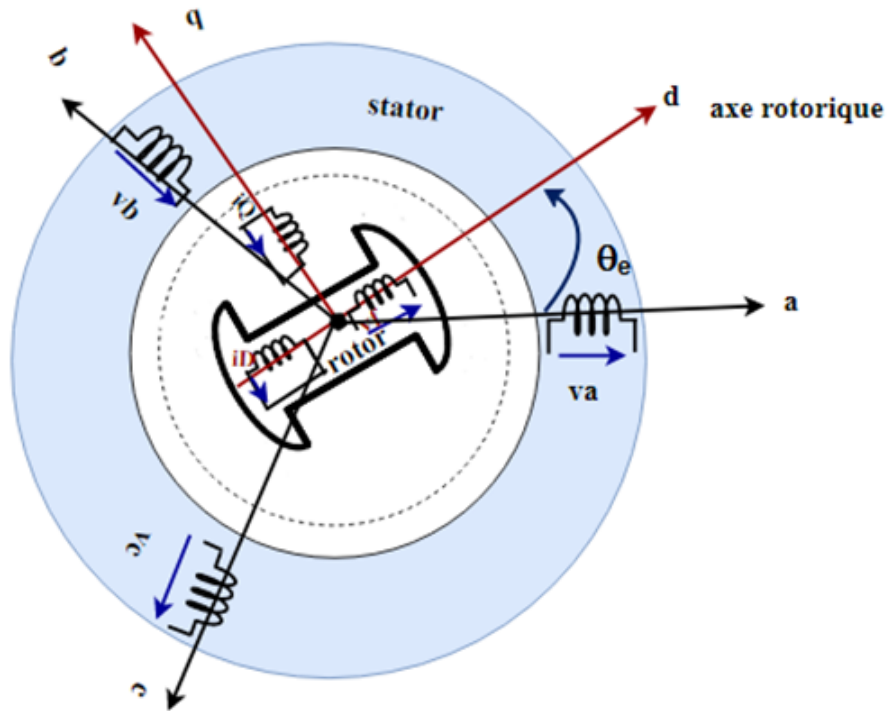


FIGURE 2.15 – Schéma d'étude de la machine synchrone triphasée (repère abc)

2.3.4.4.2 Equations électriques de la machine synchrone dans le repère dq

Les variables statoriques seront projetées sur l'axe d et l'axe q du plan rotatif dq. Les enroulements du rotor ne subissent aucune transformation car ils sont déjà orientés suivant l'axe d et l'axe q, tel qu'ils représentés dans la Figure 2.16. En appliquant la transformation de Park par l'utilisation des expressions qui suivent :

$$\begin{aligned}
 [I_{dq0}] &= P [I_{abc}] = \begin{bmatrix} i_d & i_q & i_0 \end{bmatrix}^T \\
 [\Psi_{dq0}] &= P [\Psi_{abc}] = \begin{bmatrix} \psi_d & \psi_q & \psi_0 \end{bmatrix}^T \\
 [V_{dq0}] &= P [V_{abc}] = \begin{bmatrix} v_d & v_q & v_0 \end{bmatrix}^T
 \end{aligned} \tag{2.52}$$

L'équation de flux dans le plan d-q est exprimé par l'équation suivante :

$$\begin{pmatrix} \psi_s^{dq0} \\ \psi_r^{dq0} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{ss}^{dq0} & L_{sr}^{dq0} \\ -\frac{3}{2} (L_{sr}^{dq0})^T & L_{rr} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} i_s^{d\sigma 0} \\ i_r^{dq0} \end{pmatrix} \tag{2.53}$$

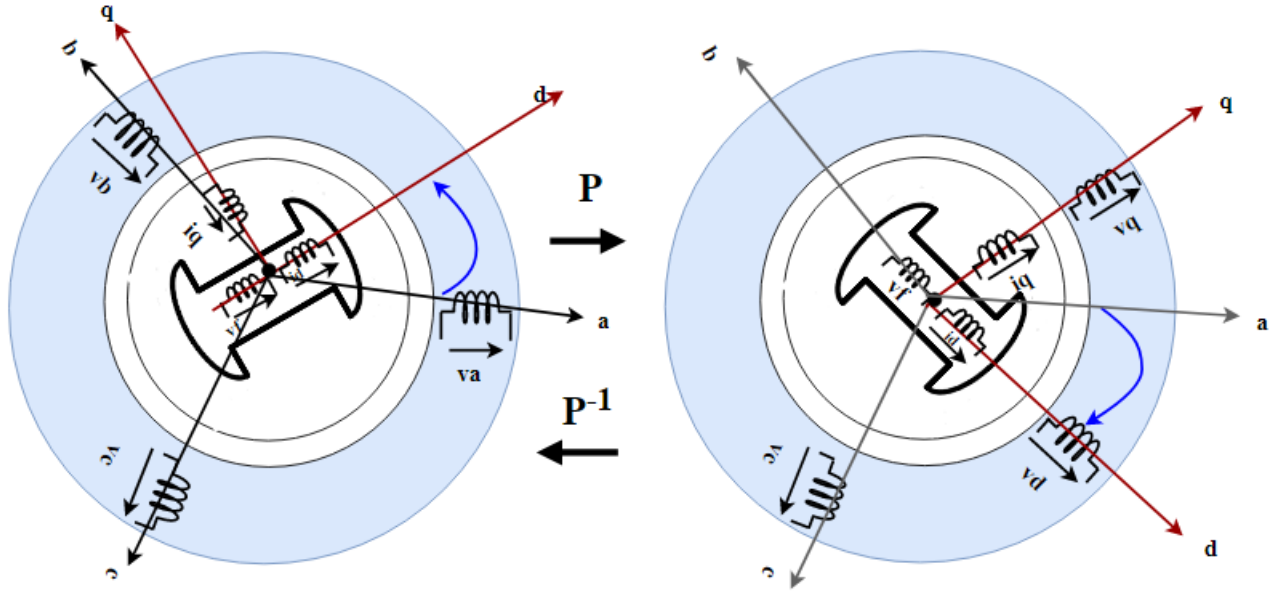


FIGURE 2.16 – Représentation de la génératrice synchrone dans le plan d-q
 Telles que :

$$L_{ss}^{dq0} = P \left(L_{ss}^{abc}(\theta) \right) P^{-1} = \begin{bmatrix} L_{dd} & 0 & 0 \\ 0 & L_{qq} & 0 \\ 0 & 0 & L_{00} \end{bmatrix} ; \quad (2.54)$$

$$L_{sr} = P L_{sr}^{abc}(\theta) = \begin{bmatrix} L_{aQ0} & L_{aD0} & 0 \\ 0 & 0 & L_{aQ0} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2.3.4.4.3 Circuits équivalents

Dans le repère de Park, la machine peut donc être vue comme deux ensembles de bobinages couplés tels que représentés à la Figure 2.17. Cinq enroulements sont représentés dans le modèle de circuit équivalent du cadre de référence du rotor. À savoir, les enroulements de stator d'axe direct et en quadrature (d et q), l'enroulement de champ de rotor (f) et les enroulements d'amortisseur d'axe d et q (D et Q). La direction du courant du stator est définie comme sortant de la machine conformément à la convention du générateur. A partir de la formule des tensions dans le repère abc dans l'équation 2.47 Les expressions des tensions après transformation deviennent :

$$\begin{bmatrix} v_s^{dq0} \\ v_r^{dq0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s^{dq0} \\ i_r^{dq0} \end{bmatrix} + P \begin{bmatrix} \psi_s^{dq0} \\ \psi_r^{dq0} \end{bmatrix} + \omega_m W \begin{bmatrix} \psi_s^{dq0} \\ \psi_r^{dq0} \end{bmatrix} \quad (2.55)$$

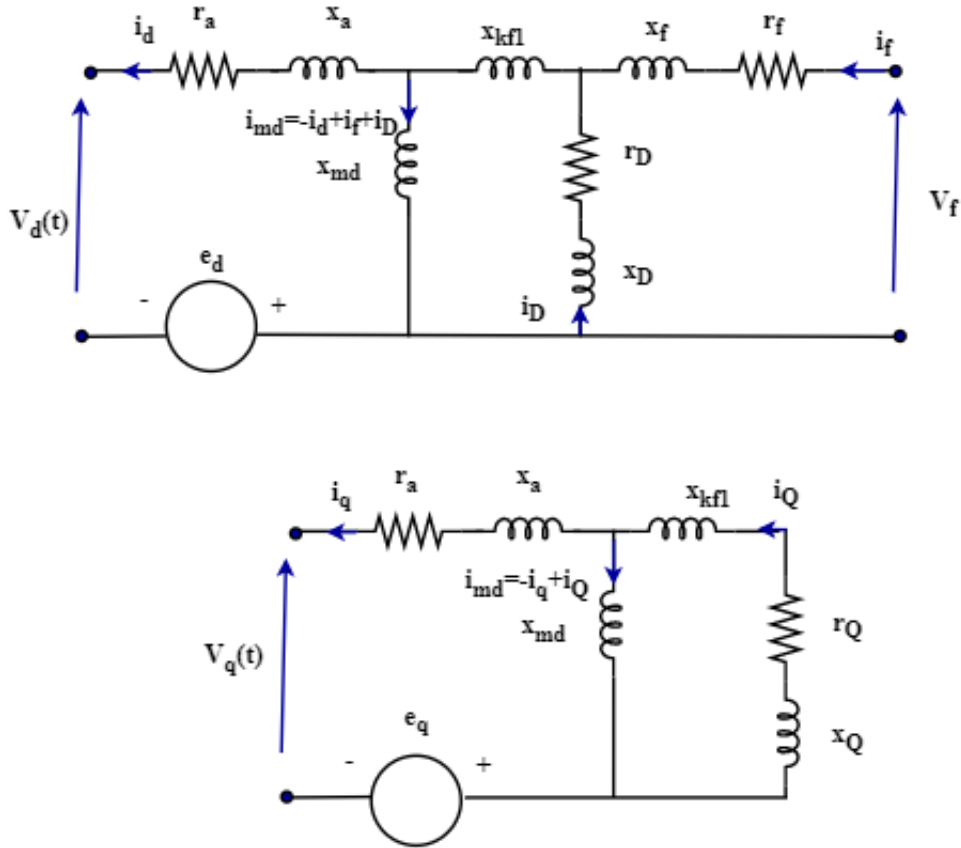


FIGURE 2.17 – Schéma équivalents de la génératrice synchrone dans le repère dq
Avec :

$$\omega_m = \frac{d}{dt}\theta; W = \begin{bmatrix} J & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & 0_{3,3} \end{bmatrix}; J = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

La représentation par unité de la machine synchrone peut être utilisée pour normaliser les variables de la machine. De plus, le système par unité offre une simplicité de calcul et permet de faciliter le calcul et l'évaluation du modèle mathématique plus aisément en éliminant les unités et en exprimant les quantités du système sous forme de rapports sans dimension par rapport à l'utilisation d'unités physiques (ampères, volts, ohms, webers, henrys, etc.). les résultats alors obtenus sont donnés en valeur réduite (pu) dans les équations suivantes : Expression des flux en pu :

$$\begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -X_{ss} & X_{sr} \\ -X_{sr}^T & X_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} \quad (2.57)$$

Avec :

$$X_{ss} = \begin{bmatrix} x_d & 0 & 0 \\ 0 & x_q & 0 \\ 0 & 0 & x_0 \end{bmatrix}; X_{rr} = \begin{bmatrix} x_{ff} & x_{fD} & 0 \\ x_{Df} & x_{DD} & 0 \\ 0 & 0 & x_{QQ} \end{bmatrix}; X_{sr} = \begin{bmatrix} x_{df} & x_{dD} & 0 \\ 0 & 0 & x_{Qq} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.58)$$

les réactances mutuelles sont données par l'équation suivant :

$$\begin{aligned} x_d &= x_{md} + x_a; x_q = x_{mq} + x_a; x_0 \approx x_a \\ x_{ff} &= x_{md} + x_{kf_1} + x_f; x_{DD} = x_{md} + x_D + x_{kf_1}; \\ x_{QQ} &= x_{mq} + x_Q; x_{df} = x_{fd} = x_{md}; \\ x_{dD} &= x_{dD} = x_{md}; x_{Qq} = x_{qQ} = x_{mq}; \\ x_{fD} &= x_{Df} = x_{DD} - x_D = x_{md} + x_{kf_1} \end{aligned} \quad (2.59)$$

Les tensions en [pu] sont données par l'équation suivant :

$$\begin{bmatrix} V_s \\ V_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -r_s & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_r \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_n} P \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} + \omega_m \begin{bmatrix} J & 0_{3,3} \\ 0_{3,3} & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} \quad (2.60)$$

2.3.4.5 système d'excitation

La fonction principale d'un système d'excitation est de fournir et d'ajuster automatiquement le courant de champ du générateur synchrone en tenant compte des fonctions de contrôle et de protection essentielles au bon fonctionnement du système. Les fonctions de contrôle comprennent le contrôle de la tension et l'amélioration de la stabilité du système. Les fonctions de protection garantissent que les limites de capacité de la machine synchrone, du système d'excitation et d'autres équipements ne sont pas dépassés. Le schéma fonctionnel d'un système de contrôle d'excitation typique est illustré à la Figure (2.18).

2.3.4.5.1 Circuits de stabilisation du système d'excitation

Les systèmes d'excitation composés d'éléments avec des retards importants ont des performances dynamiques médiocres. Par conséquent, des circuits de stabilisation de système d'excitation sont utilisés pour améliorer les performances dynamiques du système de commande d'excitation de commande. La rétroaction dérivée est la forme de compensation la plus couramment utilisée. Le but de la compensation est de minimiser le déphasage introduit par les retards temporels sur une plage de fréquence sélectionnée.

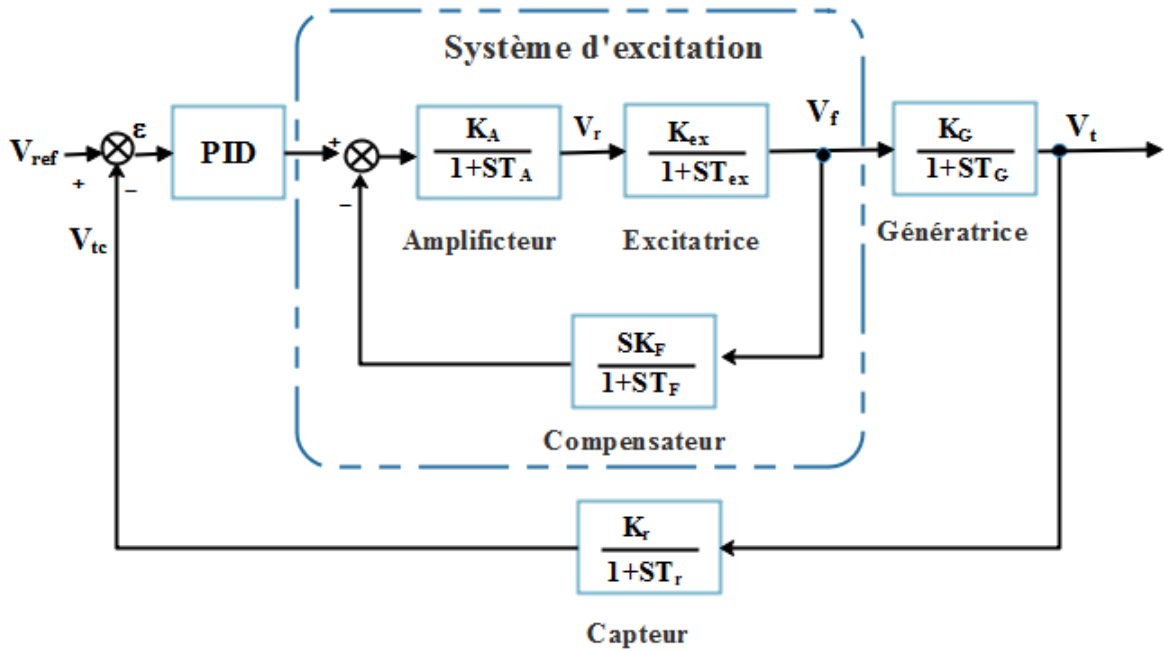


FIGURE 2.18 – Schéma fonctionnel d'un synchrone système d'excitation du générateur

2.3.5 Modèles des convertisseurs statiques

Les convertisseurs électroniques de puissance jouent un rôle majeur dans les systèmes d'énergie renouvelable. Les convertisseurs électroniques de puissance dans les micro-réseaux utilisent diverses topologies, selon différentes applications. Sur la base de la puissance d'entrée et de sortie, les convertisseurs électroniques de puissance peuvent être classés en tant que convertisseurs DC/DC et convertisseurs DC/AC. Les convertisseurs DC/DC convertissent les tensions et courants CC d'entrée en tensions et courants CC de sortie contrôlés. Les convertisseurs DC/DC Boost, buck et boost-buck sont trois convertisseurs couramment utilisés pour les circuits électroniques de puissance. Les convertisseurs AC/DC convertissent les entrées AC en un DC communément connus sous le nom de redresseurs, sont largement utilisés dans les systèmes d'énergie renouvelable tels que les micro-réseaux DC connectés au réseau, les systèmes de conversion d'énergie solaire photovoltaïque connectés au réseau, parmi ces convertisseurs, Les redresseurs à diode changent la tension d'entrée ca appliquée en une tension continue fixe, et le deuxième type est les redresseurs à commande de phase. Contrairement aux redresseurs à diode, les redresseurs à commande de phase sont conçus pour convertir une valeur fixe de la tension du signal alternatif en une tension continue variable. Les convertisseurs DC/AC convertissent les entrées DC en sorties AC contrôlées ou vice versa. En revanche, l'onduleur est conçu pour ajuster la tension et la fréquence du courant alternatif. L'entrée appliquée est une tension continue fixe qui peut être obtenue à partir du bus continu, mais la sortie obtenue est une tension alternative variable. La tension et la fréquence du

signal obtenu sont de nature variable.

2.3.5.1 Modèle moyen du convertisseur survolteur

Le convertisseur élévateur est souvent utilisé dans les applications d'énergie renouvelable dans le solaire et l'éolien. Étant donné que la production d'énergie solaire et éolienne est intrinsèquement intermittente, il est essentiel, pour augmenter l'efficacité globale du système, de tenir compte de l'impact de sa nature intermittente. Le hacheur survolteur est un convertisseur DC/DC, qui fournit une tension plus élevée que celle appliquée à son entrée. il permet d'adapter la tension aux bornes du panneau PV selon la stratégie de commande appliquée, cette adaptation est réalisée par la variation du rapport cyclique de la tension appliquée sur la gâchette (la base) de son interrupteur. L'entrée de l'hacheur survolteur montrée sur la Figure (2.19) est connectée aux panneaux PV, alors que sa sortie est connectée au bus DC. Le flux de puissance est contrôlé en

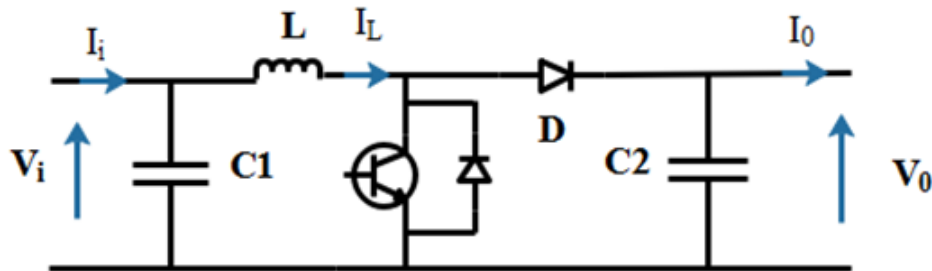


FIGURE 2.19 – Schéma de principe d'un hacheur survolteur.

faisant varier le rapport cyclique α de la période de commutation T_s . Selon l'état de l'interrupteur S , le fonctionnement du convertisseur peut être subdivisé en deux états de fonctionnement :

$S = 0; t \in [0, \alpha T_s]$: pendant l'état passant, la diode est polarisée en inverse (Voir Figur2.20). L'énergie est stockée dans l'inductance L et le schéma de principe devient :

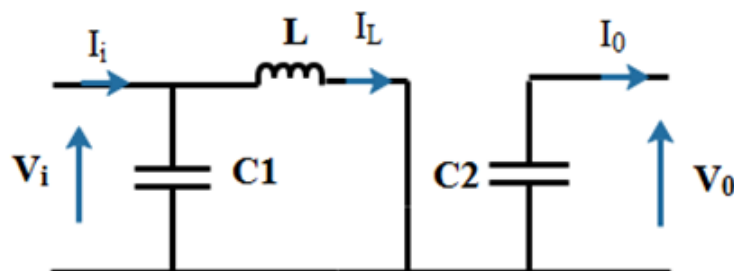


FIGURE 2.20 – Schéma équivalent de la première séquence de conduction.

$$\begin{cases} C_1 \frac{d}{dt} V_i(t) = i_i(t) - i_L(t) \\ C_2 \frac{d}{dt} V_0(t) = i_0(t) \\ L \frac{d}{dt} i_L(t) = V_i(t) \end{cases} \quad (2.61)$$

$S = 1; t \in [\alpha T_s, T_s]$ Figure 2.21 : pendant l'état bloqué, la diode D est polarisée en direct. L'énergie stockée est transférée de L vers la capacité C_2 . Les équations des mailles fournissent :

$$\begin{cases} C_1 \frac{d}{dt} V_i(t) = i_i(t) - i_L(t) \\ C_2 \frac{d}{dt} V_0(t) = i_L(t) - i_0(t) \\ L \frac{d}{dt} i_L(t) = V_i(t) - V_0(t) \end{cases} \quad (2.62)$$

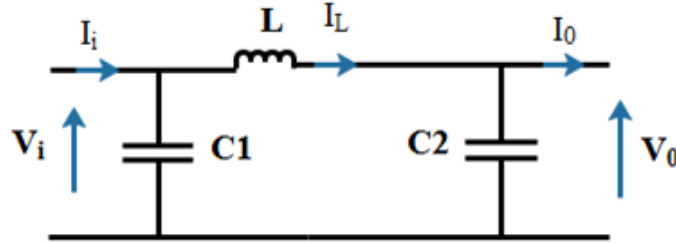


FIGURE 2.21 – Schéma équivalent de la deuxième séquence de conduction.

En utilisant 2.61 et 2.62, le modèle moyen du convertisseur est pondérés par le rapport cyclique α peut être écrit comme :

$$\begin{cases} C_1 \frac{d}{dt} V_i(t) = i_i(t) - i_L(t) \\ C_2 \frac{d}{dt} V_0(t) = (1 - \alpha) i_L(t) - i_0(t) \\ L \frac{d}{dt} i_L(t) = V_i(t) - (1 - \alpha) V_0(t) \end{cases} \quad (2.63)$$

2.3.5.2 Modèle moyen du convertisseur bidirectionnel

Pour gérer les échanges d'énergie entre le bus continu, les sources principales et le dispositif de stockage, on peut définir deux modes (ou états) de fonctionnement :

1. **Mode charge** : Dans ce mode, la source principale fournit de l'énergie au dispositif de stockage et à la charge..

Chapitre 2. Description et Modélisation du Système Hybride étudié

2. **Mode décharge** : Ici, la source principale et le dispositif de stockage fournissent de l'énergie à la charge..

Pour les dispositifs de stockage d'énergie électrique, un convertisseur DC-DC bidirectionnel est essentiel. Selon le scénario de fonctionnement, le convertisseur bidirectionnel permet de contrôler la puissance transférée dans les deux sens. Il permet de charger (en mode abaisseur) et de décharger (mode élévateur) le dispositif stockage . Le convertisseur fonctionne avec deux interrupteurs commandables ($S1, S2$) comme montré dans la figure 2.22 ; le fonctionnement des deux interrupteurs sont à commande complémentaire, c'est-à-dire il fonctionnera en mode élévateur lorsque le commutateur $S1$ est déclenché, tandis que le mode abaisseur fonctionnera lorsque le commutateur $S2$ est déclenché[19].

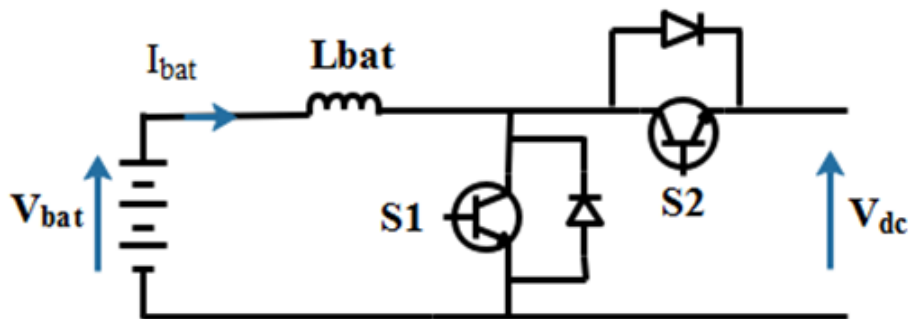


FIGURE 2.22 – Schéma de principe d'un Hacheur réversible

L'analyse de commutation se fait en deux phases qui décrivent les caractéristiques électriques du circuit lors de la commutation. Dans la figure 2.23, un circuit équivalent de la première séquence de commutation, lorsque l'interrupteur $S1$ est passant et l'interrupteur $S2$ est bloqué, pendant l'intervalle :

$t \in [0, \alpha_{bat}T_s]$ Où α_{bat} est le rapport cyclique et T_s est la période de commutation.

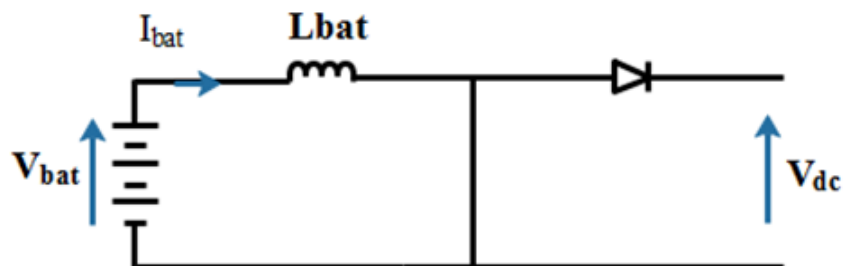


FIGURE 2.23 – Le schéma équivalent de la Première séquence du mode élévateur où $S2$ est ouvert et $S1$ est fermé.

Chapitre 2. Description et Modélisation du Système Hybride étudié

L'équation dynamique de la tension de la batterie est décrite par :

$$V_{bat} = L_{bat} \frac{d}{dt} i_{bat}(t) \quad (2.64)$$

La deuxième séquence de conduction Cela se produit pendant l'intervalle : $t \in [\alpha_{bat}T_s, T_s]$ $S1$ est ouvert et l'interrupteur $S2$ est fermé

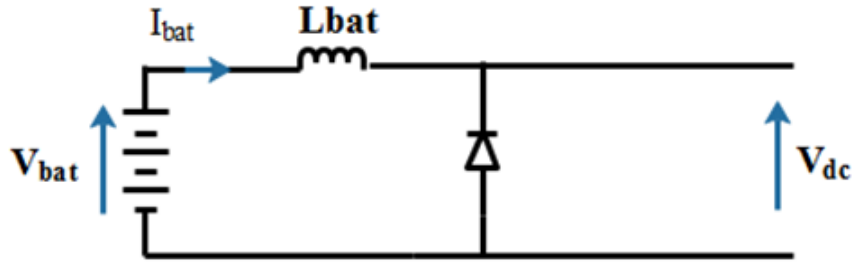


FIGURE 2.24 – Le schéma équivalent de de la deuxième séquence du mode abaisseur où $S1$ est ouvert et $S2$ est fermé.

$$V_{bat} = L_{bat} \frac{d}{dt} i_{bat}(t) + V_{dc} \quad (2.65)$$

le modèle moyen de ce convertisseur est donnée par la relation suivante :

$$L_{bat} \frac{d}{dt} i_{bat}(t) = V_{bat} - (1 - \alpha_{bat})V_{dc} \quad (2.66)$$

Le modèle de l'équation (2.66) reproduit le comportement de la batterie en cas de charge ($i_{bat} < 0$) et de décharge ($i_{bat} > 0$).

2.3.5.3 Modèle du Redresseur à diodes

Les convertisseurs de puissance sont principalement utilisés pour interfacer le générateur GSAP au bus continu ou au réseau afin de convertir la tension variable et la fréquence variable générées en amplitude de tension constante et fréquence constante du réseau. De plus, des convertisseurs de puissance permettent de contrôler la vitesse du générateur, afin de faire fonctionner la turbine dans ses conditions de fonctionnement optimales conduisant à extraire la puissance maximale admissible pour une vitesse de vent donnée. La figure 2.25 montre la structure du système d'une éolienne à vitesse variable basée sur GSAP. Un redresseur à diode triphasée avec un hacheur à diode élévateur DC/DC peut être utilisé pour remplacer le redresseur à MLI. Cela pourrait simplifier le contrôle et potentiellement réduire le coût du système. Le redresseur à diode est la topologie la plus simple, la moins chère et la plus robuste utilisée dans les applications électroniques de

Chapitre 2. Description et Modélisation du Système Hybride étudié

puissance. L'inconvénient de ce redresseur à diode est son incapacité à fonctionner en flux de puissance bidirectionnel. Les tensions d'entrée qui sont des ondes sinusoïdales (120°) déphasées sont représentées par les équations :

$$\begin{cases} V_{an} = V_m \sin(\omega t) \\ V_{bn} = V_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ V_{cn} = V_m \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (2.67)$$

Où, V_m est la valeur de crête de la tension de phase. Comme la tension ligne à ligne est en avance de 30° sur la tension de phase, les tensions de sortie instantanées composées du générateur sont données par :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_m \sin(\omega t - 30^\circ) \\ V_{bc} = V_m \sin(\omega t - 90^\circ) \\ V_{ca} = V_m \sin(\omega t - 210^\circ) \end{cases} \quad (2.68)$$

- les diodes sont supposées parfaites (interrupteurs parfaits).
- Deux diodes d'un même bras ne peuvent pas conduire simultanément.
- Deux diodes qui conduisent à chaque séquence.
- correspondent à la phase ayant la tension la plus positive pour la diode du demi-pont supérieur et à la phase ayant la tension la plus négative pour la diode du demi-pont inférieur. Lorsque D_1 conduit, l'une des deux diodes D'_2 , D'_3 conduit également. Il vient que D_1 conduit lorsque V_1 est plus positive que V_2 et V_3 , ou encore[109] :

$$V_1 = \text{MAX}(V_j); j = 1, 2, 3 \quad (2.69)$$

Le même raisonnement conduit aux conditions suivantes :

$$D_i \text{ conduit si } V_i = \text{MAX}(V_j); j = 1, 2, 3; i = 1, 2, 3 \quad (2.70)$$

$$D_i \text{ conduit si } V_i = \text{Min}(V_j); j = 1, 2, 3; i = 1, 2, 3 \quad (2.71)$$

Pendant chaque séquence de conduction, la tension V_{red} à la sortie du redresseur est :

$$V_{red} = \text{MAX}(V_j) - \text{Min}(V_j); j = 1, 2, 3; \quad (2.72)$$

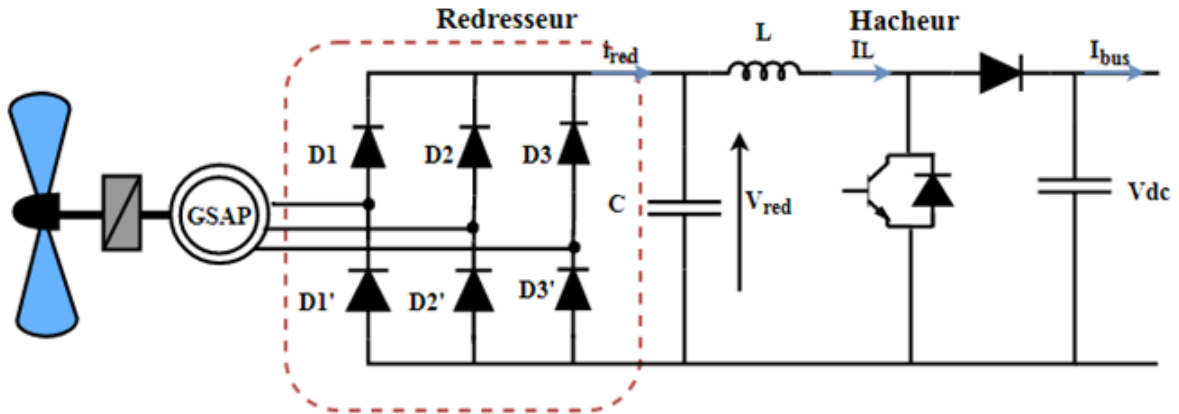


FIGURE 2.25 – Topologie d’un système de production d’énergie éolienne avec redresseur à diodes et convertisseur élévateur continu-continu.

Comme on l’a mentionné précédemment, le redresseur à diode est la topologie la plus simple, la moins chère et la plus robuste utilisée dans les applications électroniques de puissance. l’Inconvénient Majeur de ce redresseur à diode est son incapacité à fonctionner en flux de puissance bidirectionnel. La tension continue de sortie du redresseur à pont de diodes triphasées peu être obtenue à partir de l’équation 2.73 où le chevauchement dû à l’inductance interne du GSAP est ignoré [117].

$$V_{red} = \frac{3\sqrt{3}V_{ab}}{\pi} \quad (2.73)$$

Où : V_{red} : tension continue d’entrée pour le convertisseur élévateur. V_{ab} : tension composé du GSAP.

2.3.5.4 Modèle du Onduleur triphasé à deux niveaux

Comme le montre la Figure 2.26, les interrupteurs de l’onduleur sont composés des transistors et des diodes branchés en antiparallèle .Tous les éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux, leurs commande à l’ouverture et à la fermeture permettant la bidirectionnalité du courant. La commande des deux commutateurs sur le même bras est complémentaire : La conduction de l’un d’eux implique le blocage de l’autre. Les tensions en ligne sont exprimées en fonction de la tension du bus continue et les états des commutateurs[19] :

$$S_a = \begin{cases} 1 & \text{si } T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } T_1 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermé} . \end{cases} \quad (2.74)$$

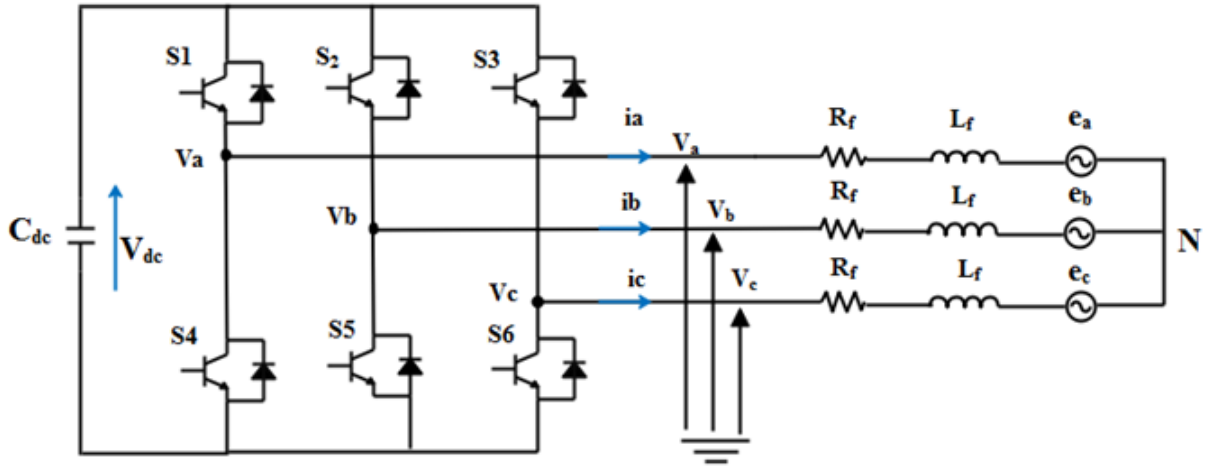


FIGURE 2.26 – Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux coté réseau

$$S_b = \begin{cases} 1 & \text{si } T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermé} . \end{cases} \quad (2.75)$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & \text{si } T_3 \text{ fermé et } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } T_3 \text{ ouvert et } T_6 \text{ fermé} . \end{cases} \quad (2.76)$$

Les tensions de lignes délivrées par l'onduleur sont [118] :

$$\begin{cases} V_{ab} = V_a - V_b = V_{dc}(S_a - S_b) \\ V_{bc} = V_b - V_c = V_{dc}(S_b - S_c) \\ V_{ca} = V_c - V_a = V_{dc}(S_c - S_a) \end{cases} \quad (2.77)$$

Les tensions simple V_a , V_b et V_c forment un système de tension triphasées équilibrées :

$$\begin{cases} V_a = \frac{V_{dc}}{3}(2S_a - S_b - S_c) \\ V_b = \frac{V_{dc}}{3}(2S_b - S_a - S_c) \\ V_c = \frac{V_{dc}}{3}(2S_c - S_a - S_b) \end{cases} \quad (2.78)$$

La représentation matricielle du système d'équations précédente est donnée en fonction du vecteur des signaux de commandes $[S_a; S_b; S_c]^T$ comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} -2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.79)$$

Chapitre 2. Description et Modélisation du Système Hybride étudié

Les équations de tension peuvent être écrites en utilisant la loi de Kirchhoff comme suite :

$$L_g \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_g & 0 & 0 \\ 0 & -R_g & 0 \\ 0 & 0 & -R_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a - V_a \\ e_b - V_b \\ e_c - V_c \end{bmatrix} \quad (2.80)$$

La transformation des équations de tensions dans la référentiel d-q par la matrice de Park donne :

$$L_g \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_g & \omega L_g \\ -\omega L_g & -R_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d - V_d \\ e_q - V_q \end{bmatrix} \quad (2.81)$$

2.3.5.5 Filtre RL

Le filtre RL est utilisé pour connecter l'onduleur aux réseaux car ils ont des amplitudes de tension et des phases différentes, il maintient une différence de tension entre le réseau et l'onduleur qui permet à la puissance de circuler vers le réseau. De plus, le filtre RL réduit les harmoniques générés par les composants électroniques du système. Les puissances actives et réactives mesurées sont ensuite directement comparées aux valeurs de référence (Pref) et (Qref), Qref est toujours mis à zéro pour éliminer la production de puissance réactive, cela garantit un angle de phase nul entre la tension et le courant conduisant à un facteur de puissance unitaire. D'autre part, Pref est défini en fonction de la sortie des générateurs principaux et de la demande de charge. Le mécanisme de contrôle responsable de la découverte (V_d^* et V_q^*) a également été modélisé dans Simulink et est illustré dans la figure ci-dessous :

— a-b-c :

$$\begin{cases} V_a = R_f \cdot i_a + L_f \frac{d}{dt} i_a + V_{ga} \\ V_b = R_f \cdot i_b + L_f \frac{d}{dt} i_b + V_{gb} \\ V_c = R_f \cdot i_c + L_f \frac{d}{dt} i_c + V_{gc} \end{cases} \quad (2.82)$$

— d-q :

$$\begin{cases} V_d = R_f \cdot i_d + L_f \frac{d}{dt} i_d - L_f \omega i_q + V_{gd} \\ V_q = R_f \cdot i_q + L_f \frac{d}{dt} i_q + L_f \omega i_d + V_{gq} \end{cases} \quad (2.83)$$

Où :

- L_f : présente l'inductance du filtre.
- R_f : présente la résistance du filtre.

2.3.6 Modélisation du bus continu

Le bus DC est un circuit ou un mécanisme qui doit assurer une tension stable à ses bornes. il comporte d'un condensateur qui joue le rôle de réservoir lors de l'échange d'énergie et permet de limiter l'ondulation de la tension continue où tous les convertisseurs DC-DC ou AC-DC intégrés dans le système hybride sont connectés au bus continu . Chaque convertisseur exerce son influence sur le circuit par le courant qu'il donne ou qu'il prend au condensateur. Le contrôle de la tension du bus CC est crucial pour la performance stable et souhaitée du micro-réseau. Le bus continu peut être représenté par le schéma de la figure 2.27 L'évolution temporelle de la tension du bus

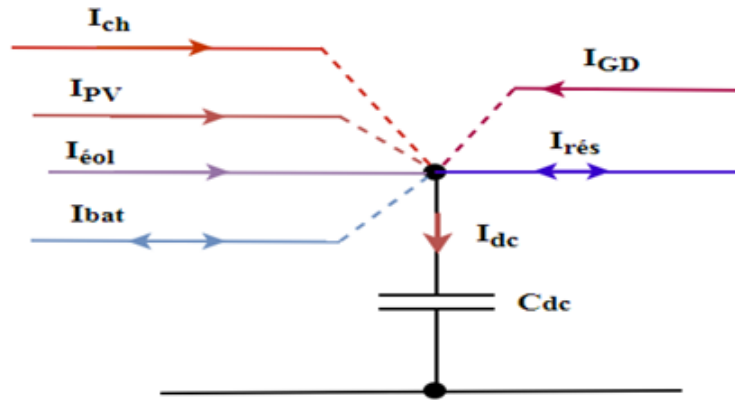


FIGURE 2.27 – Modèle du bus continu.

continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif :

$$i_{Cdc} = C \frac{d}{dt} V_{dc} \quad (2.84)$$

Le courant du condensateur est issu d'un nœud où circulent les courants I_{pv-dc} , I_{eol-dc} , I_{ch-dc} , I_{bat-dc} , I_{res-dc} modulés par les convertisseurs[113][19] :

$$i_{Cdc} = I_{pv-dc} + I_{eol-dc} - I_{ch-dc} + I_{bat-dc} + I_{res-dc} \quad (2.85)$$

2.3.6.1 Estimation de la valeur de la tension du bus continu

Pour pouvoir utiliser un onduleur de tension connecté à un réseau triphasé avec des tensions de phase jusqu'à 240V, nous avons besoin d'une tension de bus DC élevée, La tension du bus DC doit être supérieure à la valeur maximale (valeur de crête) de la tension entre phases du côté AC de l'onduleur On veut donc que la tension du bus continu soit supérieure à 600V, soit $V_{bus} = 700V$, pour pouvoir fonctionner dans toutes les conditions. Il est important de définir la tension du bus continu V_{dc} comme valeur de référence. La tension du bus CC doit être supérieure à la

Chapitre 2. Description et Modélisation du Système Hybride étudié

valeur maximale (valeur de crête) à 1,63 fois de la tension entre phases du côté AC de l'onduleur. L'auteur de la référence [119] introduit une hypothèse, basée sur le fait que généralement la valeur pratique de l'inductance L_f est faible, due au choix d'une fréquence de commutation élevée. Cela entraîne que la tension de l'onduleur V_{f1} est approximativement égale à la tension de source V_s [22].

$$m_a = \frac{2\sqrt{2}V_{f1}}{V_{dcref}} \quad (2.86)$$

Donc, pour un coefficient de régulation maximal ($m_a = 1$), l'expression de V_{dcref} s'écrit :

$$m_a = 1 \implies V_{dcref} = 2\sqrt{2}V_{f1} \quad (2.87)$$

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure de l'architecture étudiée et la modélisation des différents composants du système hybride considéré, à citer : générateur photovoltaïque, générateur éolien, groupe diesel, le système de stockage et le réseau électrique, ainsi que les convertisseurs statiques introduits. Le cœur de notre étude sera la conception du bloc de gestion d'énergie du système que nous allons décrire au cours du chapitre suivant, ayant comme but de gérer adéquatement le flux d'énergie pour satisfaire la demande instantanée de la charge.

CHAPITRE III : Les Techniques de Commande D'un Système d'Energie Hybride

« Il y a dans chaque être hu-
main une force intérieure qui,
une fois libérée, peut faire de
chaque vision, rêve ou désir,
une réalité. »

Anthony Robbins

3

Les Techniques De Commande D'un Système D'Energie Hybride

Sommaire

3.1	Introduction	93
3.2	Description des Modes de fonctionnement du système hybride	94
3.2.1	Les modes d'opération du SEH en mode connecté au réseau	95
3.2.2	Les modes d'opération du SEH en mode autonome	97

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Énergie Hybride

3.3	Stratégie de gestion de l'énergie basée sur Stateflow	99
3.3.1	Stateflow	99
3.4	Stratégie de gestion de l'énergie basée sur Réseaux de neurones artificiels	103
3.4.1	Neurone formel	104
3.5	Commande rapprochée des convertisseurs statiques	114
3.5.1	Commande hacheur suvolteur côté photovoltaïque (PV)	114
3.5.2	Commande hacheur suvolteur côté chaîne de conversion éolienne	118
3.5.3	Commande de la batterie	124
3.5.4	Commande et réglage de bus continu	127
3.5.5	la commande des puissances active et réactive côté réseau	133
3.5.6	Contrôle des puissances active et réactive coté générateur diesel	137
3.5.7	Contrôle de l'onduleur côté charge	139
3.6	Conclusion	140

3.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons établi les modèles mathématiques de chaque composant du système multi-source :PV, éolien, batterie, Générateur diesel,plus les convertisseurs statiques. La première section de ce chapitre a été consacrée aux études théoriques de deux stratégies de gestion d'énergie qui permettent de gérer d'une façon intelligente les flux de puissance entre les différents modules du système hybride dans le but de répondre instantanément à la demande de la charge. la première stratégie basée sur un outil de programmation graphique (Statflow), qui permet de visualiser à chaque instant la transition entre les modes de fonctionnement des différents éléments qui constituent notre système . La deuxième stratégie consiste en un outil de prédiction basé sur un algorithme réseau neurone de type Elman qui permet de prédire sur un horizon donné, la puissance de référence des batteries de stockage et la puissance de référence du réseau ainsi que la prédiction de la consommation de la charge. Par la suite, nous allons synthétiser les techniques de commandes nécessaires de commande de chaque sous systeme du micro réseau . Il est organisé de la manière suivante : Dans une première partie, nous devons maximiser la production des sources d'ER (PV et éolien) en appliquant les algorithmes MPPT.La deuxième partie concerne le contrôle de la tension du bus DC à une valeur de référence. Enfin, nous terminerons cette partie par le contrôle appliqué sur l'onduleur La figure 3.1 illustre le schéma global de notre SEH avec le système de supervision. Afin d'atteindre les différents objectifs de ce travail.

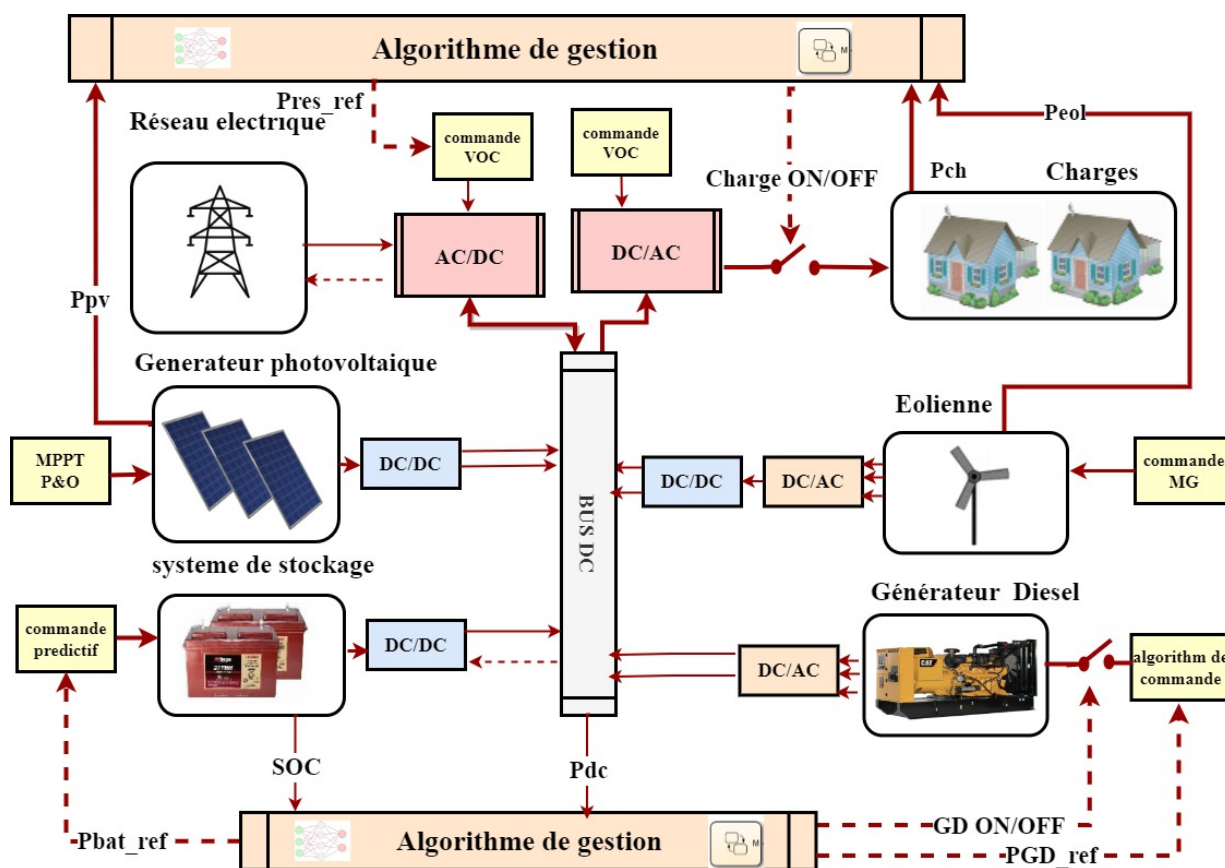


FIGURE 3.1 – Schéma synoptique globale du système hybride.

3.2 Description des Modes de fonctionnement du système hybride

L'algorithme de gestion représente un système de supervision optimisant le flux énergétique entre les différents composants du micro réseau et assurent la commutation entre les deux modes pour différents scénarios possibles. Ces derniers sont asservis par les contrôleurs locaux, qui eux même sont sous le contrôle du système de gestion globale. Dans l'objectif d'assurer un fonctionnement optimal, le mécanisme de commutation est un algorithme conditionnel utilisé pour déconnecter ou connecter le réseau du micro-réseau, ce qui peut permettre de fonctionner en mode autonome si nécessaire. La caractérisation des modes de fonctionnement du système

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Énergie Hybride

hybride se base sur des contraintes spécifiques. L'algorithme proposé de gestion des flux énergétiques a comme objectif principale de satisfaire la demande, tout en gardant un équilibre entre les différents composants du système hybride dans tout les scénarios de fonctionnement possibles, et cela en se basant sur les directives suivantes :

- Dans le cas où les batteries sont complètement chargées, le surplus d'énergie produite par le système hybride est transféré vers le réseau.
- Seule la charge avec la priorité la plus importante qui peut être soutenue par le réseau, en cas où le système hybride ne permet pas de satisfaire la demande avec la priorité la plus importante. Les autres charges sont déconnectées par ordre de priorité croissant, cela permet de maintenir une certaine indépendance vis-à-vis le réseau, et donc de réduire le coût global.
- L'algorithme de gestion doit assurer une transition lisse entre les différents modes du fonctionnement.
- L'utilisation des énergies renouvelables est favorisée. En cas de limitation, cette dernière doit être distribuée de façon équilibrée entre les générateurs PV et éolien.
- La durée de vie et la disponibilité des batteries doivent être préservées, par une gestion adéquate des opérations charge/décharge du système de stockage.

3.2.1 Les modes d'opération du SEH en mode connecté au réseau

Dans ce mode et à cause de l'existence du réseau électrique ,on a recouru au réseau électrique si le système de stockage atteint son niveau minimum, Si il ya un surplus d'énergie et que les batteries sont complètement chargées, il est envoyé vers le réseau électrique. Compte tenu de ces considérations, l'algorithme de gestion présente seulement six modes de fonctionnement(Figure3.3), qui sont :

- **Mode d'injection au réseau :** Les batteries sont complètement chargées,et le surplus d'énergie est injecté au réseau, les batteries sont aussi protégées contre la surcharge.

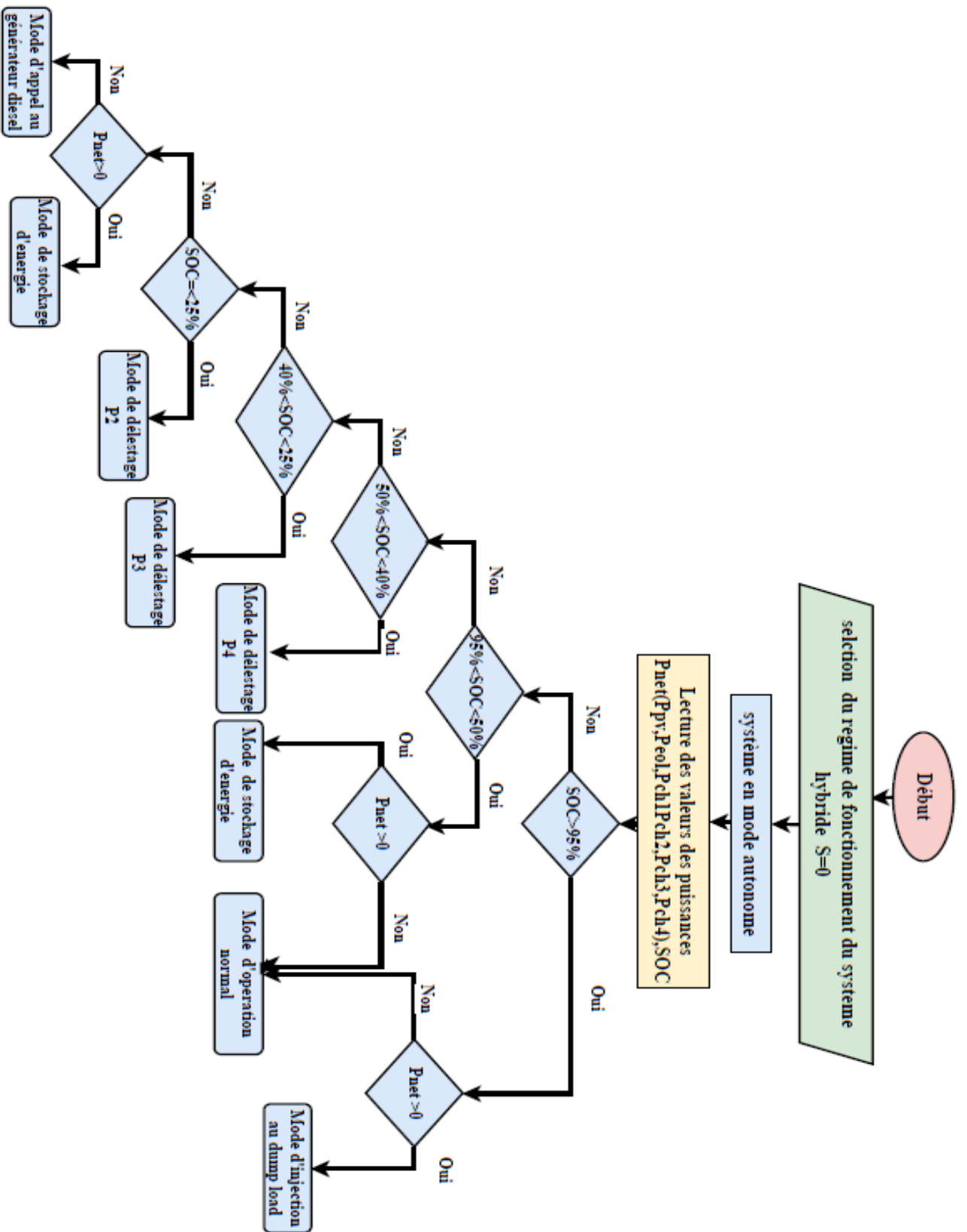


FIGURE 3.2 – Organigramme de l'algorithme de gestion du système hybride en mode autonome.

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Énergie Hybride

- **Mode de stockage d'énergie :** La puissance produite par les deux générateurs est supérieure à la demande, et en même temps, le *SOC* est inférieur à 95%, donc le surplus d'énergie va charger les batteries .
- **Mode d'opération normale :** Ce mode apparaît, quand l'état de charge des batteries *SOC* est entre 50% et 95% , dans ce cas les générateurs PV et éolien produisent de l'énergie électrique suivant les conditions climatiques. Le système hybride satisfait la demande et toutes les charges sont connectées.
- **Mode de délestage de la charge P4 :** Ce mode est survenu quand, l'état de charge des batteries chute en dessous de 50% mais reste supérieure à 40%. Pour éviter une décharge rapide des batteries et par la suite la nécessité de solliciter le réseau électrique. L'algorithme de supervision va commuter en fermeture la charge avec la plus faible priorité (charge P4).
- **Mode de délestage de la charge P3 :** Si le *SOC* des batteries décroît à une valeur inférieure à 40% mais demeure supérieure à 25%, les batteries peuvent toujours fonctionner en mode décharge. Mais pour prolonger l'indépendance du système hybride vis-à-vis le réseau électrique, la charge avec la troisième priorité (charge P3) est commutée en fermeture, elle est ajoutée donc à la charge prioritaire P4.
- **Mode sollicitation du réseau électrique :** Si les batteries continuent à se décharger, et le *SOC* des batteries diminue en dessous de 25%, ça veut dire que le système hybride n'est pas capable de satisfaire la charge principale avec la priorité P1. Dans ce cas, nous faisons recours au réseau électrique qui joue le rôle d'une source de soutien. Les batteries et la charge avec la seconde priorité (charge P2) sont déconnectés pour éviter les décharges profondes.

3.2.2 Les modes d'opération du SEH en mode autonome

La propriété qui caractérise ce mode est qu'il n'accepte pas le surplus d'énergie.les trois générateurs utilisés sont ; le générateur PV ,éolien avec le générateur diesel. La Figure 3.2 montre l'organigramme de l'algorithme de gestion en ce mode. En plus du mode d'intervention du système

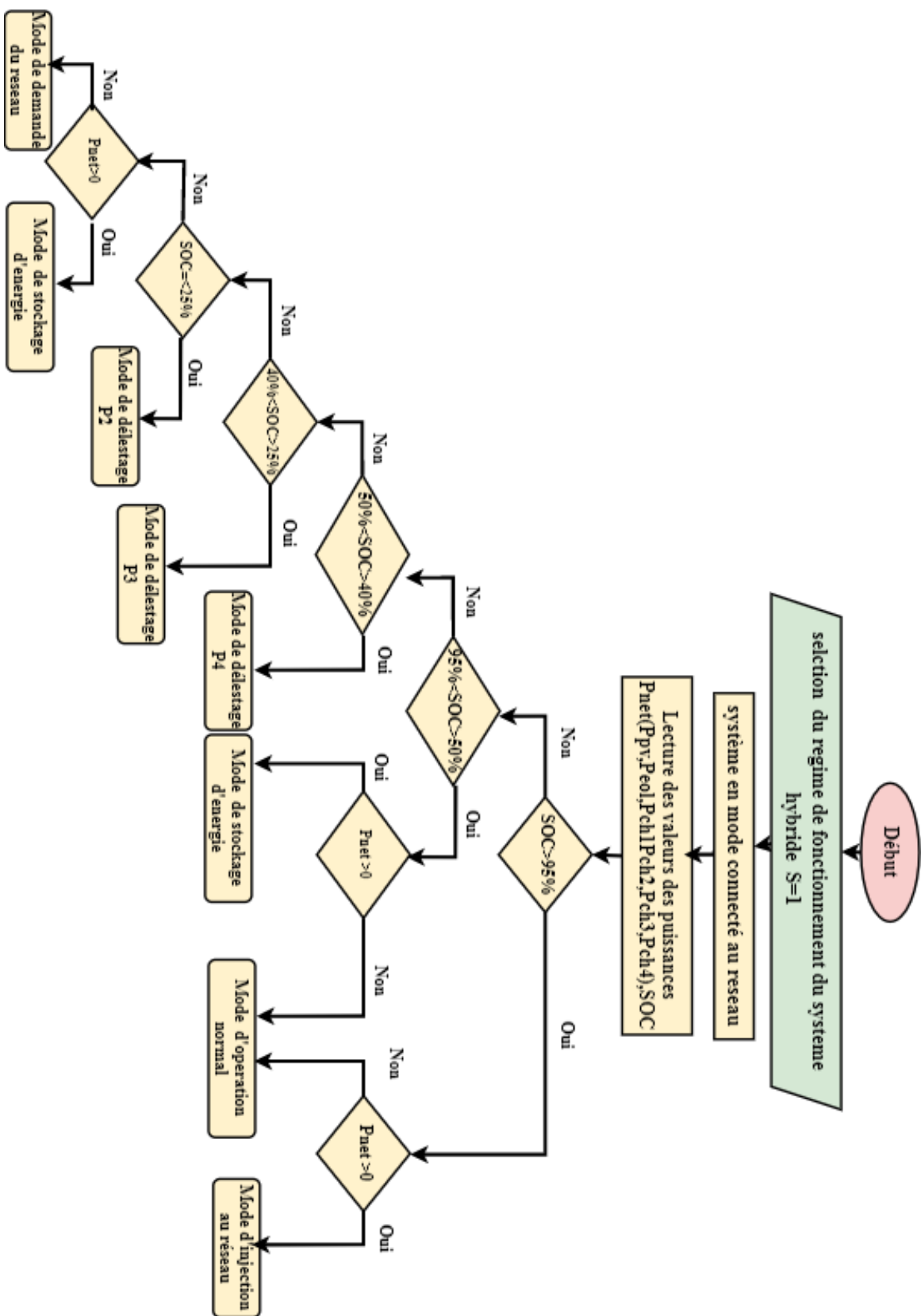


FIGURE 3.3 – Organigramme de l'algorithme de gestion du système hybride en mode connecté au réseau.

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Énergie Hybride

de stockage et du mode de stockage d'énergie déjà vu dans le mode connecté au réseau, deux nouveaux modes de fonctionnement sont introduits ici, qui sont :

- **Mode de limitation de puissance :** Ce mode est sollicité lorsque il y a un surplus d'énergie et les batteries sont complètement chargées, il est nécessaire de limiter la puissance produite par les générateurs PV. il permet donc de donner la puissance de référence aux générateur PV afin qu'ils ne dépassent pas la demande.
- **Mode d'appel au générateur diesel :** Lorsque le *SOC* atteint son niveau minimum 25%, la batterie sera protégée contre la décharge profonde, ce qui requiert la connexion du groupe diesel qui joue le rôle d'une source de secours, à ce moment là, toute la charges sera reconnectée.

3.3 Stratégie de gestion de l'énergie basée sur Stateflow

3.3.1 Stateflow

Stateflow est une extension de Simulink (boîte à outils de Matlab). ce dernier fournit des interfaces d'accès aux données, des outils de programmation et de visualisation avancés pour modéliser, simuler et analyser des systèmes complexes. La méthode de modélisation graphique intégrée utilise la théorie des machines à états finis. De plus, Le diagramme Stateflow est un outil puissant qui nous permet graphiquement de créer des contrôleurs logiques basés sur des événements et des machines d'état. il présente les avantages d'un processus de simulation simple, d'une large plage de simulation et de résultats de simulation intuitifs. Stateflow/Simulink utilise un langage visuel pour créer un diagramme d'état système qui prend en charge la simulation de systèmes dynamiques continus et discrets. Nous décrivons dans ce qui suit les principaux concepts de Stateflow [120].

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Energie Hybride

1. **État** : Il décrit une étape dans l'exécution d'un système piloté par les événements. Il représente le mode de fonctionnement du système. Puisque Stateflow est organisé hiérarchiquement, chaque état est autorisé à avoir un certain nombre de sous-états. Le niveau supérieur de la hiérarchie est appelé super-état, tandis que les états internes sont appelés état parent ou enfant. L'ordre d'exécution d'un état parent-enfant est basé sur deux règles :
 - l'état enfant n'est exécuté qu'après l'activation du parent (le mode de fonctionnement autonome ou connecté au réseau).
 - le parent ne termine son exécution qu'après que tous ses états enfants aient été évalués (les modes d'opérations). Il existe deux types de compositions d'état [121] :
 - Et-composition pour regrouper des états parallèles (*AND*)
 - Ou-composition pour grouper des états exclusifs (*OR*). La décomposition *OR* signifie qu'un seul état enfant peut être actif lorsque l'état parent ou le diagramme est actif. En revanche, pour *AND*, tous les états enfants sont actifs simultanément quand l'état parent est actif. Les états avec les compositions *ET* et *OU* sont indiqués par des bordures en pointillés et pleines, respectivement [122].
2. **Transition** : C'est le bord entre deux états ou jonctions, représentant le changement de mode de l'état source à l'état destination. Lorsqu'une transition se produit, l'état cible est activé et l'état d'origine est libéré. Une chaîne de transition achève le passage de l'ancien état au nouvel état. Une chaîne de transition complète comprend des événements, des conditions, des actions conditionnelles et des actions de transition. Chaque transition est associée à quatre caractérisations [123][124] : [événement] [condition] [action conditionnelle].
3. **Événement** : L'événement est utilisé comme pilote pour activer l'ensemble du système graphique, Il représente le mode de fonctionnement du système. Il existe deux types d'événements utilisés pour déclencher l'exécution d'un diagramme Stateflow. Un événement explicite est défini par les utilisateurs, et il peut être une entrée depuis Simulink, une sortie vers Simulink, ou local dans un diagramme.
4. **Action** : Il contient deux types d'opérations attachées à la transition (action conditionnelle

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Energie Hybride

et action commune), et trois types d'opérations attachées à l'état (action d'entrée, pendant l'action et action de sortie).

- **l'action conditionnelle** . est l'opération qui est immédiatement exécutée lorsque la condition est remplie.
- **l'action commune** est l'opération qui sera exécutée lorsque la condition est remplie et qu'il existe un chemin valide ininterrompu entre l'état source et l'état cible.
- **L'action d'entrée** est exécutée lorsque l'état est activé, cependant l'action est exécutée lorsque l'état est déjà actif et le reste, et l'action de sortie est exécutée lorsque l'état passe d'actif à inactif.

5. **Jonction** : Il contient deux types, jonction connective et jonction d'historique, où le premier permet la représentation de différents chemins de transition possibles pour une seule transition, et le dernier représente des points de décision historiques basés sur des données historiques relatives à l'activité de l'état.

3.3.1.1 Implémentation de stratégie de gestion au moyen de Matlab / Simulink /Stateflow

Dans cette section, nous expliquons le fonctionnement de notre algorithme à l'aide d'un modèle Simulink/Stateflow, comme décrit ci-dessous .la figure3.5 montre la disposition de base de l'GSE à l'aide du bloc de diagramme dans le modèle Stateflow. le système de gestion de l'énergie développé dans Stateflow comprend deux états supérieur :

- le premier SUPER-ÉTAT représente l'état mode connecté au réseau (Grid connected) est divisé en six sous-états : Mode d'injection au réseau, Mode de stockage d'énergie , Mode d'opération normale , Mode de délestage de la charge P4 , Mode de délestage de la charge P3 , Mode sollicitation du réseau électrique.
- le deuxième SUPER-ÉTAT représente L'état mode isolé (Islanded) est divisé en six sous-états : Mode de limitation de puissance , Mode de stockage d'énergie , Mode d'opération normale , Mode de délestage de la charge P4 , Mode de délestage de la charge P3, Mode

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Énergie Hybride

d'appel au générateur diesel .

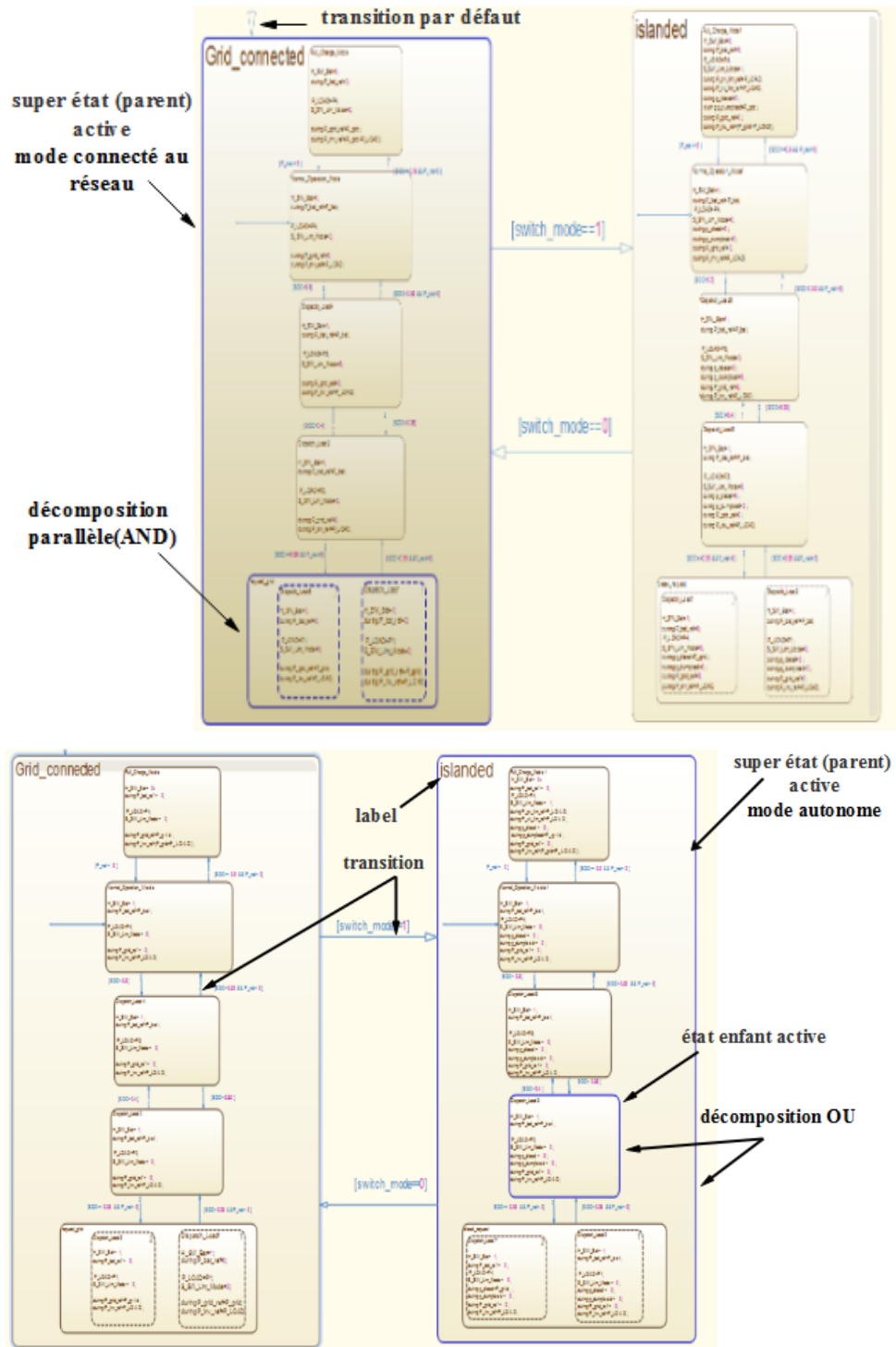


FIGURE 3.4 – Structure générale d'un diagramme Stateflow.

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Énergie Hybride

Les données d'entrée sont (switch-mode, Ppv, Peol, SOC, Pch1, Pch2,Pch3,Pch4,Idc,vdc) ,et (Pbatref ,Presref ,Pdg, Ppv limit,Peol limit,switch charge,) sont les sorties de superviseur (voir figure 3.5) .

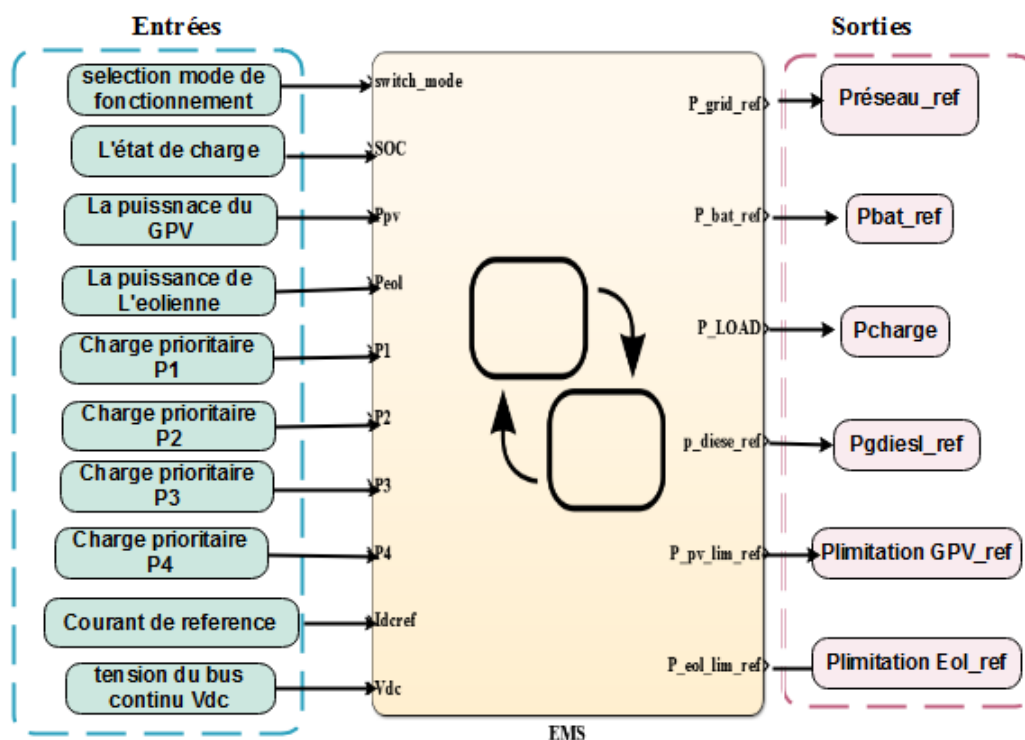


FIGURE 3.5 – Structure du bloc de supervision par la technique de Stateflow..

3.4 Stratégie de gestion de l'énergie basée sur Réseaux de neurones artificiels

les réseaux de neurones artificiels ont été proposés dans le but de reproduire quelques fonctions intelligentes du cerveau humain : la classification, la reconnaissance des formes, l'apprentissage, etc.

3.4.1 Neurone formel

Le neurone biologique, élément de base des systèmes nerveux, est constitué de plusieurs entrées dites dendrites, d'un corps cellulaire et d'une sortie appelée axone comme l'indique la figure 3.6. Le corps cellulaire diffuse des signaux vers d'autres cellules à travers l'axone. La transmission de ces signaux est faite par le biais des contacts dits synapses de connexion. L'information émise à l'entrée de chaque neurone est donc modifiée selon la force de la connexion synaptique qu'on dénomme poids synaptique [125][126]. En s'inspirant du fonctionnement des cellules nerveuses du cerveau humain, Mac Culloch et Pitts ont proposé le modèle d'un neurone formel en 1943. L'objectif était d'imiter le comportement des réseaux de neurones biologiques et de reproduire certains de leurs caractéristiques intéressantes à savoir : la mémorisation des informations, le parallélisme inhérent, l'apprentissage, le traitement des informations imprécises, etc [126].

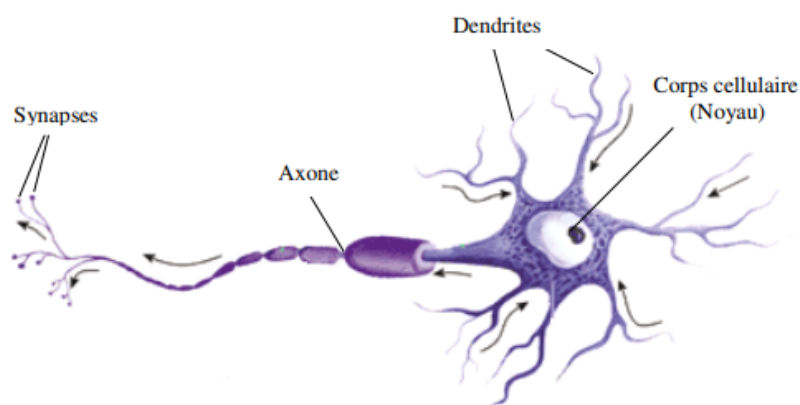


FIGURE 3.6 – Schéma d'un neurone biologique.

Un neurone formel est donc le composant de base de traitement d'information dans un réseau de neurones artificiel. Comme le montre la figure 3.7, un neurone formel permet de réaliser une sommation pondérée de ses entrées selon la formule suivante [90] :

$$net = \left(\sum_{i=1}^N w_i x_i \right) + w_0 = w^T x + w_0 \quad (3.1)$$

Tel que $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ et $w^T = [w_1, w_2, \dots, w_n]$ désignent, respectivement, le vecteur des

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Energie Hybride

entrées et le vecteur des facteurs de pondération dits poids synaptiques. x_i présente la i ème entrée du neurone formel, w_i désigne le poids de connexion entre la i ème entrée et le neurone. N

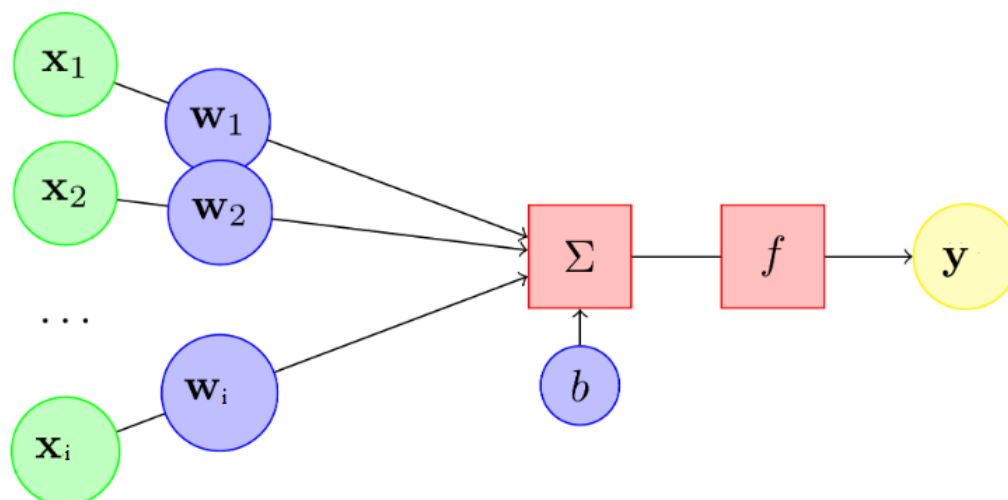


FIGURE 3.7 – neurone formel

représente le nombre des entrées du neurone. w_0 est la valeur de seuil d'activation du neurone, appelée biais, qui est associé à une entrée unitaire ($x_0 = 1$). Le neurone artificiel applique ensuite une fonction de transfert f , désignée par fonction d'activation, au résultat de la somme pondérée. La sortie du neurone y est alors calculée comme suit [127] :

$$y = f(\text{net}) = f\left(\sum_{i=1}^N w_i x_i + w_0 = w^T x + w_0\right) \quad (3.2)$$

La fonction d'activation (f) du neurone présentée par Mac Culloch et Pitts était de type tout ou rien à seuil ; i.e elle retourne en sortie la valeur de 0 ou 1 . Néanmoins, différents types de fonctions d'activation des neurones peuvent être utilisés comme ceux présentés dans la figure 3.8.

3.4.1.1 Réseaux de neurones non bouclés

Dans ce type de RNA, dit statique, les informations traitées se propagent de l'entrée vers la sortie sans faire retour en arrière. Le neurone qui calcule le signal de sortie du RNA est dit neurone de sortie. Alors que, les neurones effectuant les calculs intermédiaires sont dits neurones

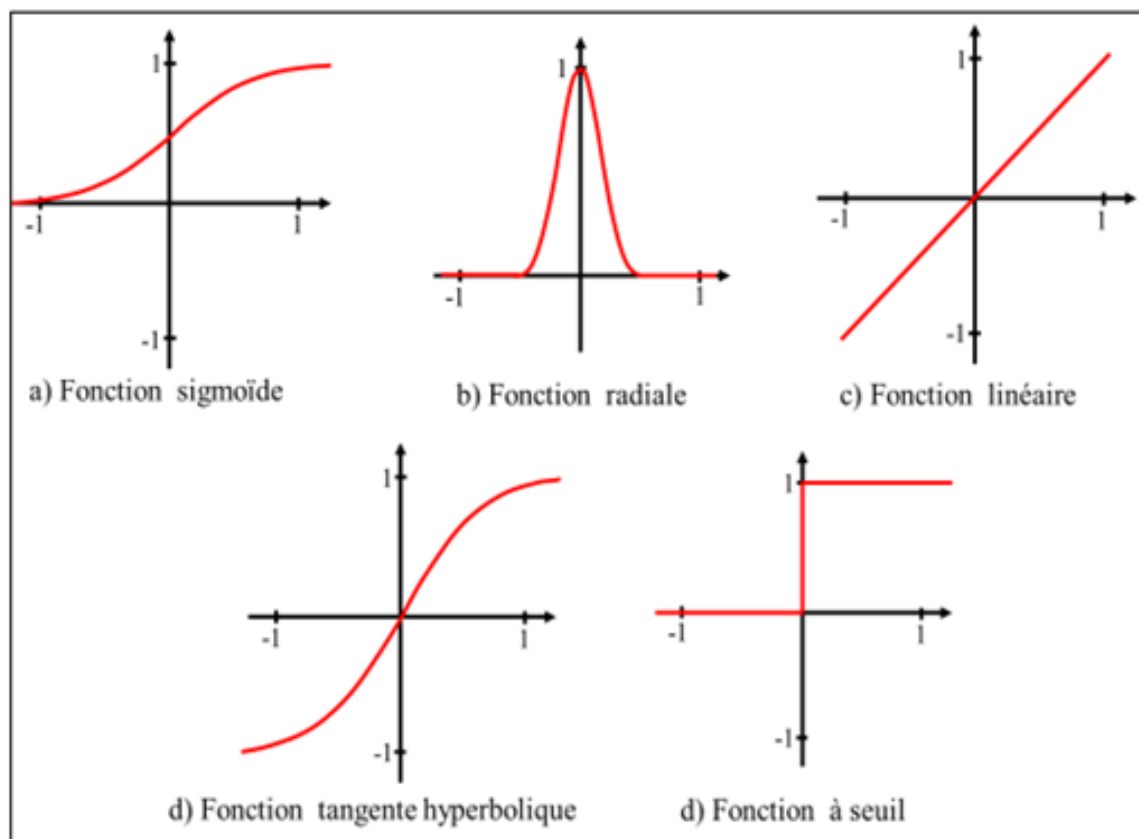


FIGURE 3.8 – Diverses fonctions d'activation d'un neurone artificiel [19].
cachés [128]. Les couches constituées des neurones de sortie et des neurones d'entrée sont désignées, respectivement, par couche de sortie et couche d'entrée. De plus, les couches situées entre la couche d'entrée et la couche de sortie sont dites couches cachées. Pour des applications de commande et d'identification, les architectures des RNAs non bouclés les plus utilisées sont [126, 129] :

3.4.1.1.1 Les réseaux monocouches et les réseaux multicouches(en anglais : multi-layer perceptron)

Un réseau multicouche à propagation vers l'avant (FFNN : FeedForward Neural Network) est constitué d'au moins trois couches en cascade : une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées et une couche de sortie [126]. La figure 3.9 illustre la structure d'un Perceptron non

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Énergie Hybride

bouclé à trois couches. Typiquement, les neurones de la même couche d'un perceptron ne sont pas interconnectés entre eux. En outre, le neurone de chaque couche possède des entrées provenant de la couche en amont et une sortie renvoyée à la couche en aval. Si chaque neurone est interconnecté à chaque neurone de la couche adjacente, il est dit totalement connecté, sinon il est dénommé partiellement connecté [130, 131]. La sortie d'un neurone j dans la couche L d'un perceptron multicouche se calcule comme suit [126] :

$$y_j^{(L)} = f_j^{(L)}(net_j^{(L)}) = f_j^{(L)}\left(\sum_{i=1}^p L - 1 w_{ij}^{(L)} y_i^{(L)} + w_0^{(L)}\right), L = 1, 2, \dots, M \quad (3.3)$$

Sous forme matricielle :

$$y^{(L)} = f^{(L)}(net^{(L)}) = f^{(L)}(w^{(L)} y^{(L-1)} + w_0^{(L)}) \quad (3.4)$$

Notons que :

$$w_0^{(L)} = \{w_{0j}^{(L)}\}, w^{(L)} = \{w_{ij}^{(L)}\}, i = 1, \dots, p_{L-1}, j = 1, \dots, p_L, \quad (3.5)$$

$$f^{(L)}(net^{(L)}) = \left[f_1^{(L)}(net_1^{(L)}), f_2^{(L)}(net_2^{(L)}), \dots, f_j^{(L)}(net_{p_L}^{(L)}) \right]^T$$

Tel que : $f_j^{(L)}$, $net_j^{(L)}$ et $w_{0j}^{(L)}$ désignent, respectivement, la fonction d'activation, le niveau d'activation et le biais du neurone j de la L ème couche. $w_{ij}^{(L)}$ représente le poids de connexion entre le neurone i de la couche $(L - 1)$ et le neurone j de la couche (L) . p_L est le nombre des neurones dans la L ème couche. M est le nombre des couches du RNA.

3.4.1.2 Réseaux de neurones bouclés

Un RNA bouclé dit récurrent ou dynamique possède une structure modifiée du FFNN statique tel que, les informations en sortie de certains neurones sont retournées à leurs entrées ou aux entrées d'autres neurones [125, 132]. Les boucles de rétroaction mènent alors à un comportement dynamique non linéaire du RNA récurrent. Généralement, une connexion récurrente dans

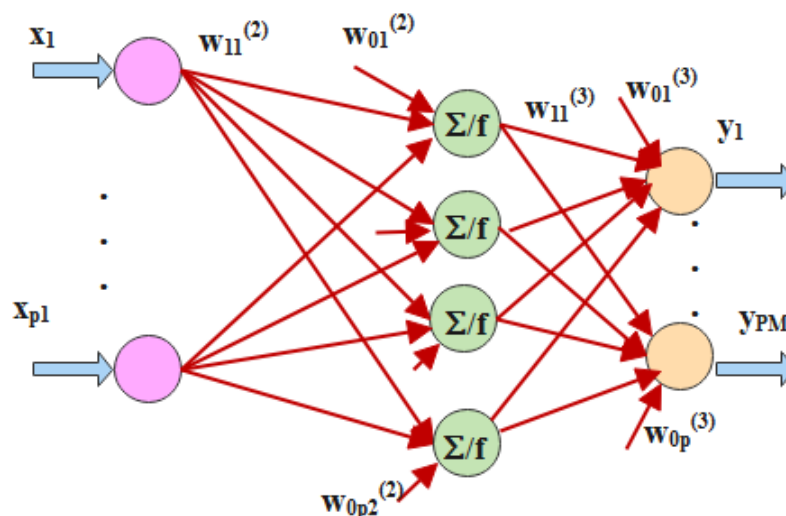


FIGURE 3.9 – Réseau MLP à trois couches .

un réseau bouclé est réalisée à l'aide d'un élément de retard temporel non nul, noté Z^{-1} , tel que :

$$y_i(k - 1) = Z^{-1}y_i(k) \quad (3.6)$$

où k : est l'itération du temps.

3.4.1.2.1 Aperçu théorique du réseau de neurones Elman

Réseau de neurones Elman est un réseau neuronal récurrent, initialement proposé par Elman (Elman 1990). L'architecture d'un réseau récurrent de type Elman (en anglais Elman Neural Network (ENN)). L'ENN est un type de réseau récurrent caractérisé par une couche interne auto-référencée. Il peut s'adapter à des caractéristiques variant dans le temps, étant adapté aux problèmes de séries temporelles discrètes tels que la prévision de vitesse et les prévisions de puissances . Le RNA Elman se compose de quatre couches :couche d'entrée,couches intermédiaires (cachées), couche de sortie , et La quatrième couche, connue sous le nom de couche de contexte, stocke ou mémorise la sortie précédente valeurs de la couche cachée, comme le montre la Figure3.10 [133,

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Énergie Hybride

134]. La structure mathématique du réseau de neurones Elman est la suivante[135] :

$$x(t) = k(w^1 x_c(t) + w^2 u(t - 1)) \quad (3.7)$$

$$x_c(t) = \delta x_c(t - 1) + x(t - 1) \quad (3.8)$$

Où W^1 est le poids de connexion entre la couche de contexte et la couche cachée, W^2 est le poids de connexion entre l'entrée et la couche cachée. $x_c(k)$ représente la sortie de la couche de contexte du k ème itération du réseau, $x(k1)$ représente la sortie de la couche cachée de la $k1$ ème itération du réseau, δ représente le coefficient d'auto-rétroaction de la couche contexte, $x_c(k1)$ représente la sortie du ($k1$)ème couche de contexte d'itération du réseau. La relation de la couche de sortie est exprimée comme suit :

$$y(t) = k(w^3 x(t)) \quad (3.9)$$

Où W^3 est le poids entre la couche cachée et la couche de sortie. $y(t)$ représente la sortie de la couche cachée. g est la fonction d'activation tansig exprimée comme suit[136] :

$$\text{tansig}(n) = \frac{2}{1 + \exp(-2n)} - 1 \quad (3.10)$$

Où n : est l'entrée du réseau

3.4.1.3 Apprentissage des RNAs

La propriété la plus importante du RNA est sa capacité d'apprendre de son environnement et d'améliorer son comportement via un processus d'apprentissage . D'après les références [125, 126, 132, 104], il existe deux principaux types d'apprentissage :

3.4.1.3.1 Apprentissage supervisé :

La figure 3.11a illustre le principe de l'apprentissage supervisé. Dans ce cas, l'apprentissage du RNA vise à reproduire le comportement d'un superviseur à l'aide d'un ensemble d'exemples

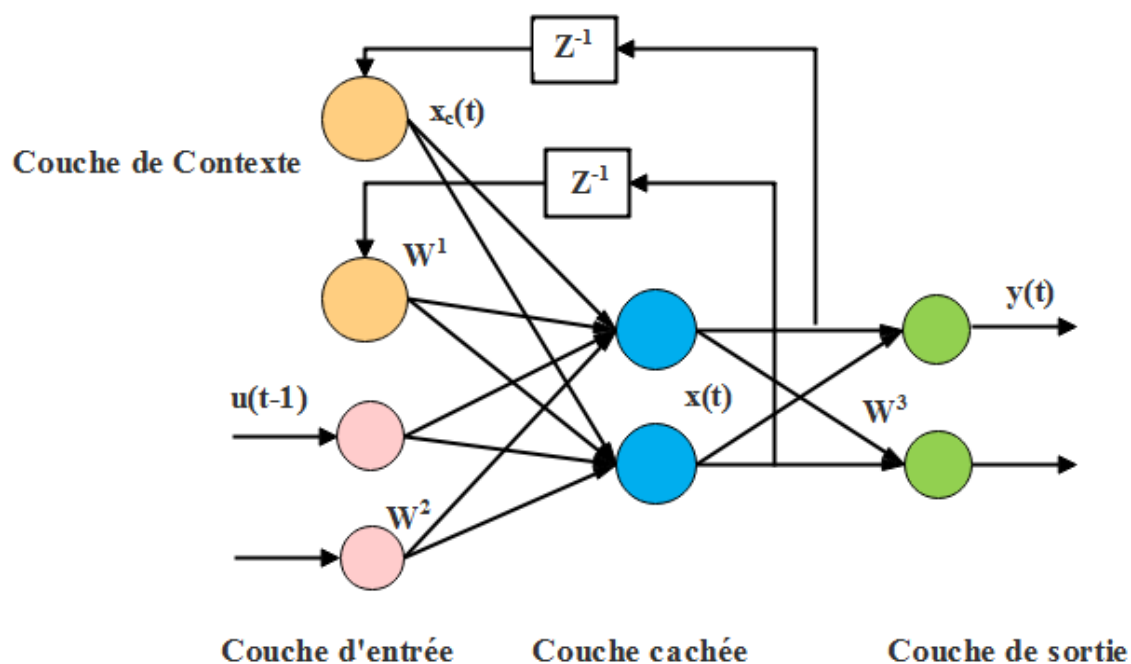
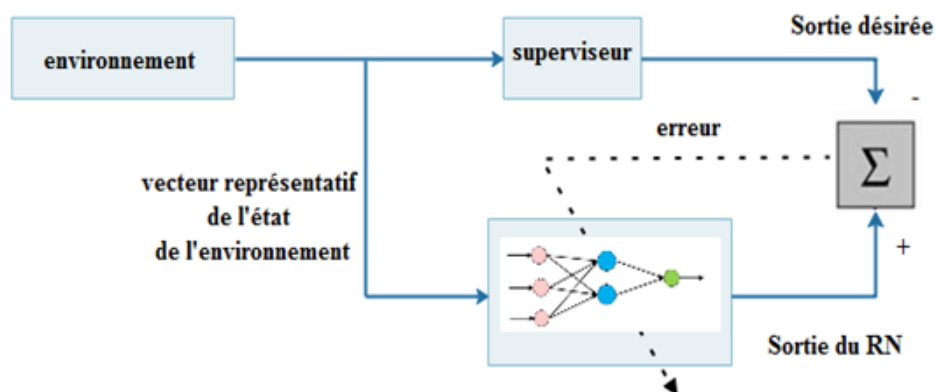


FIGURE 3.10 – Structure typique d'ENN .

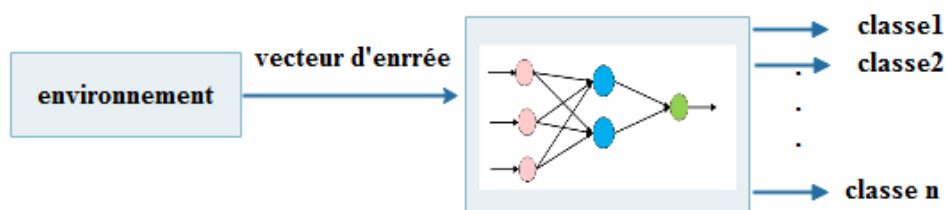
d'apprentissage « entrée-sortie ». En présentant un stimulus d'entrée au RNA, à chaque instant du temps, le superviseur lui impose la réponse désirée en sortie. L'erreur entre la cible et la sortie actuelle est ensuite utilisée par l'algorithme d'apprentissage pour modifier les paramètres du RNA de sorte que l'erreur soit réduite à une valeur minimale.

3.4.1.3.2 Apprentissage non supervisé :

Comme le montre la figure 3.11b , la réponse désirée du RNA est inconnue dans le schéma d'apprentissage non supervisé. En absence du maître, le RNA s'auto-organise et adapte ses poids synaptiques en se basant seulement sur les stimuli disponibles de l'environnement. Par ailleurs, deux modes d'apprentissage peuvent être distingués : l'apprentissage hors-ligne et l'apprentissage en-ligne. En mode hors-ligne, l'apprentissage du RNA est réalisé avant son utilisation en temps réel. Ceci signifie que les paramètres du RNA sont maintenus fixes lors du fonctionnement du système commandé ou identifié. Tandis qu'en, mode d'apprentissage en ligne, l'adaptation des poids synaptiques est accomplie simultanément avec la tâche affectée au RNA [137].



(a) apprentissage du RNA Supervisé



(b) apprentissage du RNA Non-Supervisé

FIGURE 3.11 – Types d'apprentissage du RNA

3.4.1.3.3 Méthode d'apprentissage régularisé bayésien (BR)

La régularisation bayésienne (BR) est un algorithme d'apprentissage de réseau neuronal artificiel qui améliore les valeurs de poids et de biais basées sur l'optimisation de Levenberg-Marquardt [138]. Cette algorithme détermine la bonne combinaison pour produire un bon réseau. le processus BR introduisent le poids du réseau dans le fonction objectif de la formation. La fonction objectif de la la formation est notée comme suit [139, 134] :

$$F = \beta E_d + \alpha E_w \quad (3.11)$$

Où

$$E_w = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (w_i)^2 \quad (3.12)$$

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Énergie Hybride

m : est le nombre total de paramètres dans le réseau, E_D : est la somme des carrés des erreurs de réseau, E_W : est la somme des poids du réseau au carré, et α et β : sont des paramètres objectifs de la fonction (paramètres de régularisation). La définition des valeurs correctes pour les paramètres objectifs est la tâche principale dans la mise en œuvre de la régularisation et leur taille relative dicte l'accent mis sur la formation.

3.4.1.4 Mise en oeuvre du RN dans la gestion de l'énergie

L'architecture choisie pour les deux réseaux (Elman et MLP) est ; 8-20-3. se compose d'une couche d'entrée avec huit neurones qui sont : Ppv ; Peol ; P ch(P2, P2, P3, P4) ; Pdcresf ; SOC , une couche cachée avec vingt neurones avec une fonction d'activation du type « purelin » et une couche de sortie avec trois neurones qui sont : P resref , Pbatref et Pch avec une fonction d'activation tangente hyperbolique (**tansig**) (voir figure 3.12). Le programme hors ligne est résolu pour ensemble de données générées par le gestionnaire Stateflow avec une algorithmique d'apprentissage (**trainbr**) utilise Levenberg-Marquardt avec une régularisation bayésienne afin de minimiser les valeurs d'erreur. régularisation bayésienne montre de meilleures performances que l'algorithme de Levenberg-Marquardt. Une partie des données générées est utilisée comme échantillons d'apprentissage afin d'obtenir les sorties nécessaires pour former le gestionnaire par RNA, de plus, Le nombre d'itérations est fixé à 1000 avec une fonction de performance égal à 0,01. cette fonction est important de former le réseau jusqu'à ce qu'il atteigne la convergence . Les paramètres des deux réseaux utilisés sont résumés dans le tableau 3.1 Les principales étapes de la stratégie de gestion de l'énergie basée sur l'ENN sont résumées comme suit :

1. **Étape 1** : Obtenir les données d'entrée et de sortie via la stratégie Stateflow.
2. **Étape 2** : Créer le réseau RN Elman/RN MLP et former le réseau jusqu'à ce que les conditions des paramètres de réglage du réseau soient atteintes.
 - sélection des paramètres d'apprentissage.
 - nombre de couches cachées.
 - nombre de neurones cachés.

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Energie Hybride

- fonction d'activation.
- algorithme d'apprentissage.

3. **Étape 3** :Tester le réseau et contrôler l'analyse de prédiction.
4. **Étape 4** :Stocker le réseau formé. Ensuite, le réseau formé est prêt à être testé en utilisant de nouvelles données d'entrée pour ce processus en ligne. Veuillez considérer que les étapes 1 à 3 appartiennent au processus hors ligne.
5. **Étape 5** :Traiter les nouvelles données d'entrée dans le processus en ligne et obtenez les données de puissance optimales du réseau, de la batterie et de la charge.
6. **Étape 6** :Evaluation des modèles de RNs. l'erreur quadratique moyenne (*RMSE*) est L'erreur absolue moyenne (*EAM* ou *MAE* pour Mean Absolute Error) est utilisée, où le type de RNs le plus efficace est celui qui a l'erreur minimale. Le *RMSE* et *MAE* peut être calculée de la façon suivante :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N |P_{acti} - P_{predi}|^2 \right)} \quad (3.13)$$

$$MAE = \frac{1}{N} \left(\sum_{i=1}^N |P_{acti} - P_{predi}| \right) \quad (3.14)$$

Où N est le nombre d'échantillons ; P_{predi} et P_{acti} sont les Valeurs actuelles (mesurées) et prédites, respectivement.

TABLE 3.1 – Paramètres du réseau MLP et ENN

Couche	Nb. de Neurones	Fonction d'activation
Couche d'entrée	8	
Couche cachée	20	tansig
Couche de sortie	3	Purelin
Algorithme d'apprentissage	BR	
Nombre d'itérations	1000	

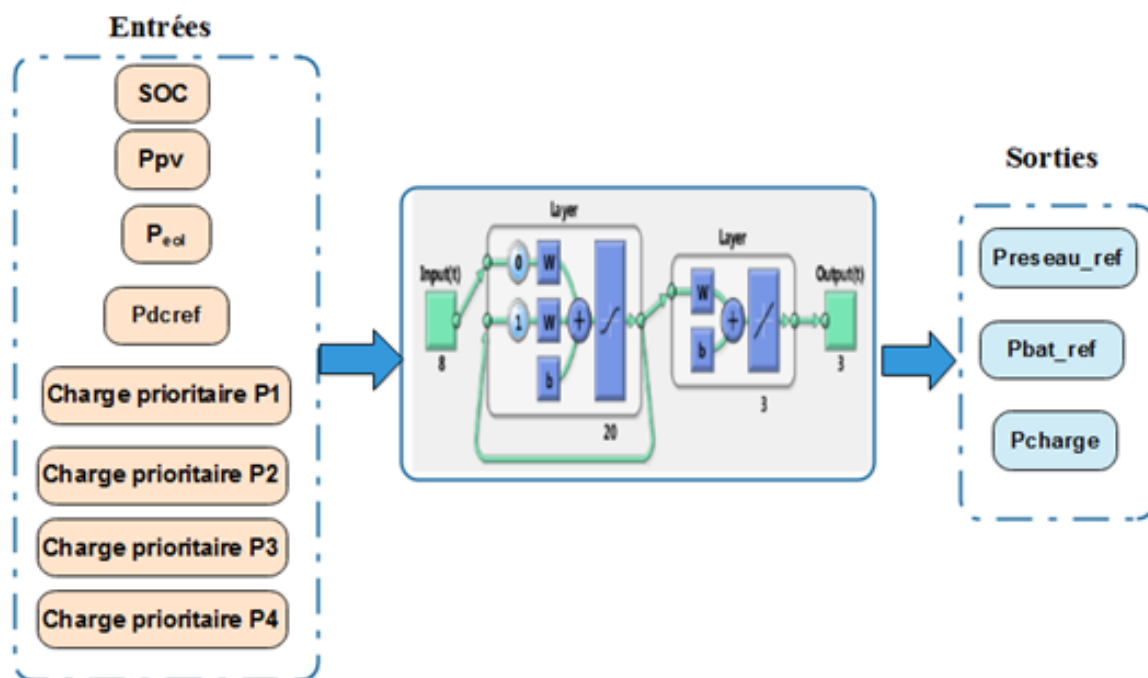


FIGURE 3.12 – Configuration du réseau Elman 8-20-3 .

3.5 Commande rapprochée des convertisseurs statiques

3.5.1 Commande hacheur suvolteur côté photovoltaïque (PV)

3.5.1.1 La commande MPPT

Le changement des conditions de l'environnement va affecter la puissance de sortie du générateur photovoltaïque. En utilisant les algorithmes MPPT, il est possible d'assurer la puissance de sortie maximale sous des conditions environnementales données. Il existe plusieurs algorithmes MPPT présentés dans la littérature. dans cette étude nous nous intéressons à la méthode de perturbation et d'observation (PO). De plus en raison de la nature de la structure variable des sources renouvelables, il existe deux modes de fonctionnement possibles : le mode Maxi et le mode Limite. Le mode Maxi se produit lorsque l'énergie maximale captée à partir des sources renouvelables n'est pas suffisante pour satisfaire la demande de puissance totale (la charge plus

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Énergie Hybride

les besoins de recharge de système de stockage). Dans ce cas, le mode de puissance maximale (Pren max) peut être appliqué lorsque le système PV fonctionne seul ou intégré dans un système hybride, ainsi qu'en mode autonome ou connecté au réseau. Cependant, le mode de puissance limitée devient obligatoire lorsque la puissance PV extraite n'a pas pu être consommée par les charges ou stockée par le système de stockage. Cette solution permet d'éviter l'arrêt complet de la production, ou bien le besoin d'utiliser des résistances supplémentaires. Grâce au contrôle de convertisseur élévateur (boost), nous pouvons suivre le point de puissance maximale (MPPT) ou travailler sur une puissance limitée [140]. La structure de contrôle est illustrée à la Figure 3.13.

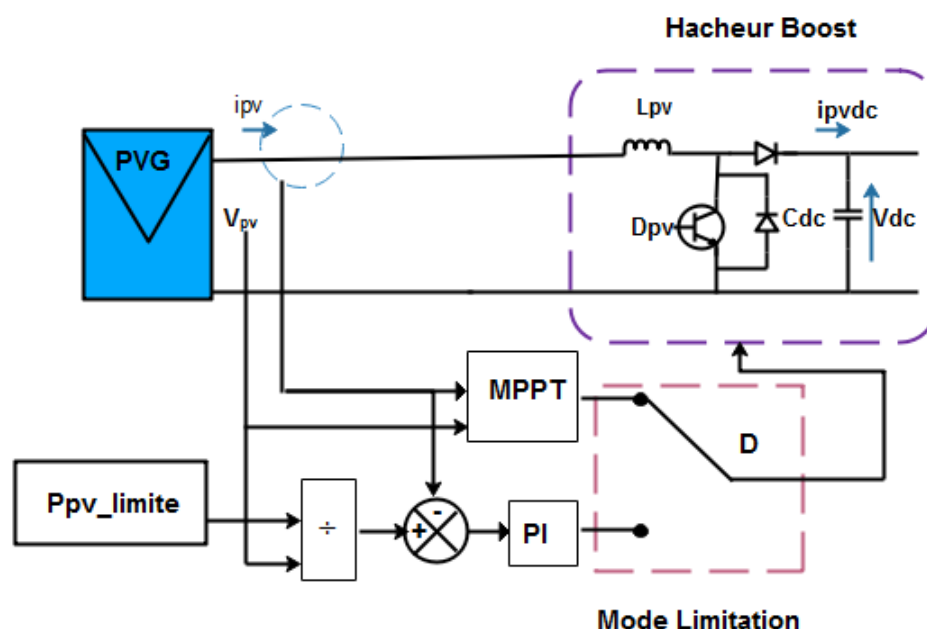


FIGURE 3.13 – Le contrôleur de limitation de puissance photovoltaïque.

Tout changement, dans l'irradiation solaire ou la température, augmentera ou diminuera la puissance de la source PV. Donc, afin de rendre le système plus efficace ; la puissance de sortie doit être maintenue à un niveau élevé, ce qui a nécessité d'inciter le système à fonctionner en MPP. Il existe de nombreux algorithmes pour atteindre ce point, en modifiant le rapport cyclique d'un convertisseur DC-DC boost ou buck, parmi lesquels Perturb observe (P&O), Incremental Conductance (INC), réseau de neurone et logique floue . La méthode de perturbation et d'ob-

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Energie Hybride

servation (P&O) C'est la méthode la plus utilisée dans la pratique à cause de la simplicité de son algorithme, et donc la facilité son implantation. La figure 3.14 montre la puissance de sortie d'un panneau photovoltaïque en fonction de la tension ($P_{pv} - V_{pv}$), à une irradiation fixe et une température constante. Supposant que le module fonctionne à un point qui est loin du Point de Puissance Maximale PPM. Dans cet algorithme la tension du panneau PV est perturbée avec une petite incrémentation, le changement de puissance résultant ΔP est observé.

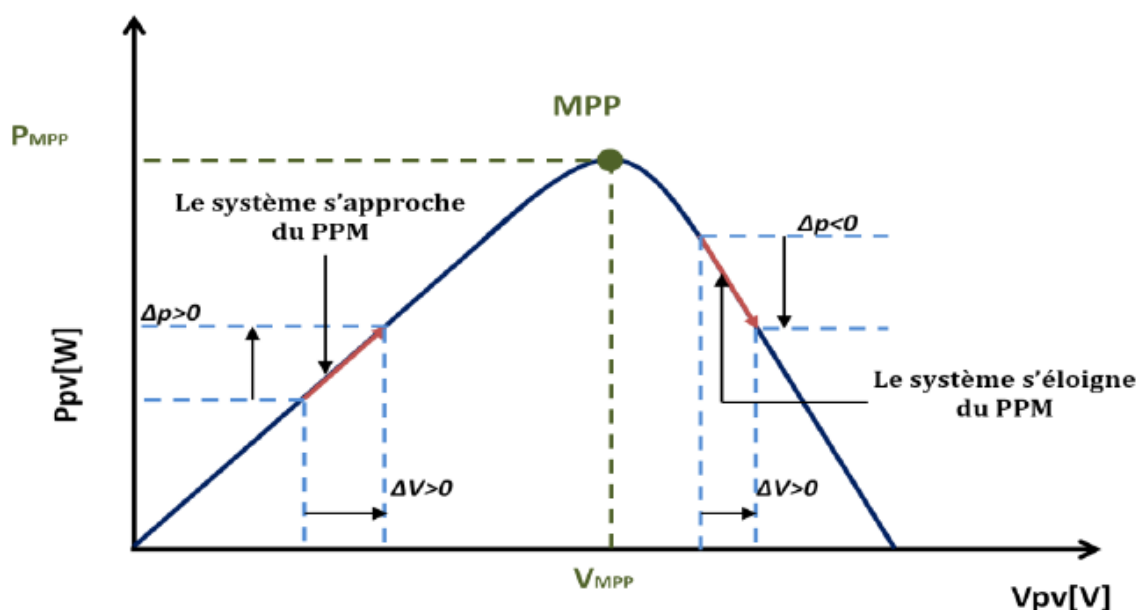


FIGURE 3.14 – Étapes de suivi d'PPM .

- Si (ΔP) :est positif, donc ça veut dire qu'on s'approche du PPM (voir la figure 3.14). Ainsi, d'autres perturbations dans la même direction vont déplacer le point de fonctionnement vers le PPM.
- Si (ΔP) : est négatif le point de fonctionnement est déplacé loin du PPM, et la direction de la perturbation doit être inversée pour avancer vers le PPM. La figure 3.15 montre un organigramme de l'algorithme P&O [141, 142].l'algorithme de la technique perturbe et observe (P&O) présenté sur la Figure 3.15.

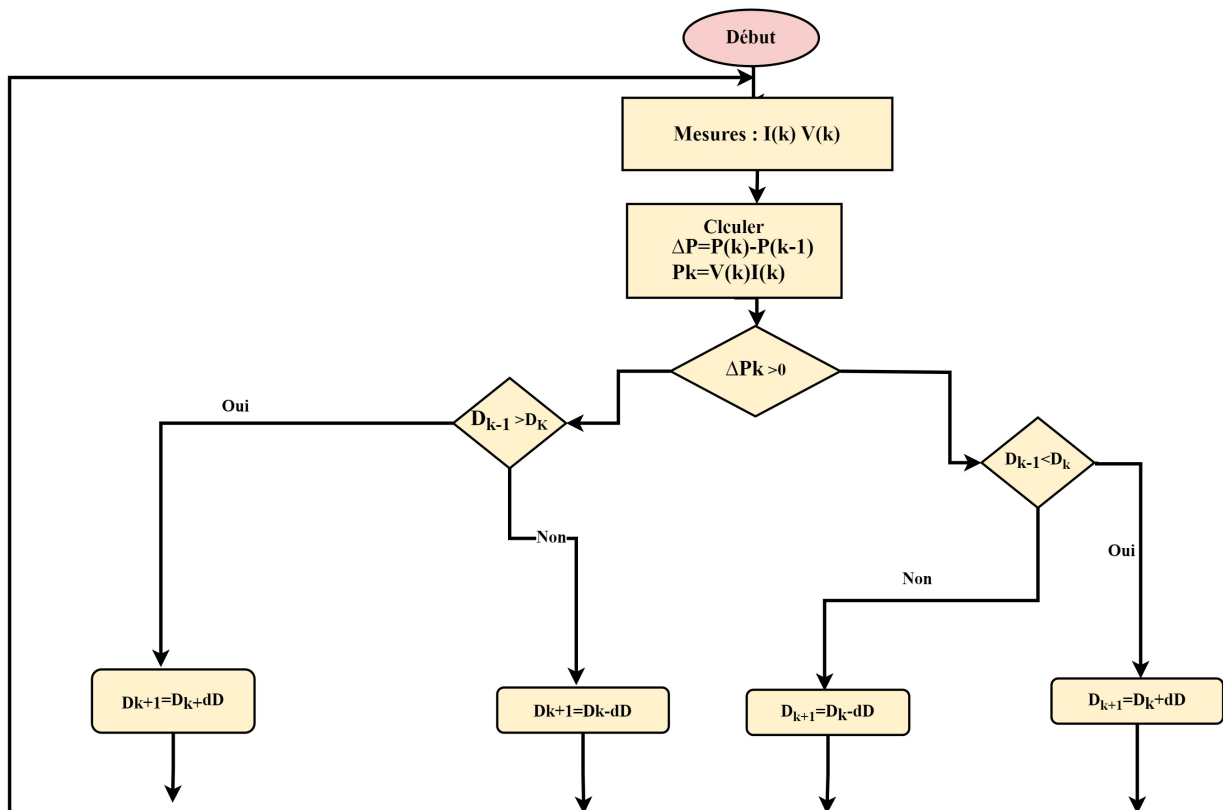


FIGURE 3.15 – Organigramme de l’algorithme P&O .

3.5.1.1.1 Mode puissance limitée

Le mode limitation est actionné par le système de gestion d’énergie qui impose une limite de production $P_{pv\limite}$. Dans le cas où la puissance produite reste toujours inférieure à cette dernière limite, le générateur PV continue à fonctionner en mode MPPT. Une boucle de régulation du courant photovoltaïque à base de régulateur PI est utilisée pour réduire la puissance produite (voir figure 3.13).

3.5.2 Commande hacheur suvolteur côté chaîne de conversion éolienne

3.5.2.1 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse (Type Speed Ratio - TSR) par mode glissant

Le concept de MPPT consiste à optimiser la vitesse du générateur par rapport à la vitesse du vent interceptée par l'éolienne de sorte que la puissance soit maximisée. Lorsque la vitesse du vent est inférieure à la limite spécifiée, le suivi du point de puissance maximale (MPPT) est d'une importance primordiale dans les systèmes de conversion d'énergie renouvelable pour maximiser l'utilisation de l'énergie éolienne, mais aussi pour maximiser l'efficacité du système. Pour atteindre cet objectif, la méthode de la vitesse spécifique optimale ou un rapport de vitesse optimal (Tip Speed Ratio-TSR) est conçu pour extraire le maximum de puissance possible disponible du vent en ajustant la vitesse de l'arbre du générateur, où l'énergie éolienne maximale est captée par la turbine la vitesse spécifique optimale de la turbine doit être maintenue à sa valeur optimale (λ_{opt}). Pour extraire une puissance optimale sous des vitesses de vent fluctuante. La Figure 3.16 montre le schéma fonctionnel de la commande de la vitesse mécanique. Dans ce diagramme, la vitesse de rotation optimale est comparée à la valeur réelle et la différence est ensuite transmise au contrôleur, qui modifie la vitesse du générateur pour réduire cette erreur.

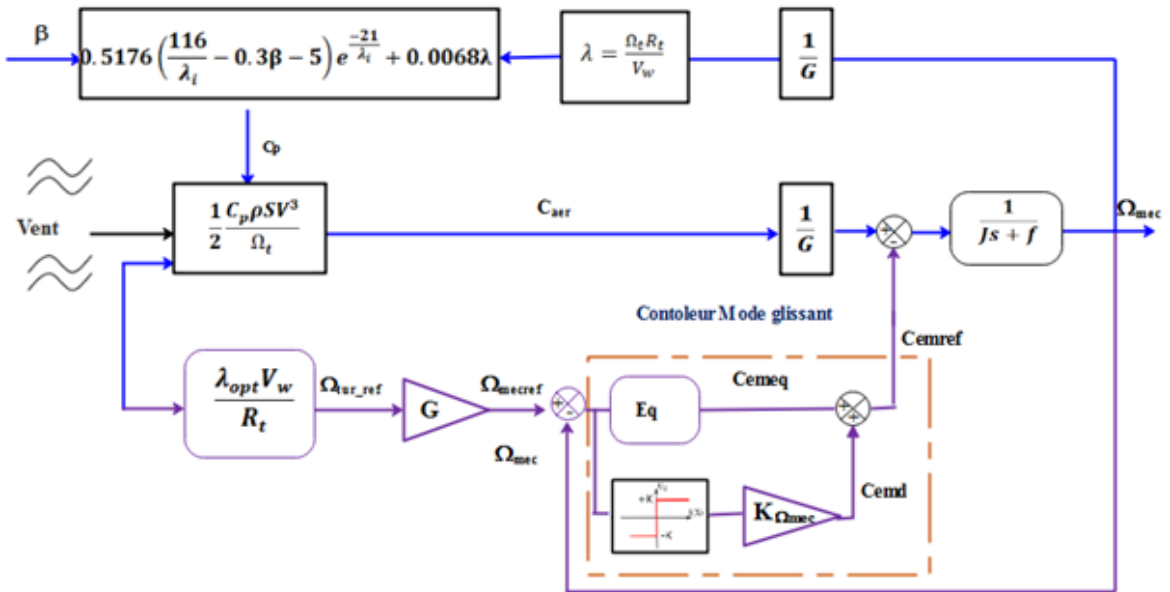


FIGURE 3.16 – Schéma bloc de la commande MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation .

Pour minimiser l'hyperlien entre les gains du contrôleur PI linéaire et les paramètres internes du générateur, nous introduisons la technique de contrôle par mode glissant pour contrôler la vitesse mécanique [143]. Le contrôleur par mode glissant est conçu pour prendre systématiquement en considération les problèmes de stabilité et de performance. Cette méthode se décompose en trois étapes[144] :

- Sélection de la surface de glissement.
- Définition des conditions de convergence à partir des fonctions de Lyapunov.
- Détermination de la stratégie de contrôle.

3.5.2.2 Surface de glissement

Pour concevoir une loi de commande en mode glissant, il faut d'abord choisir la surface de commutation. On prend la forme générale proposée par Slotine

$$S(\Omega_{mec}) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e(\Omega_{mec}) \quad (3.15)$$

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Energie Hybride

Où, S est la surface de glissement, n est l'ordre du système, Où pour $n = 1$, $S(x,t)=e(t)$ qui est le nombre de différence en attendant les variables de contrôle indiquées, λ est un coefficient positif. la surface de glissement pour le régulateur de vitesse est définie comme l'erreur entre la vitesse de référence qui est générée à partir du MPPT et la vitesse réelle du générateur.

$$S(\Omega_{mec}) = \Omega_{mec_{ref}} - \Omega_{mec} \quad (3.16)$$

3.5.2.3 Condition de convergence

Deux conditions doivent être satisfaites pour que le système converge vers la surface de glissement : la condition d'atteinte et la condition de glissement. Considérons une fonction scalaire positive $V_{\Omega_{mec}} > 0$. La loi de commande doit forcer la décroissance de cette fonction pour rendre la surface de glissement attractive et invariante on considère la fonction de Lyapunov suivante :

$$V_{\Omega_{mec}} = \frac{1}{2}S(\Omega_{mec})^2 \quad (3.17)$$

La dérivée de la fonction de Lyapunov est

$$\dot{V}_{\Omega_{mec}} = S(\Omega_{mec})\dot{S}(\Omega_{mec}) \quad (3.18)$$

Pour démontrer la stabilité asymptotique globale du système, il suffit de s'assurer que sa dérivée est négative, ceci est vérifié si : La dérivée de la fonction de Lyapunov est :

$$\dot{V}_{\Omega_{mec}} = S(\Omega_{mec})\dot{S}(\Omega_{mec}) < 0 \quad (3.19)$$

3.5.2.4 La conception du contrôleur :

La structure du contrôleur comprend deux parties :

$$u_c = u_{eq} + u_n \quad (3.20)$$

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Énergie Hybride

u_{eq} :est une entrée de commande équivalente qui détermine le comportement du système sur la surface de glissement. De plus, c'est le contrôle équivalent estimé utilisé pour compenser la dynamique inconnue du système. en régime permanent, u_{eq} se trouve à partir de l'expression :

$$\dot{S}(\Omega_{mec}) = 0 \quad (3.21)$$

u_n :est utilisé pour garantir l'attractivité de la variable à contrôler vers la surface de commutation. Il maintient l'état sur la surface de glissement en présence des variations de paramètres et des perturbations. Alors[145, 118] :

$$u_n = K_{(\Omega_{mec})} sign(S(\Omega_{mec})) \quad (3.22)$$

La commande non linéaire Le mode glissant est une commande discontinue. Afin de réduire le broutage (chattering) , la fonction continue comme exposée dans 3.23 où une fonction de signe est définie comme :

$$sign(s(\Omega_{mec})) = \begin{cases} 1, & S(\Omega_{mec}) > 0. \\ 0, & S(\Omega_{mec}) = 0 \\ -1, & S(\Omega_{mec}) < 0 \end{cases} \quad (3.23)$$

Avec la dérivée 3.16, alors :

$$\dot{S}(\Omega_{mec}) = \dot{\Omega}_{mec_{ref}} - \dot{\Omega}_{mec} \quad (3.24)$$

En combinant les expressions ci-dessus dans les dernières équations, on peut écrire :

$$\dot{S}(\Omega_{mec}) = \dot{\Omega}_{mec_{ref}} - \frac{1}{J}(C_{em} - f\Omega_{mec} - C_g) \quad (3.25)$$

Remplacement de l'expression de C_{em} par les commandes équivalentes ($C_{em_{eq}} + C_{em_n}$) dans l'équation 3.25 on trouve :

$$\dot{S}(\Omega_{mec}) = \dot{\Omega}_{mec_{ref}} - \frac{1}{J}((C_{em_{eq}} + C_{em_n}) - f\Omega_{mec} - C_g) \quad (3.26)$$

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Energie Hybride

En régime permanent on a : $S(\Omega_{mec}) = 0$; $\dot{S}(\Omega_{mec}) = 0$ et $C_{em_n} = 0$, d'où l'on extraire l'expression de la commande équivalente $C_{em_{eq}}$:

$$C_{em_{eq}} = J\dot{\Omega}_{mec_{ref}} - f\Omega_{mec} - C_g \quad (3.27)$$

Pour assurer la convergence de la fonction de Lyapunov, on pose :

$$C_{em_n} = K_{\Omega_{mec}} \text{sign}(S(\Omega_{mec})) \quad (3.28)$$

Enfin, la loi de commande totale est déterminée par :

$$C_{em_n} = K_{\Omega_{mec}} \text{sign}(S(\Omega_{mec})) + J\dot{\Omega}_{mec_{ref}} - f\Omega_{mec} - C_g \quad (3.29)$$

Avec : $K_{\Omega_{mec}}$ constante positive

3.5.2.5 Commande predicitive du convertisseur survolteur avec d'extraction de la puissance maximale

Pour extraire une puissance optimale sous des vitesses de vent fluctuantes.L' MPPT est réalisé en contrôlant le convertisseur élévateur qui est connecté au générateur via un redresseur à pont de diodes. La figure 3.17 montre l'algorithme proposé pour l'extraction de puissance maximale (MPPT) de l'éolienne à vitesse variable. pour chaque vitesse de vent instantanée, la vitesse de rotation optimale du rotor de l'éolienne est estimée comme suit :

$$\Omega_{mec_{ref}} = \frac{\lambda_{op} V_v}{R} \quad (3.30)$$

L'erreur entre la vitesse de référence et la vitesse mesurée du rotor est transmise au contrôleur de vitesse par mode glissant Figure 3.16 Algorithme d'extraction de puissance maximale proposé sous une vitesse de vent variable. Ensuite , La sortie du régulateur de vitesse donnera le courant de référence. L'erreur entre les courants de ligne de référence et mesurés est transmise au contrôleur

prédicatif pour produire le rapport cyclique, D du convertisseur élévateur.

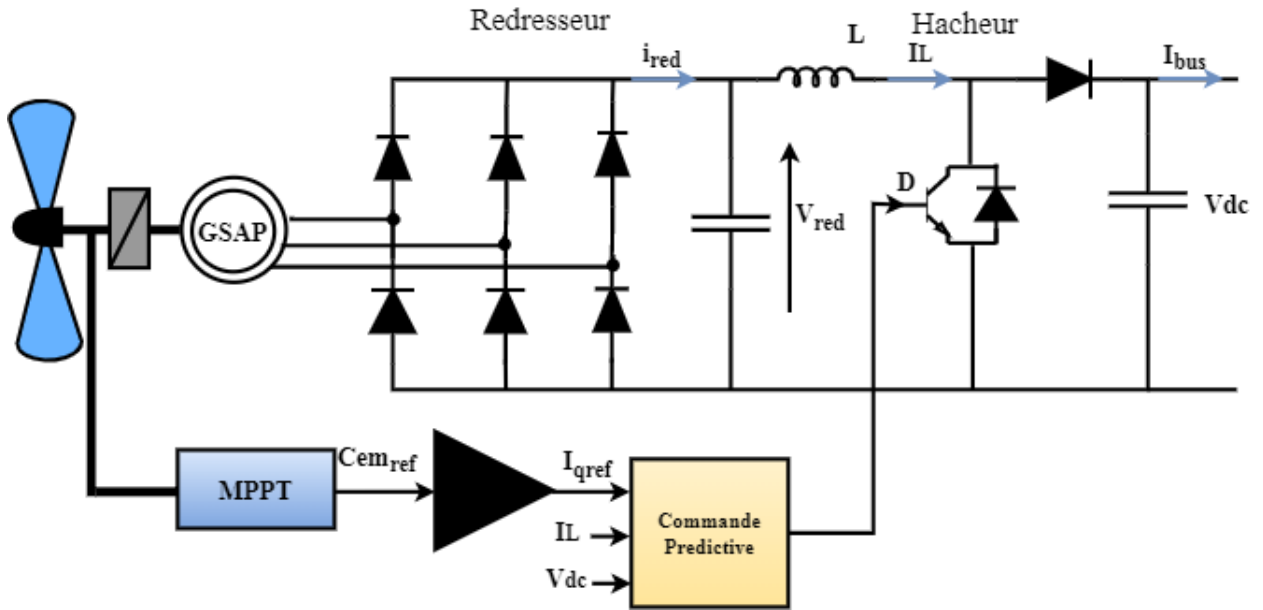


FIGURE 3.17 – Schéma de commande du convertisseur DC-DC côté GSAP .

3.5.2.6 Conception de l'algorithme MPC pour convertisseur survolteur DC/DC

La caractéristique principale de la commande prédictive du convertisseurs est l'utilisation du modèle de convertisseur pour prédire le comportement des variables contrôlées aux instants d'échantillonnage suivants. Pour prédire le comportement futur des variables du système, le modèle à temps discret du convertisseur élévateur DC/DC doit être développé. Pour plus de simplicité, la méthode d'Euler directe est utilisée ici. Le modèle à temps discret du convertisseur élévateur (boost) est utilisé , compte tenu de la période d'échantillonnage T_s , lorsque l'interrupteur est désactivé ou activé, les variables de contrôle prédites sont données par équation 3.31 et 3.32, respectivement[146].

$$i_L(k+1) = i_L(k) + \frac{T_s}{L}(V_{red}(k) - V_{dc}(k)) \quad (3.31)$$

$$i_L(k+1) = i_L(k) + \frac{T_s}{L}V_{red}(k) \quad (3.32)$$

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Energie Hybride

La prédiction de la variable contrôlée IL peut être réalisée pour le prochaine intervalle d'échantillonnage ($t(k + 1)$) dans le but d'avoir des schémas de contrôle simultanément dans le présent et dans le futur. Les valeurs mesurées de I_L , V_{red} et V_{dc} sont considérées comme des entrées pour l'algorithme prédictive. L'estimation du comportement futur des variables contrôlées est effectuée sur la base de l'évaluation d'une fonction de coût. Il représente la différence optimisée entre les valeurs contrôlées et souhaitées des variables. Dans notre cas étudié, la fonction de coût pour le convertisseur survolteur(boost) DC/DC est donnée par l'équation suivante[146].

$$g = |i_L(k + 1) - i_{qref}| \quad (3.33)$$

La fonction de coût assure le suivi du courant redressé (inducteur) IL à partir du courant de référence Iq fourni par l'algorithme MPPT. Pour chaque pas d'échantillonnage, la fonction de coût est évaluée deux fois pour chaque état de commutation. L'évaluation de la fonction de coût pour différents états de commutation détermine les actions de commande pour l'instant suivant. Au temps d'échantillonnage (tk), l'algorithme MPC doit décider entre S, et S, sur la base d'une erreur minimisée grâce à la fonction de coût utilisée g . Toutes les étapes de commande prédictive proposées sont présentées dans la Figure 3.18.

3.5.3 Commande de la batterie

Le transfert d'énergie entre le bus continu est le dispositif de stockage (batteries) sont contrôlés par action sur la référence de courants de stockage dans le système de commande de L'hacheur réversible en courant . Cette commande utilise un régulateur prédictif (MPC) (en anglais : Model Predictive Contrôle). Ce dernier permet de verrouiller les deux interrupteurs du convertisseur bidirectionnel associés à la batterie selon le mode de fonctionnement et la valeur du courant total demandé. La commande predictive est un algorithme dominant et émergent utilisé dans l'électronique de puissance et les systèmes de conversion d'énergie. En raison de sa réponse dynamique très rapide et de sa caractéristique de suivi de référence rapide, ce mode est devenu la technique de contrôle la plus attrayante par rapport aux autres techniques classiques. Les

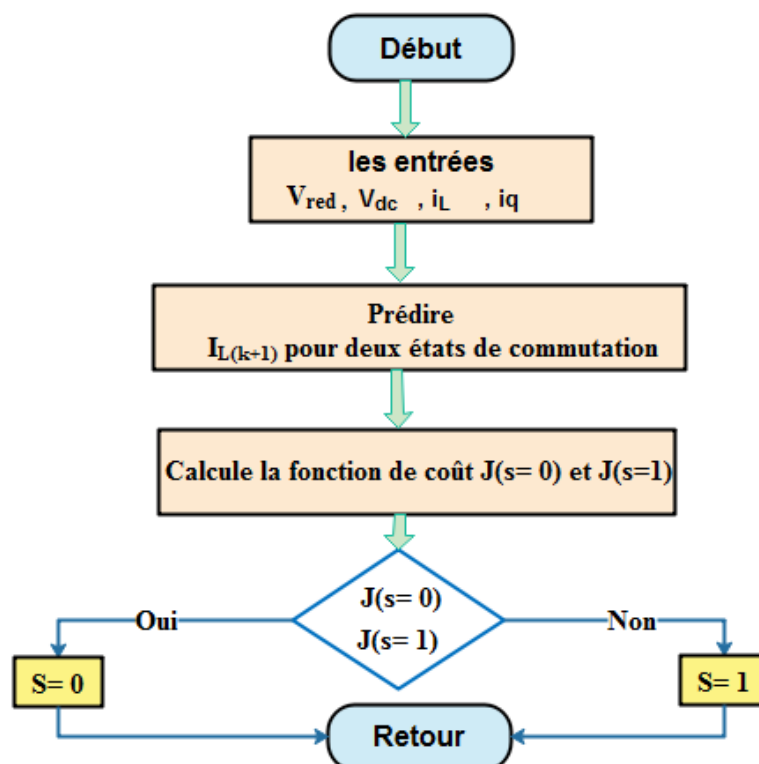


FIGURE 3.18 – Organigramme commande prédictive .

techniques de contrôle comme (PI, mode glissant, logique floue) effectuent la correction après que l'erreur se soit produite alors que la principale caractéristique du contrôle prédictif du modèle est de prédire le comportement futur des contraintes de contrôle. Bien que cette technique nécessite un nombre élevé de calculs, mais à l'aide de microprocesseurs rapides, puissants et sophistiqués facilement disponibles aujourd'hui, elle est très simple à mettre en œuvre.

3.5.3.1 Modèle au temps discret

L'objectif de la commande prédictive de courant proposée est d'asservir et de forcer le courant à atteindre sa référence à l'instant prochain d'échantillonnage. Pour obtenir une équation précise pour le bloc de prédiction, Un modèle en temps discret du système est nécessaire en raison de la procédure inhérente au MPC. Un modèle à temps discret est utilisé pour prédire les valeurs futures des courants et des tensions dans le prochaine intervalle d'échantillonnage $(k + 1)$, à partir

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Énergie Hybride

des courants et tensions mesurés au k ième échantillonnage instantané. La dérivée du modèle du système $\frac{dx}{dt}$ à partir de l'approximation d'Euler peut être exprimée comme suit

$$\frac{di}{dt} = \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} \quad (3.34)$$

deux modes de fonctionnement sont envisageables. Pour Le premier mode de fonctionnement Si S_1 commute (1 ou 0) et S_2 est maintenu OFF, le convertisseur fonctionne en mode élévateur (survolteur). La batterie se décharge pour fournir de l'énergie. Le deuxième mode le convertisseur fonctionne en mode abaisseur (dévolteur). si S_2 commute (1 ou 0) et que S_1 est maintenu OFF, La batterie est chargée pour absorber l'énergie. En utilisant l'approximation ci-dessus, le modèle à temps discret des courants prédictifs pour l'instant d'échantillonnage suivant (k+1) du convertisseur bidirectionnel en mode abaisseur(buck) et élévateur (boost) peut être dérivé. Le modèle à temps discret des courants d'entrée prédictifs en fonction de la période d'échantillonnage T_s est utilisé pour prédire le courant de la batterie $I_{bat}(k+1)$ en mode abaisseur et élévateur du convertisseur bidirectionnel peut être évalué à partir de l'équation (3.34) à l'aide de l'approximation d'Euler peut être exprimé comme suit[147] :

$$\begin{cases} S_1 = 1, S_2 = 0 : I_{bat}(k+1) = \frac{T_s}{L_B} V(k)_{bat} + I_{bat}(k) \\ S_1 = 0, S_2 = 1 : I_{bat}(k+1) = \frac{T_s}{L_B} (-V_{dc} + V(k)_{bat}) + I_{bat}(k) \end{cases} \quad (3.35)$$

Pour les deux modes de fonctionnement cités précédemment, les deux interrupteurs à commande complémentaire. Ensuite on teste chacune de ces prédictions suivant un critère quadratique (fonction objective) comme le montre l'équation 3.36 , ce critère évalue la distance entre le point de courant prédit et le point de courant de référence [148].

$$g_s = \left| i_{bat_{ref}}(k+1) - i_{bat}(k+1) \right| \quad (3.36)$$

Le vecteur de tension qui minimise la fonction coût g_s est sanctionné et appliqué pendant toute l'intervalle d'échantillonnage.

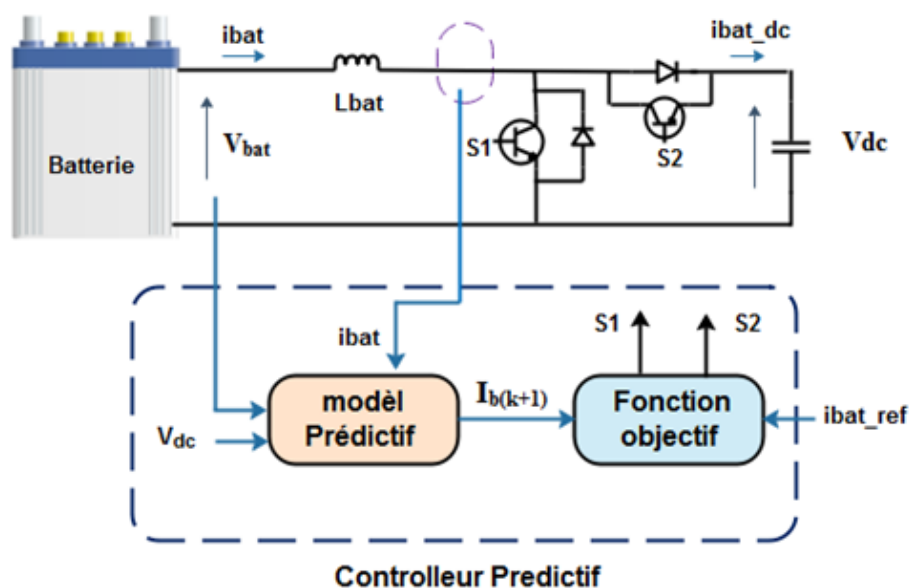


FIGURE 3.19 – Schéma de commande de la batterie.

3.5.4 Commande et réglage de bus continu

Dans les micro-réseaux basés sur des onduleurs, les onduleurs en parallèle doivent fonctionner en mode connecté au réseau et en mode autonome et effectuer un transfert transparent entre les deux modes. En mode connecté au réseau, les onduleurs contrôlent la quantité de puissance injectée dans le réseau. En mode autonome, cependant, les onduleurs contrôlent la tension de l'îlot tandis que la puissance de sortie est dictée par la charge. Cependant, l'utilisation d'un contrôleur de liaison continue pour le second onduleur rend instable la régulation de la tension de liaison continue du premier onduleur. Un régulateur par logique floue (RLF) est développé pour maintenir la tension du bus DC constante quelles que soient les perturbations du système. et assure l'équilibre du flux d'énergie entre les sources renouvelables, les charges et le réseau électrique. De plus, éviter toute montée de tension de liaison continue pour le deuxième onduleur et le rendre plus stable. le régulateur floue reste probablement la méthode la plus utilisée en raison de sa simplicité de mise en œuvre et ses performances dynamique . satisfaisantes. Le contrôleur par logique floue(Fuzzy Logic Controller (RLF))est un contrôleur non linéaire et adaptatif qui

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Énergie Hybride

utilise des systèmes basés sur des règles qui offrent de fortes performances sous la variation des paramètres et les perturbations de charge. La spécification la plus importante de commande par logique floue est leur capacité de logique floue dans la perception de la dynamique de qualité du système et l'application de ces idées de qualité simultanément au système de contrôle souhaité.

Généralement Le contrôleur par logique floue est basé sur trois étapes : la fuzzification, bases de règles et défuzzification comme le montre la Figure 3.20 [149]. Le résultat obtenu par la logique floue dépend des règles d'inférence floue et des opérateurs d'implication floue. La base de connaissances fournit les informations nécessaires pour les règles de contrôle linguistique et les informations pour la fuzzification et la défuzzification. Dans la relation de défuzzification, une action de contrôle réelle est obtenue à partir du moteur d'inférence floue. Le signal d'entrée dans le bloc RLF est un signal d'erreur (la différence entre la tension de référence et la tension de sortie réelle). Le signal d'entrée utilisé dans la mesure utilise une méthode de réglage dure ou nette, certains résultats de mesure sont convertis en valeurs floues pour les ensembles d'entrée floue avec des blocs de fuzzification.

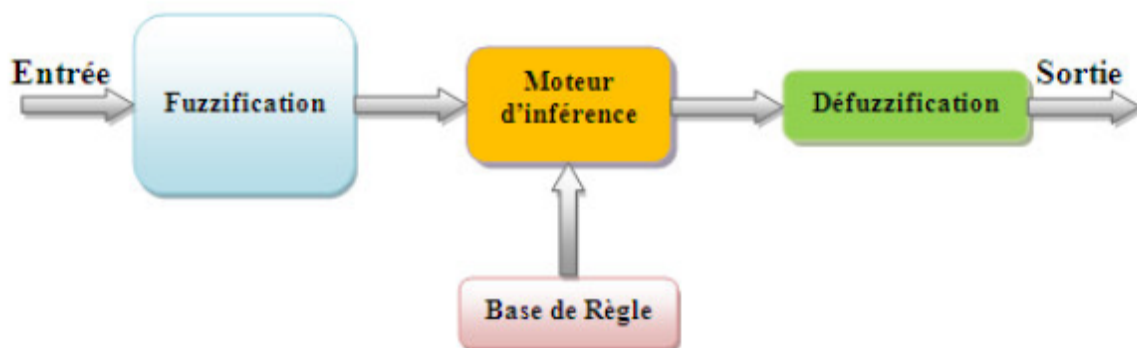


FIGURE 3.20 – Schéma Principe de la logique floue.

3.5.4.1 Fuzzification

La fuzzification est la première étape pour appliquer un système de logique floue qui est le processus de rendre une quantité nette floue, la plupart des variables existant dans le monde réel sont des variables nettes ou classiques. Le processus de fuzzification change l'amplitude dans

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Energie Hybride

l'ensemble crisp (amplitude numérique de l'erreur et des valeurs d'erreur dérivées) à l'amplitude dans l'ensemble flou. La fuzzification implique deux processus : dériver les fonctions d'appartenance pour les variables d'entrée et de sortie et les représenter avec des variables linguistiques. Les fonctions d'appartenance transforment chaque valeur nette en un ensemble flou. En pratique, les fonctions d'appartenance peuvent avoir plusieurs types différents, tels que la forme d'onde triangulaire, la forme d'onde trapézoïdale, la forme d'onde gaussienne, la forme d'onde en forme de cloche, la forme d'onde sigmoïde . Nous avons donc d'abord une variable nette à fuzzifier, l'étape suivante consiste à la fuzzifier à l'aide d'une fonction d'appartenance (triangulaire, trapézoïdale...) puis pour cette variable nous avons un degré d'appartenance dans l'intervalle de $[0,1]$ [150].

3.5.4.2 Règles floues

La deuxième étape dans un système de logique floue est l'application des règles sur les variables d'entrée et de sortie, une base de règles .La base de règles est le composant principal du contrôleur flou ; il indique comment le contrôleur se comporte pour répondre à toutes situations d'entrée. La base de règles est constituée par un ensemble de règles Si-Alors de la forme [151] :

$$R_j : \text{Si } e(k) \text{ est } A_j, \text{ et } de(k) \text{ est } B_j, \text{ Alors } I_{dref}(k) \text{ est } C_j, j = 1 \dots m \quad (3.37)$$

où A_j , B_j et C_j sont des ensembles flous tels que : NL (grand négatif), NM (moyen négatif), etc. définissant une partition floue sur l'espace d'entrée du contrôleur .

3.5.4.3 Défuzzification

La troisième étape d' un système de logique floue est la défuzzification. Malgré le fait que la majeure partie des informations que nous assimilons chaque jour est floue, la plupart des actions ou décisions mises en œuvre par des humains ou des machines sont nettes ou binaires. Les décisions que nous prenons sont binaires, le matériel que nous utilisons est binaire. Il faut donc défuzzifier les sorties pour avoir une seule valeur nette qui nous donne le résultat final de notre problème (le problème de classification par exemple)[152]. Ce processus de « défuzzification

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Énergie Hybride

» a pour résultat de réduire un ensemble flou à une quantité nette à valeur unique, ou à un ensemble net, la sortie d'un processus flou peut être l'union logique de deux ou plusieurs fonctions d'appartenance floues définies sur l'univers. de discours de la variable de sortie. Il existe de nombreuses méthodes de défuzzification dans la littérature, telles que le principe d'appartenance maximale, la méthode centroïde (également appelée centre de zone, centre de gravité), la méthode de la moyenne pondérée et l'appartenance moyenne-max (également appelée milieu des maxima). Le schéma synoptique proposé pour le réglage de la tension V_{dc} est donné sur la figure 3.21

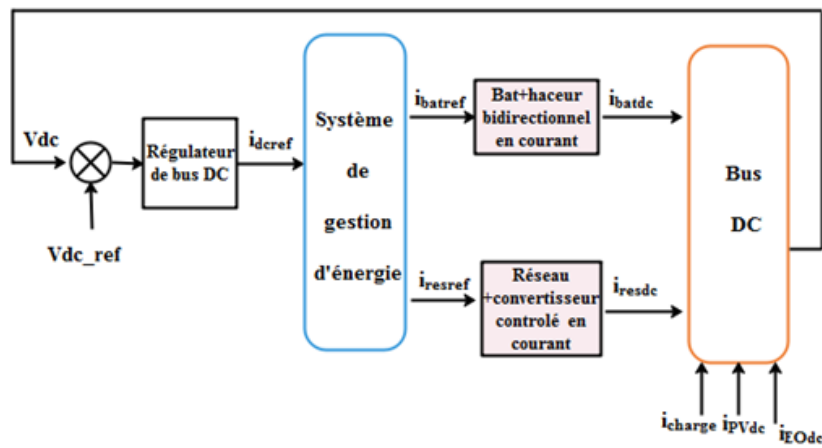


FIGURE 3.21 – Schéma Synoptique du commande bus continu

Le comportement dynamique du bus continu peut être modélisé par l'équation suivante :

$$C_{dc} \frac{d}{dt} V_{dc} = i_c = I_{pv-dc} + I_{eol-dc} - I_{ch-dc} + I_{bat-dc} + I_{res-dc} \quad (3.38)$$

Où : C_{dc} représente la valeur du condensateur du bus continu, I_{pv-dc} , $I_{eol-dc} - I_{ch-dc}$, I_{bat-dc} , et I_{res-dc} désignent respectivement la tension du bus DC, les courants DC de sortie du batterie, PV, la charge, l'éolienne et réseau en aval des différents convertisseurs statiques associés.

Par conséquent, Le régulateur flou agit en fonction de l'erreur entre U_{dc_ref} (700v) et U_{dc} et génère le courant dit 'd'appoint' délivré par la batterie et le réseau' s'écrit de la façon suivante :

$$I_{dc_ref} = i_c + I_{pv-dc} + I_{eol-dc} - I_{ch-dc} \quad (3.39)$$

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Énergie Hybride

Où l'erreur de tension $e_v(k)$ et sa variation $\Delta e_v(k)$ sont choisies comme entrées du régulateur flou(3.22). L'erreur est calculée en comparant la tension réelle du bus continue $v_{dc}(k)$ avec une tension de référence $v_{dc_{ref}}(k)$. De plus, l'erreur $e_v(k)$ et sa valeur précédente $e_v(k-1)$ sont utilisées pour calculer la variation d'erreur $\Delta e_v(k)$ comme suit :

$$\begin{cases} e_v = V_{dc_{ref}} - V_{dc} \\ \Delta e_v(k) = e_v(k) - e_v(k-1) \end{cases} \quad (3.40)$$

$$I_{dc_{ref}} = k_{\Delta d} \Delta I_d \quad (3.41)$$

Afin de rendre les variations d'entrée dans la plage normalisée, des gains de mise à l'échelle

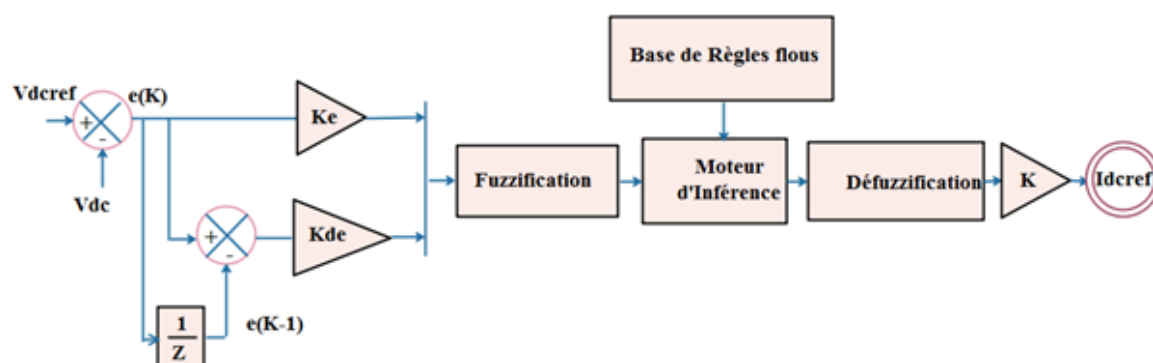


FIGURE 3.22 – Régulation du bus continu par le RLF.

(K_e, K_{de}) sont insérés aux entrées pour transformer les entrées réelles en quantités floues. Il existe de nombreuses formes différentes de fonctions d'appartenance utilisées dans les systèmes flous tels que les fonctions d'appartenance triangulaires, trapézoïdales, gaussiennes, sigmoïdes et singleton. La forme de la fonction d'appartenance est assez arbitraire et dépend des préférences de l'utilisateur. Pour plus de simplicité, des formes triangulaires et trapézoïdales sont généralement utilisées les plus couramment utilisées en raison de leur simplicité et de leur efficacité de calcul. Les fonctions d'appartenance d'entrée et de sortie d'un contrôleur flou. sont données à la Figure 3.23. cinq fonctions d'appartenance sont déterminées pour les variables d'entrée et de sortie, et comme on le voit, des étiquettes linguistiques telles que PB (grand positif), PS (positif petit), ZO (Zéro),

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Énergie Hybride

TABLE 3.2 – Table des règles de décision floues.

Δe_v	e_v				
	NB	NS	EZ	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	EZ
NS	NB	NS	NS	EZ	PS
EZ	NS	NS	EZ	PS	PS
PS	NS	EZ	PS	PS	PB
PB	EZ	PS	PS	PB	PB

NS (petit négatif) et *NB* (gros négatif) sont utilisées pour ces fonctions d'appartenance. Vingt-cinq règles floues ont été déterminées comme indiqué dans le tableau 3.2 pour obtenir une vitesse de poursuite rapide et des oscillations réduites à l'état stable. La méthode d'inférence mine-max, qui est largement utilisée et la méthode bien connue appliquée dans cette étude. Dans cette méthode, l'opérateur minimum (min) est utilisé comme fonction d'implication floue et les entrées floues sont combinées pour obtenir la force de la règle. L'opérateur maximum (max) est utilisé pour combiner les sorties des règles. .

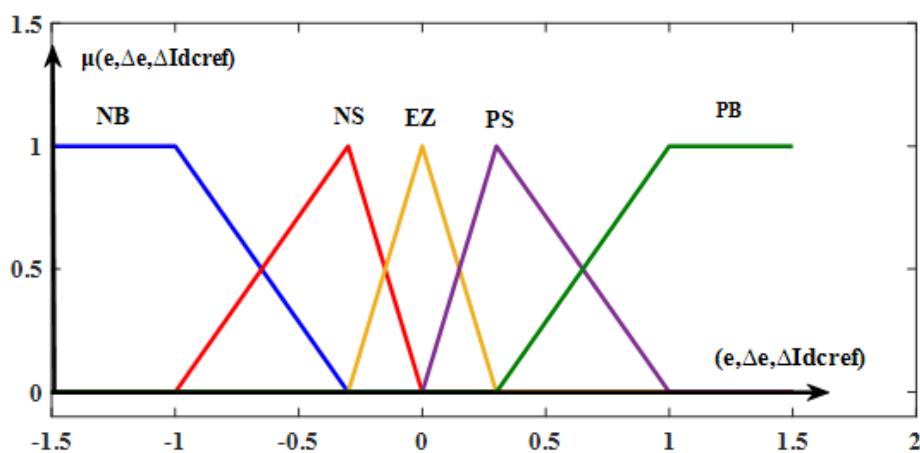


FIGURE 3.23 – Fonctions d'appartenance des entrées et de la sortie.

La méthode de défuzzification du centre de gravité qui est donnée dans l'équation 3.42 est

utilisée pour obtenir des valeurs nettes de la sortie :

$$I_{dc_{ref}} = \frac{\sum_{j=1}^{25} i_{dc_{refj}} \mu(dc_{refj})}{\mu(dc_{refj})} \quad (3.42)$$

3.5.5 la commande des puissance active et reactive côté réseau

L'objectif fondamental du schéma de commande lié au réseau serait de maintenir un courant de sortie sinusoïdal en phase avec la tension de sortie, ce qui se traduirait par un facteur de puissance unitaire. La Figure 3.24 montre en détail la stratégie de commande de l'onduleur connecté au réseau basée sur l'algorithme de commande vectorielle. Cette technique est basée sur le concept de référence stationnaire, dans lequel les courants et les tensions abc triphasés sont convertis en un système d-q biphasé, qui serait le cadre tournant synchronisé, qui est en retard de 90 ° par rapport à la tension de la source du réseau et donc $V_q = 0$. Dans cette technique de commande, il y a deux boucles : une boucle de courant de commande intérieure et une boucle de tension de commande extérieure. Pour maintenir le facteur de puissance proche de l'unité, le courant de l'axe q est ajusté à zéro. Le contrôle du convertisseur statique s'effectue en courant comme le décrit la figure 3.25 De manière similaire au contrôle à flux orienté des machines électriques (FOC), on utilise pour piloter l'onduleur, le contrôle à tension orientée (VOC). Dans le référentiel d-q, l'équation 3.43 devient

$$\begin{cases} v_{d_inv} = R_f i_{gd} + L_f \frac{di_{gd}}{dt} - \omega_g L_f i_{gq} + v_{gd} \\ v_{q_inv} = R_f i_{gq} + L_f \frac{di_{gq}}{dt} + \omega_g L_f i_{gd} + v_{gq} \end{cases} \quad (3.43)$$

On constate un couplage entre les axes $d-q$, les deux termes de couplage sont : $(\omega_g L_f i_{gq}, \omega_g L_f i_{gd})$. Pour une bonne performance de la commande vectorielle, le correcteur PI est remplacé par un correcteur flou. Il faut définir un ensemble de stratégie de contrôle basé sur l'erreur entre une consigne prédéterminée et la sortie réelle du processus qui est, dans ce cas, l'erreur du courant du composant direct et la variation de cette erreur, et l'erreur du courant quadrature et la variation

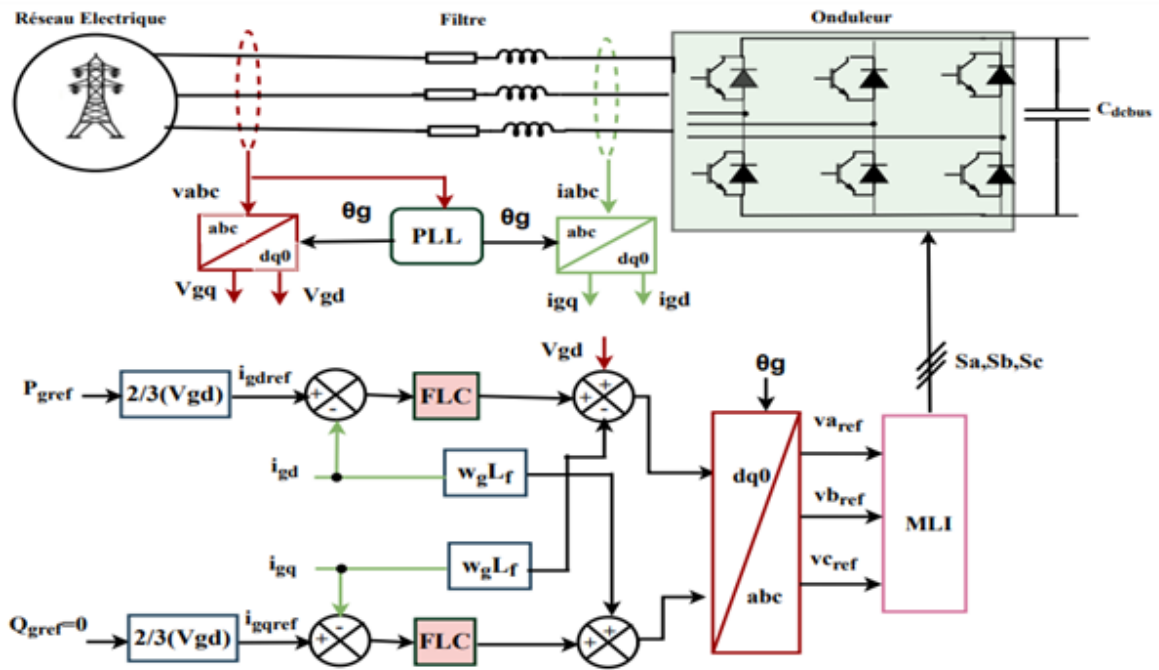


FIGURE 3.24 – Contrôle en courant de l’onduleur réseau dans le référentiel d-q. de cette erreur. Les erreurs des courants sont données par l’expression suivante :

$$\begin{cases} \Delta u_d = i_{gdref} - i_{gd} \\ \Delta u_q = i_{gqref} - i_{gq} \end{cases} \quad (3.44)$$

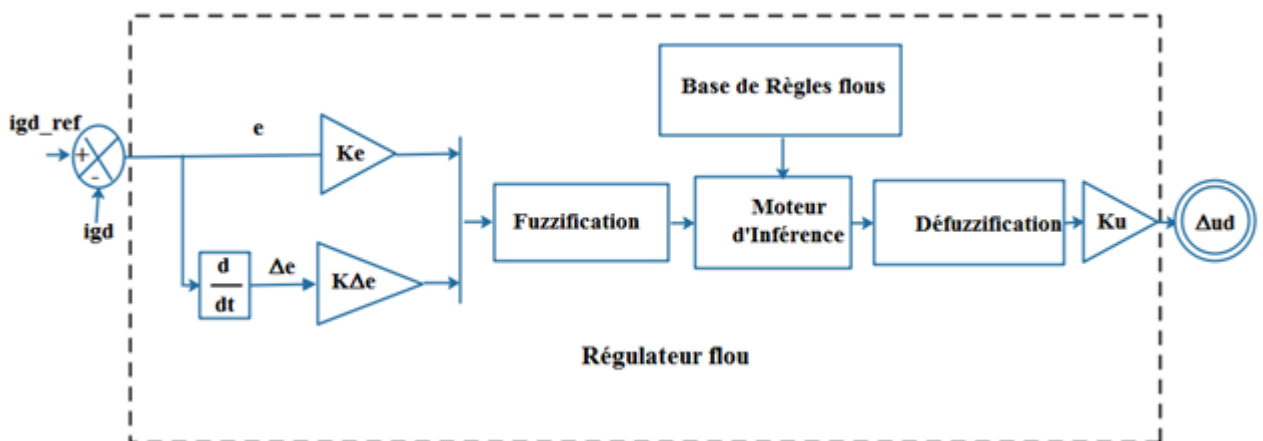


FIGURE 3.25 – Schéma bloc de régulation du courant id-q par le RLF .

K_e : est le gain de l’erreur du courant (composant direct ou quadrature), $K\Delta e$ est le gain

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Energie Hybride

de la variation de l'erreur du courant (i_{gd} ou i_{gq}), e est l'erreur du courant (i_{gd} ou i_{gq}), Δe est la variation de l'erreur du courant (i_{gd} ou i_{gq}), Δu est la sortie flu.

$$\begin{cases} v_{d-g} = \Delta u_d - \omega_g L_f i_{gq} + v_{gd} \\ v_{q-g} = \Delta u_q - \omega_g L_f i_{gd} + v_{gq} \end{cases} \quad (3.45)$$

Les puissances actives et réactives instantanées dans le plan d-q circulant sur le réseau AC sont calculées comme indiqué par l'équation(3.47)[30] :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(v_{gd}i_{gd} + v_{gq}i_{gq}) \\ Q = \frac{3}{2}(v_{gq}i_{gd} - v_{gd}i_{gq}) \end{cases} \quad (3.46)$$

On s'aperçoit que la puissance réactive est directement contrôlable par le courant i_q . Pour avoir un facteur de puissance unitaire, la puissance réactive de référence doit être nulle ($Q_{ref} = 0$). Donc La composante sur l'axe q du courant est nulle ce qui fait que le courant a juste une seule composante qui est sur l'axe d. L'expression des puissances actives et réactives de 3.47 devient :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}v_{gd}i_{gd} \\ Q = 0 \end{cases} \quad (3.47)$$

3.5.5.1 Contrôle de la boucle à verrouillage de phase

La boucle à verrouillage de phase (en anglais Phase-locked loop PLL) est une méthode populaire pour synchroniser le réseau de distribution et les convertisseurs électroniques de puissance connectés au réseau [153]. Pendant ce temps, le contrôle de la puissance active et réactive dépend principalement de cet angle. Dans ce type d'applications, le rôle de la PLL est essentiel pour fournir une détection précise et rapide de l'angle de phase du réseau pour générer le signal de référence de l'onduleur connecté au réseau. La méthode courante pour réaliser une PLL sur un système triphasé consiste à utiliser une trame PLL synchrone. La Figure3.26 montre le schéma fonctionnel de la trame synchrone PLL. L'angle de phase instantané est détecté en synchronisant

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Énergie Hybride

le référentiel avec le vecteur de tension triphasée (v_a , v_b , et v_c). Pour être verrouillé sur l'angle de phase du vecteur de tension d'alimentation, le contrôleur proportionnel-intégral (PI) amène v_q à zéro, comme indiqué par la référence v_q , qui donne les grandeurs de vitesse angulaire. L'angle de phase θ est simplement obtenu en intégrant la vitesse angulaire.

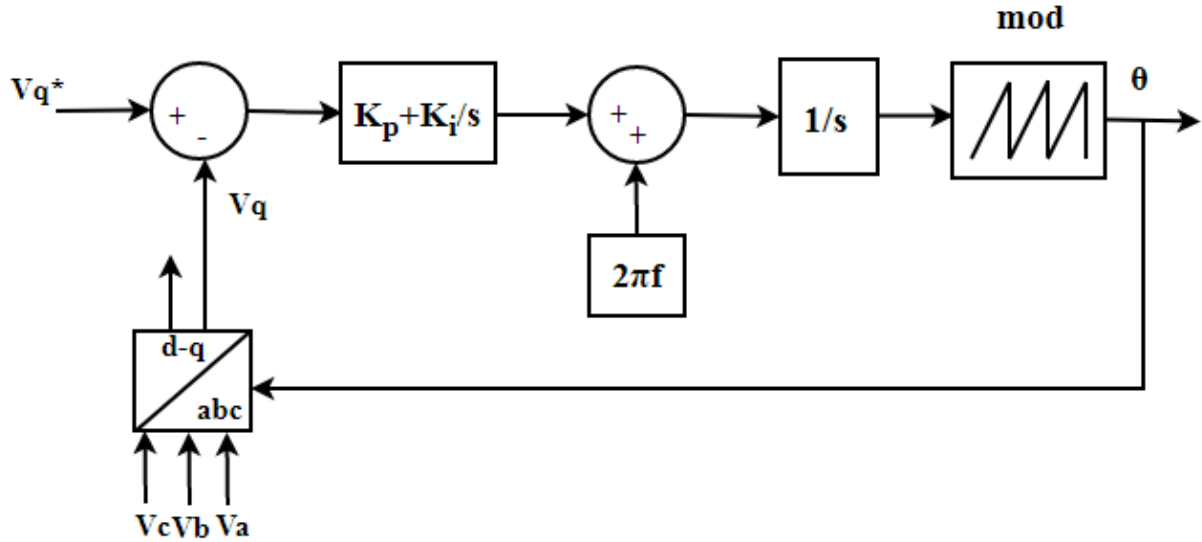


FIGURE 3.26 – Schéma bloc de contrôle de boucle à verrouillage de phase

le régulateur PI sert à réduire l'erreur entre la valeur de référence et la valeur mesurée de V_q . La fonction de transfert du modèle de PLL est de second ordre peut être présentée par :

$$H(s) = \frac{(K_p + \frac{K_i}{s})\frac{1}{s}}{1 + (K_p + \frac{K_i}{s})\frac{1}{s}} = \frac{K_p s + K_i}{s^2 + K_p s + K_i} \quad (3.48)$$

$$K_p = 2 \cdot \zeta \cdot \omega_n \Rightarrow \zeta = \frac{K_p}{2 \cdot \omega_n} = \frac{K_p}{2\sqrt{K_i}} = \frac{\sqrt{K_p \cdot T_i}}{2} \quad (3.49)$$

$$K_i = \omega_n^2 \Rightarrow \omega_n = \sqrt{K_i} = \sqrt{\frac{K_p}{T_i}} \quad (3.50)$$

$$T_i = \frac{2\zeta}{\omega_n} \quad (3.51)$$

Basé sur la formule suivante pour le temps de stabilisation :

$$t_s = \frac{4.6}{\xi \omega_n} = \frac{4.6}{\sigma} \quad (3.52)$$

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Énergie Hybride

les formules finales pour la conception des paramètres du régulateur PI :

$$K_p = 2.\xi.\omega_n = 2.\sigma = 2.\frac{4.6}{t_s} = \frac{9.6}{t_s} \quad (3.53)$$

$$T_i = \frac{2.\xi}{\omega_n} = \frac{2.\xi}{\frac{4.6}{\xi.t_s}} = \frac{\xi^2.t_s}{2.3} \quad (3.54)$$

on choisit le taux d'amortissement $\xi = 0,7$ et $t_s = 0,02s$ (une période du réseau 50 Hz). Sur cette base : $K_p = 460Hz/V, T_i = 0,0043s$. Par rapport à la valeur réelle de l'amplitude de la tension du réseau : $K_p = \frac{460}{220\sqrt{2}}Hz/V$.

3.5.6 Contrôle des puissances active et réactive coté générateur diesel

Le générateur diesel est utilisé lorsque le système fonctionne en mode autonome. les conditions de mise en marche ou l'arrêt du générateur Diesel sont définies comme suit :

$$P_{dg} = \begin{cases} P_{dg} = P_{charge} & \text{Si } SOC < 25\% \quad \& \quad (P_{pv} + P_{eol}) < P_{charge} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.55)$$

Le schéma fonctionnel du mécanisme de contrôle au niveau du redresseur est illustré à la figure 3.27. la puissance active est dédiée à la puissance nominale, et la puissance réactive est fixée à zéro afin d'atteindre le facteur de puissance unitaire. La boucle externe est utilisée pour contrôler la puissance active et réactive du générateur diesel côté redresseur à l'aide d'un régulateur PI. Les courants de références dans les axes d et q sont données à la sortie de ce régulateurs. la boucle interne contrôle les composantes d-q du courant et une boucle externe par le deuxième régulateur PI[154]. Pour ce faire, la commande par deux boucles de régulation mises en cascade reste la technique la plus exploitée en raison de sa simplicité de mise en oeuvre et les résultats satisfaisants La commande de la boucle externe de puissance est donnée par l'équation 3.56 :

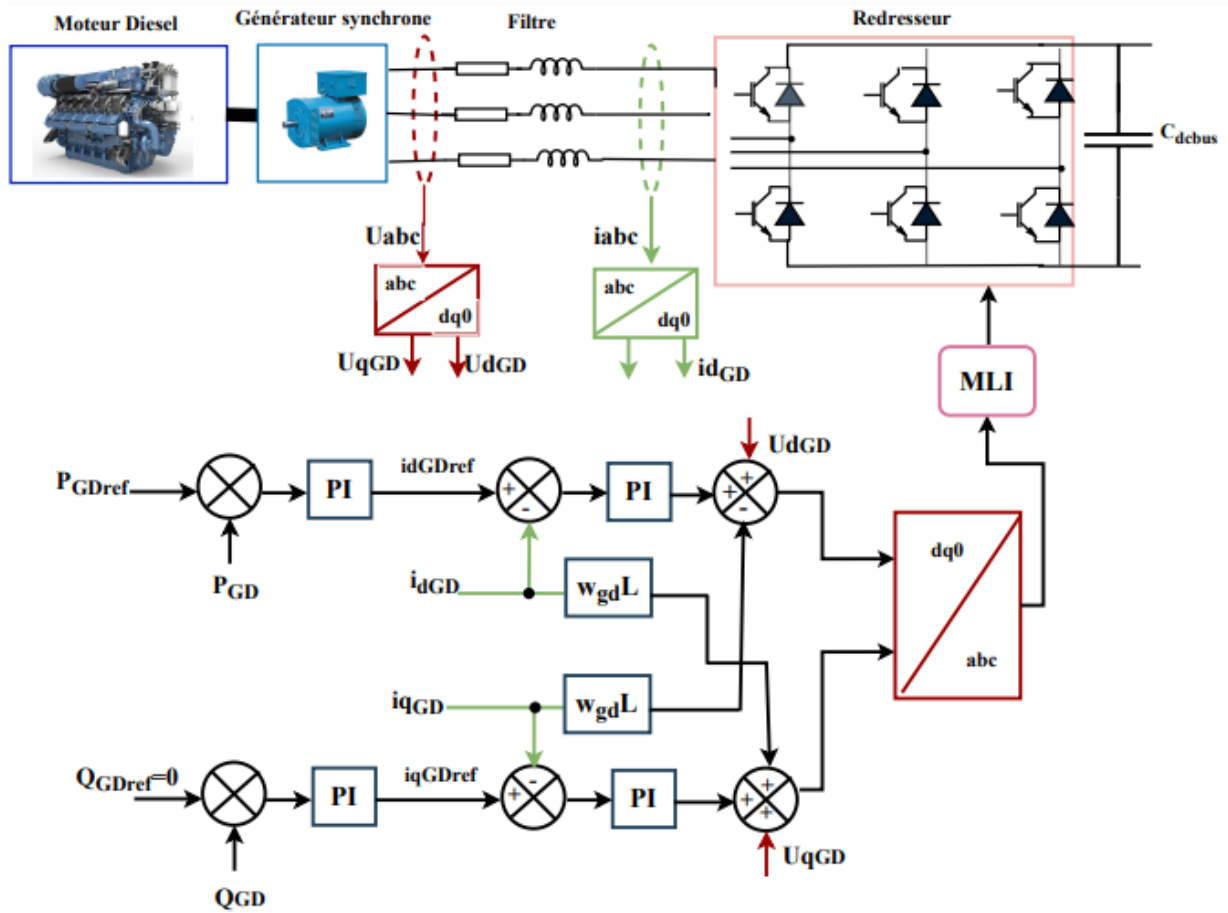


FIGURE 3.27 – Schéma commande du redresseur coté générateur diesel.

$$\begin{cases} i_{dref} = (P_{ref} - P)(K_{pp} + \frac{K_{ip}}{s}) \\ i_{qref} = (Q_{ref} - Q)(K_{pq} + \frac{K_{iq}}{s}) \end{cases} \quad (3.56)$$

Afin d'éviter l'influence mutuelle entre les axes d, q dans la boucle interne de courant et d'éliminer l'influence entre la puissance active et réactive, la commande de la boucle interne de courant est donnée par l'équation 3.57 :

$$\begin{cases} u_d = e_d + \omega L i_q - (i_{dref} - i_d)(K_{ip} + \frac{K_{ii}}{s}) \\ u_q = -\omega L i_d - (i_{qref} - i_q)(K_{ip} + \frac{K_{ii}}{s}) \end{cases} \quad (3.57)$$

où K_{ii} , K_{ip} sont les coefficients de régulation proportionnels et intégraux des régulateurs PI de la boucle interne de courant, respectivement.

3.5.7 Contrôle de l'onduleur côté charge

L'objectif principal de la Commande de l'onduleur côté charge est de maintenir la tension et la fréquence sous une tension et fréquence nominale (230V, 50Hz) respectivement pendant la variation de la puissance hybride ou de la puissance de charge. Les boucles de contrôle fermées utilisées par ces commandes garantissent une réponse transitoire rapide et des performances stables . La figure 3.28 montre le schéma simplifié d'un onduleur de tension triphasé, connecté à une charge à travers un filtre LC, la stratégie de contrôle basée sur le dqo conventionnel de l'onduleur de la source de tension. Les équations de tension utilisant la transformation dq dans le référentiel tournant sont :

$$\begin{cases} v_d = v_d - L_f \frac{di_d}{dt} + \omega L_f i_q \\ v_q = v_q - L_f \frac{di_q}{dt} - \omega L_f i_d \end{cases} \quad (3.58)$$

Ainsi, la puissance active et réactive peut être calculée en utilisant la transformation dq et donnée par :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(v_d i_d + v_q i_q) \\ Q = \frac{3}{2}(v_q i_d - v_d i_q) \end{cases} \quad (3.59)$$

Si le référentiel est $v_q = 0$ et $v_d = |V|$, les équations des puissances actives et réactives seront :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(v_d i_d) = \frac{3}{2}|V| i_d \\ Q = \frac{3}{2}(v_q i_d) = \frac{3}{2}|V| i_q \end{cases} \quad (3.60)$$

Par conséquent, les puissances actives et réactives peuvent être contrôlées en contrôlant respectivement les composants directs et en quadrature. De plus, dans le cas d'une charge résistive, V_{dref} est calculée comme suit :

$$V_{dref} = V_{eff}^* \cdot \sqrt{2} \quad (3.61)$$

où V_{eff}^* est la valeur de référence efficace de la tension de phase de sortie. Les contrôleurs PI sont utilisés pour réguler les courants de charge de sortie dans les boucles de contrôle internes et pour réguler les tensions de charge de sortie dans les boucles externes. Des termes de compensation

Chapitre 3. Les Techniques De Commande D'un Système D'Energie Hybride

éléments qui constituent notre système. D'autre part, une autre approche basée sur le réseau de neurones a été proposée consiste en un outil de prédiction basé sur un algorithme réseau neurone de type Elman qui permet de prédire sur un horizon donné, la puissance de référence des batteries de stockage et la puissance de référence du réseau ainsi que la prédiction de la consommation de la charge. Par la suite, Diverses techniques de contrôle ont été incorporées pour exploiter la puissance maximale des sources DC et AC et pour faciliter la coordination de l'échange de puissance entre le réseau DC et AC. Ces techniques sont résumées par les points suivants :

- maximiser la puissance produite dans chaque source nous présentons la technique de suivi de point de puissance maximale (MPPT). Cette technique permet au système PV de passer du point de puissance maximale au point de puissance limitée et vice versa.
- Le convertisseur élévateur coté GSAP est contrôlé par un suivi du point de puissance maximale (MPPT), pour générer la puissance optimale de l'éolienne en modulant le rapport cyclique à base d'un contrôleur de type de mode glissant-predictive.
- le contrôleur par logique floue utilisé afin de maintenir constante la tension du bus DC au niveau souhaité, malgré les variations de puissance entre les SER et les charge d'une part, et Contrôler l'onduleur coté réseau d'une autre part
- l'introduction d'une régulation type PI classique pour Contrôler l'onduleur coté charge et le redresseur MLI coté génératrice synchrone .

CHAPITRE IV : Résultats et discussion

« Le succès semble être lié à
l'action. Les gens qui réus-
sissent continuent de bouger.
Ils font des erreurs, mais ils
n'abandonnent pas. »

Conrad Hilton

4

Résultats et discussion

Sommaire

4.1	Introduction	146
4.2	Résultats et discussion	146
4.2.1	Résultats de simulation du gestionnaire d'énergie basé sur Stateflow	147
4.2.2	Résultats de la simulation : Scénario-1 [Mode connecté au réseau]	148
4.2.3	Résultats de simulation : Scénario-2 [Situation autonome]	152
4.2.4	Résultats de simulation du générateur photovoltaïque	154
4.2.5	Résultats de simulation et discussion de la chaîne éolienne	154

Chapitre 4. Résultats et discussion

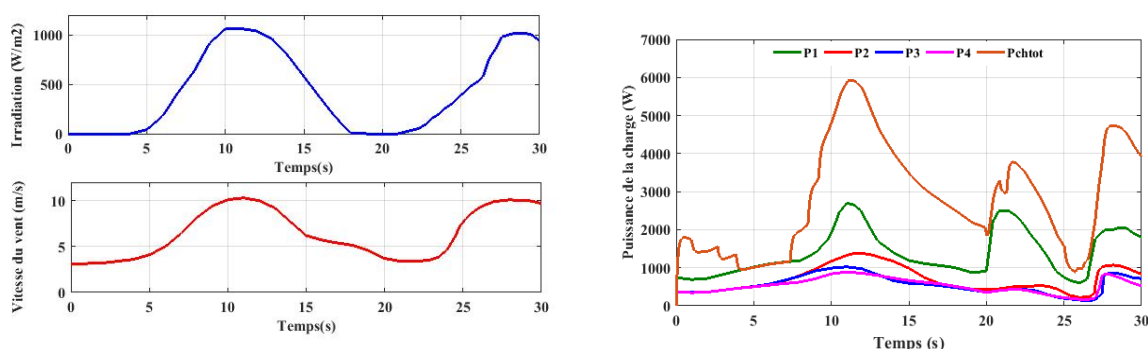
4.2.6	Résultats de simulation du réseau électrique	157
4.2.7	Résultats de simulation du générateur diesel	164
4.2.8	Résultats de simulation du gestionnaire d'énergie basé sur le RNA .	167
4.3	Conclusion	173

4.1 Introduction

Dans le but de de valider la commande globale du système et évaluer Les performances du système gestion de l'énergie et des contrôleurs proposés, Le système hybride est composé de sources hybrides DC et AC. Pour extraire le maximum d'énergie de chaque source renouvelable,chaque source d'alimentation est connectée au bus CC du micro-réseau via un convertisseur de puissance. Le générateur photovoltaïque avec 2 panneaux en série et 15 en parallèle fournit une pleine puissance de 4,6 KW. Le type d'éolienne est PMSG et fournit une puissance maximale de 4 KW. Le type de batterie est plomb-acid, capacité = 200 Ah . Le générateur diesel a une puissance de 8,1 KVA sont modélisés pour les quatre charges prioritaires . De plus, nous avons considéré un scénario de simulation qui correspond à 30 seconde consécutives . l'état de charge initiale de la batterie proposée dans ce mode est de 60% pour pouvoir vérifier tous les cas de fonctionnement possibles durant la simulation.Les profils de ces paramètres météorologiques ainsi que celui de la consommation de la charge sont donnés .Après la simulation du système complet dans l'environnement de MATLAB/Simulink, les résultats obtenus sont détaillés dans les sections suivantes de ce chapitre .

4.2 Résultats et discussion

Après la modélisation des différents sous systemes du micro reseau , ainsi que la présentation détaillée de leurs commandes, dans cette partie, on va simuler les deux modes de fonctionnement, le mode isolé, et le mode connecté au rseau . Après une simulation de 30s, les résultats obtenus et Les résultats de prédiction des deux architectures RNA sont présentés en détail dans cette section.



(a) Profil de l'éclairement solaire et de vitesse du vent.

(b) Puissance consommée par les charges.

FIGURE 4.1 – les Profils de l'éclairement solaire et de vitesse du vent, (b) Puissance consommée par les charges.

4.2.1 Résultats de simulation du gestionnaire d'énergie basé sur Stateflow

Dans cette section, la stratégie Stateflow est utilisée pour générer un ensemble de données pour l'apprentissage du réseau neurone. Il existe de nombreux scénarios que nous avons utilisés pour obtenir les résultats dans le mode connecté au réseau et isolé, où dans le premier cas, le système solaire fonctionne à la puissance maximale et fournit ainsi aux charges l'énergie requise. Quant au reste de l'énergie, elle est injectée dans le réseau. Dans le second cas, les sources principales ne fonctionnent pas, donc le réseau fonctionne pour alimenter les charges avec l'énergie requise. Dans le troisième cas, le système solaire produit une capacité qui n'alimente que les charges sans aucune augmentation de l'énergie. Dans le quatrième cas, le système donne moins de capacité que la capacité requise des charges, de sorte que le réseau électrique participe à fournir le reste de la demande de charges. Lorsque le système est dans un état critique, le *SOC* continue de diminuer, ce qui permet au superviseur de réagir correctement à cette situation et donc de couper la charge avec la priorité la plus basse afin de préserver l'équilibre du système. On présentera en fait dans ce qui suit un ensemble de graphes démontrant les performances du système hybride. Ces résultats montrent l'efficacité de la gestion de l'énergie par Stateflow utilisée pour ce système hybride. Nous supposons que l'état de charge de la batterie est de 60% pour pouvoir vérifier tous les cas de fonctionnement. La Figure 4.2 montre la répartition de puissance entre les sources d'énergie du

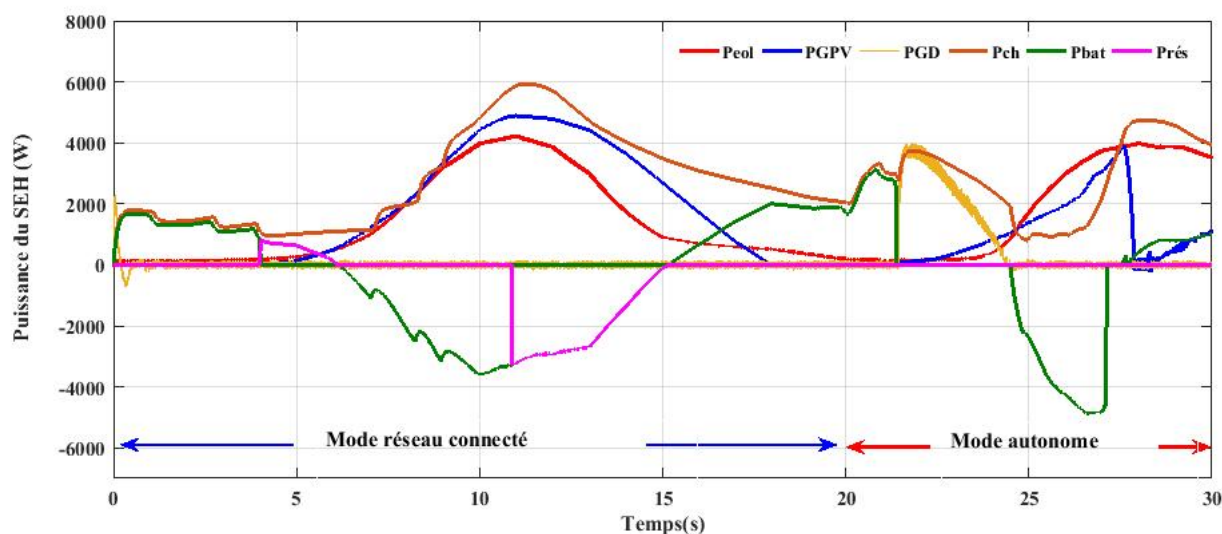


FIGURE 4.2 – les puissances du système hybride obtenues. système sur une période de 30s en utilisant les profils de vitesse du vent et irradiation solaire qui varie de 0 W/m^2 à 1000 W/m^2 (Voir Figure 4.1) . Durant le long de la durée du simulation. On peut aussi remarquer que le système de conversion éolien et le système photovoltaïque jouent le rôle de la source principale.

4.2.2 Résultats de la simulation : Scénario-1 [Mode connecté au réseau]

Le SEH en ce mode est composé d'un générateur PV, générateur éolien, système de stockage et quatre charges AC de priorité différente.

A cause du fait que notre système est relié a un réseau électrique, Nous pouvons considérer que l'éolienne et le générateur photovoltaïque fonctionnent en mode MPPT sur tout le long de la durée de simulation(0-20s),à noter que durant les premières minutes (environ 6.5), en l'absence des sources renouvelables, la batterie et le réseau électrique prennent le rôle de la source auxiliaire qui alimente la charge.

— **De 0s à 4s :** Dans cette période,le générateur PV ne génère aucune puissance,et L'éner-

gie du générateur éolien est insuffisante par rapport à la demande de charge, c'est dire, qu'on peut passer au mode d'intervention du système de stockage pour combler le manque des deux générateurs, PV et éolien, pour alimenter la charge, on se réfère à la Figure 4.3a on remarque une augmentation de la puissance de la charge à l'instant $t = 1.14s$ à $4s$, qui a été accompagné par une diminution du *SOC* de la batterie et la puissance fournie par le système de stockage, l'algorithme de supervision a chaque fois délesté les charges moins prioritaires, donc, seules les charges prioritaires sont alimentées par le système de stockage.

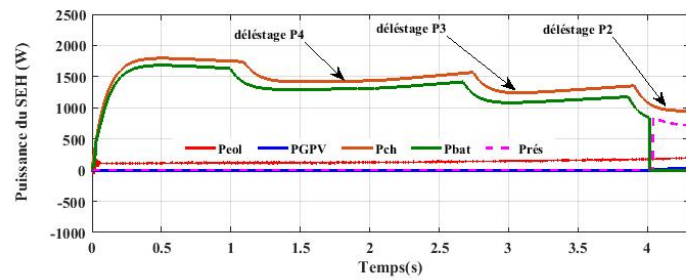
- **De 4s à 6.5s** : Le *SOC* est inférieur à 25% (voir Figure 4.16b), un niveau qui a été choisi pour faire appel au réseau électrique, donc, seules les charges prioritaires sont alimentées par le réseau électrique, la Figure 4.3b, montre comment le réseau électrique a couvert le manque de la puissance générée par le générateur photovoltaïque et éolien pour alimenter la charge.
- **De 6.5s à 10.74s** : Dans cette intervalle, le générateur PV a commencé à délivrer une puissance on remarque une augmentation dans la charge à l'instant $t = 7 : 9s$, qui a été accompagné par une augmentation de la puissance fournie par le système de stockage. lorsque sa puissance est devenue supérieure à la puissance de la charge prioritaire *P1* et le *SOC* atteint un niveau supérieur de 25%, l'algorithme de supervision a chaque fois connecté les charges selon le *SOC*, les charges sont alimentées principalement par le générateur éolien et GPV.
- **De 10.74s à 11.34s** : Pendant ce temps, l'état de charge de la batterie atteint son maximum 95% la puissance fournie par les deux générateurs renouvelables est égale au besoin de la charge (Voir Figure 4.3c).
- **De 11.34s à 15s** : Le *SOC* est supérieure à 95%, et la puissance de deux générateurs renouvelables dépasse la demande de charge, c'est dire, qu'on est dans le mode d'injection au réseau, comme l'indique la Figure 4.16b, Le *SOC* est supérieur à 95%, et la puissance des deux générateurs renouvelables dépasse la demande de charge, c'est à dire, qu'on est dans le mode d'injection au réseau, comme l'indique la Figure 4.3d, la

Chapitre 4. Résultats et discussion

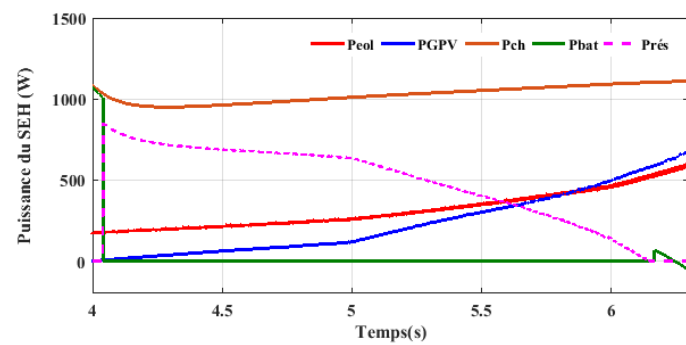
puissance est négative, ce qui signifie que le surplus d'énergie est injecté dans le réseau.

- **De 15s à 20s :** Pendant cette courte durée, on est revenu au mode de sollicitation du système de stockage, à cause de la diminution de la puissance fournie par les deux générateurs renouvelables . La Figure 4.3 montre la puissance fournie par la batterie pour aider les deux générateur à alimenter la charge.

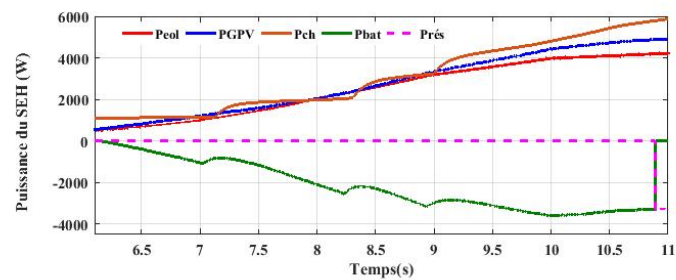
Chapitre 4. Résultats et discussion



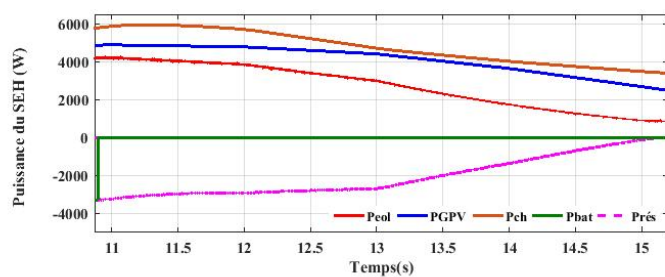
(a)



(b)



(c)



(d)

FIGURE 4.3 – Zoom du mode connecté au réseau.

4.2.3 Résultats de simulation : Scénario-2 [Situation autonome]

Le SEH en ce mode est composé d'un générateur PV, générateur éolien, système de stockage et quatre charges AC de priorité différente et générateur diesel. l'objectif principal dans ce mode consiste à répondre à la demande de la charge. Après 20s de simulation, l'algorithme de gestion d'énergie commute le mode de fonctionnement du SEH en mode autonome .

- **De 20s à 21.4s** : Dans cette période, le générateur PV ne génère aucune puissance. Le *SOC* est inférieur à 50%, l'algorithme de supervision commence à délester les charges moins prioritaires, donc, seules les charges prioritaires sont alimentées par le système de stockage.
- **De 21.4s à 24.5s** : Le *SOC* est inférieur à 25%, un niveau qui a été choisi pour faire appel au générateur diesel (GD), durant cette intervalle, le générateur Diesel est mis en marche pour alimenter les quatre types de charges (Prioritaire et non-prioritaire), la puissance délivrée par le générateur diesel est illustrée sur la Figure 4.4b. La tension du GD est donnée sur la Figure 4.22, tandis que son courant est représenté sur la Figure 4.21.
- **De 24.3s à 27.7s** : Pendant ce temps, la puissance fournie par les deux générateurs renouvelables est supérieure au besoin de la charge, et le *SOC* est inférieur à 95%, donc, c'est le mode de stockage d'énergie qui est appliqué. De la Figure 4.4c , on constate que la puissance devient négative, ce qui signifie que le courant de la batterie circule dans le sens inverse et la batterie est en charge.
- **De 27.7s à 30s** : La puissance de deux générateurs renouvelables dépasse la demande de charge, et le *SOC* est supérieur à 95% (Voir Figure 4.16b), à ce niveau, l'algorithme de supervision a arrêté le chargement de la batterie pour la protéger contre la surcharge.

Chapitre 4. Résultats et discussion

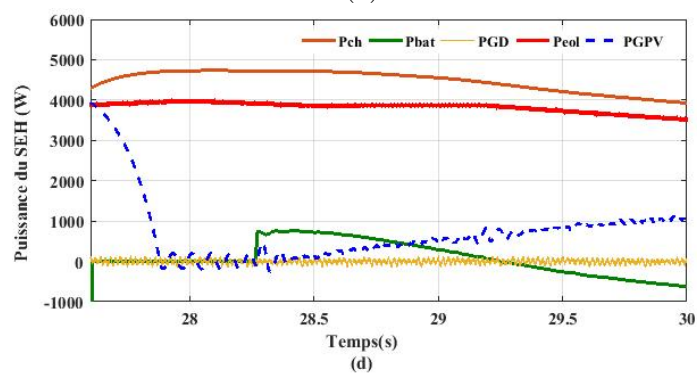
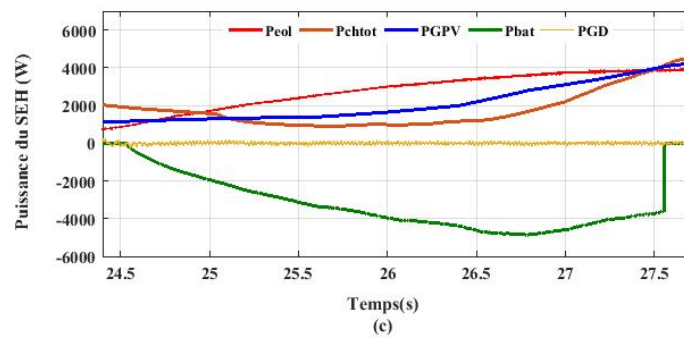
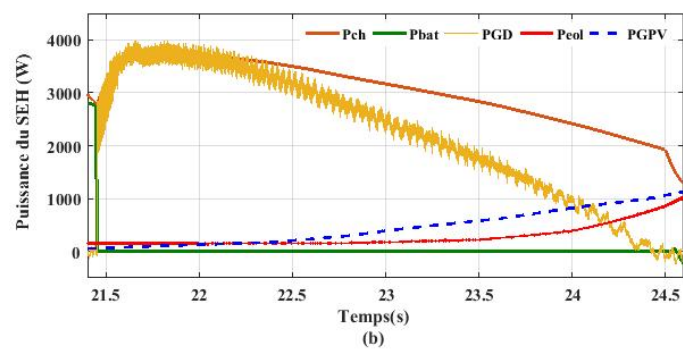
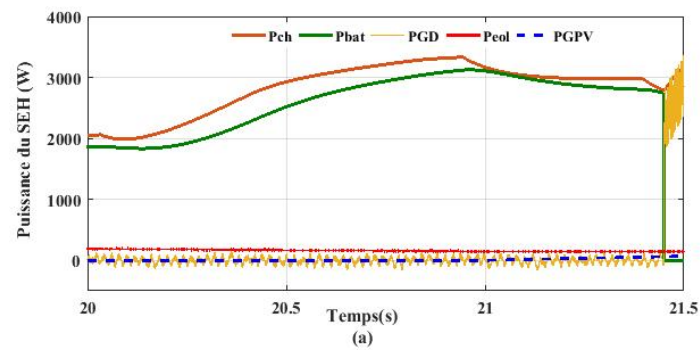


FIGURE 4.4 – Zoom du mode autonome.

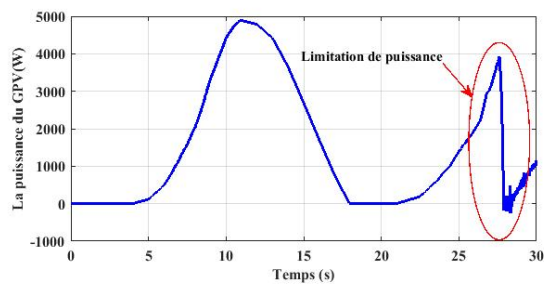
4.2.4 Résultats de simulation du générateur photovoltaïque

Le système photovoltaïque contient quinze panneaux identiques avec les mêmes caractéristiques qui sont interconnectées en parallèle, ce qui donne une puissance totale de 4,6 KW. les caractéristiques et les performances du générateur PV sont illustrées à la Figure 4.5. D'après la figure 4.5, il est évident que le contrôleur MPPT fonctionne efficacement, en suivant la tension maximale dans toutes les conditions d'irradiation rencontrées. Il est également évident que le système délivre sa puissance nominale dans des conditions standards, c'est-à-dire $1000W/m^2$ et $25^{\circ}C$. le générateur photovoltaïque a fonctionné au début en mode MPPT jusqu'à ce que le SOC de la batterie ait atteint son minimum après elle a basculé en mode limitation de puissance. Comme le montre la Figure 4.5a, le mode de puissance réduite a été activé entre 27.61s et 28.5 s. Le contrôleur a forcé le générateur photovoltaïque de fonctionner en mode de limitation de puissance. De plus, la puissance a été maintenue constante à la valeur cible. Malgré le rayonnement solaire élevé. D'après la figure 4.5a, on peut voir que l'algorithme de réduction de puissance proposé fonctionne efficacement pour limiter la production d'énergie maximale. nous pouvons conclure que l'algorithme MPPT a de bonnes performances dans la recherche MPP, quelles que soient les conditions de fonctionnement. Comme on peut le voir dans tous les scénarios, le MPP est atteint en moins de 1 s, après quoi l'algorithme MPPT a oscillé autour de ce point.

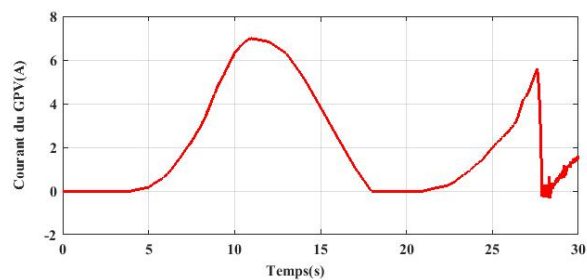
4.2.5 Résultats de simulation et discussion de la chaîne éolienne

La Figure 4.6a montre le coefficient de puissance. Il est clair que la technique MPPT assure le suivi des points de puissance optimum, en maintenant le coefficient de puissance autour de sa valeur maximale $C_{p_{max}} = 0,479$ pour toute la période de simulation, ce qui montre de bonnes performances de la commande MPPT basée sur un mode glissant. Le rapport de vitesse optimal résultant est illustré à la Figure 4.6b. Cela montre que le changement du rapport de vitesse de pointe varie dans une plage relativement petite autour de la valeur optimale de (8.1).

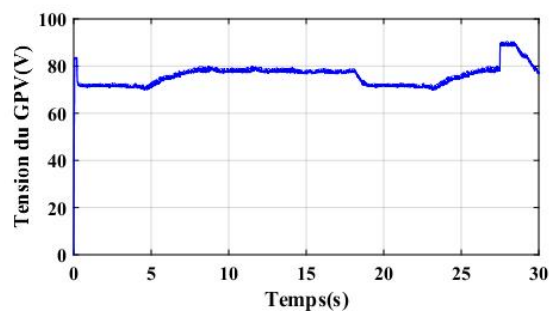
Chapitre 4. Résultats et discussion



(a) Puissance



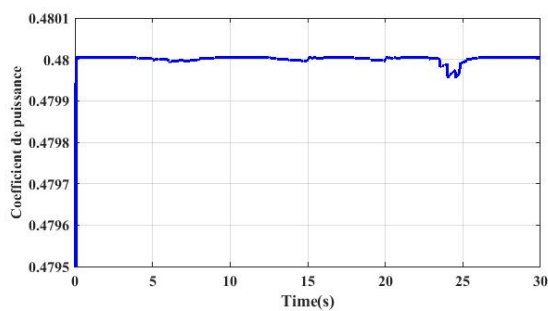
(b) Courant



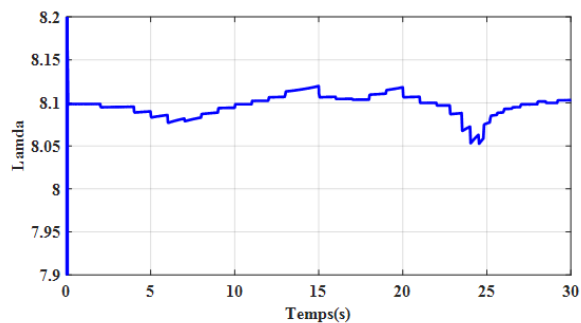
(c) Tension

FIGURE 4.5 – Performances de sortie du générateur PV sous différents niveaux d'irradiation .

Les figures 4.7a, 4.7b, et 4.7c illustrent les suivis de vitesse de rotation optimale le couple et le



(a) Coefficient de puissance



(b) La vitesse relative optimal

FIGURE 4.6 – Résultats de simulation de la turbine éolienne

courant i_q respectivement. on peut voir que le système de contrôle de l'énergie éolienne extrait la puissance optimale en régulant la vitesse du rotor du générateur synchrone, L'allure de la vitesse

Chapitre 4. Résultats et discussion

suit parfaitement sa référence qui est atteinte rapidement sans dépassement avec une petite perturbation. la courbe montre que la stratégie de contrôle utilisée est satisfaisante. L'amplitude

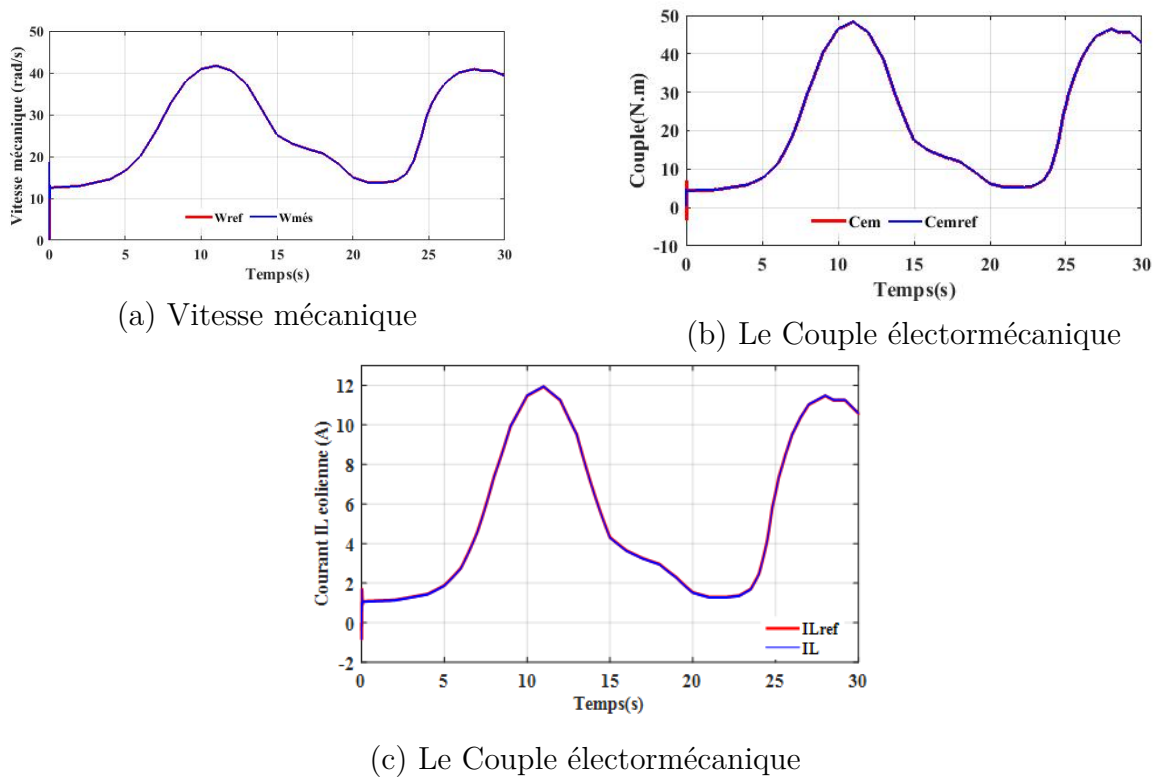


FIGURE 4.7 – performance de la chaine eolienne

d'une tension de sortie triphasée d'un GSAP illustrée à la figure 4.9 varie en fonction de la variation de la vitesse du vent. De plus, l'amplitude de la tension de sortie triphasée est élevée. lorsque la vitesse du vent augmente, plus Par exemple, à partir du temps 8 à 11 sec de la figure 4.1a, le profil de vitesse du vent est élevé. De même, la tension de sortie triphasée est élevée en conséquence pendant une plage de temps de 3 à 4 secondes. D'une façon globale, nous constatons que la plupart des variables ont suivis l'évolution du vent.

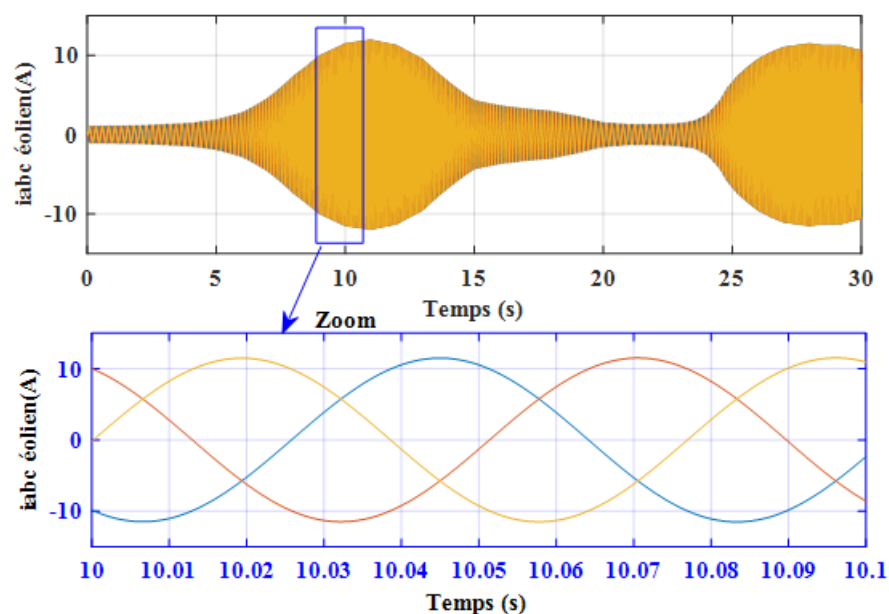


FIGURE 4.8 – Les courants de sortie de la GSAP avec profil incertitude du vent.

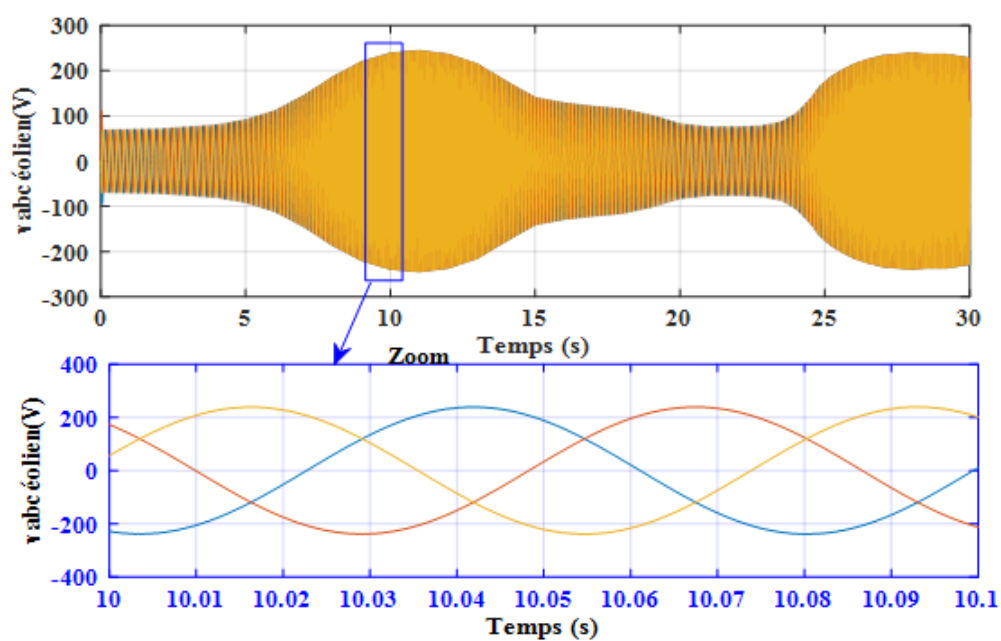


FIGURE 4.9 – Les tensions de sortie de la GSAP avec profil incertitude du vent.

4.2.6 Résultats de simulation du réseau électrique

Les résultats du contrôle de la puissance active et réactive par logique floue (RLF) sont illustrés dans la figure 4.10. On peut voir que la réponse de puissance active contrôlée par le

Chapitre 4. Résultats et discussion

contrôleur à logique floue suit la référence de puissance active générée. On peut également remarquer que la puissance réactive contrôlée par le contrôleur à logique floue suit la référence mise à zéro avec une réponse transitoire rapide. Il est évident que le facteur de puissance unitaire est atteint approximativement. La variation de la puissance active n'affecte pas la puissance réactive, ce qui démontre la robustesse de ce schéma de commande. Par conséquent, La variation de la puissance active entraîne une variation de la composante de courant i_d . Par contre, la composante de courant i_q reste nulle. Ceci montre que les deux composantes de courant i_d et i_q sont respectivement les images de puissance active et réactive. La figure 4.11 montre les réponses du courant actif et de sa référence en utilisant la stratégie de commande par logique floue. Il est clair que la commande par logique floue (RLF) a une meilleure performance dynamique. Le courant réactif et ses réponses de référence sont représentés sur la figure 4.12. par conséquent, une variation du courant alternatif 4.12.

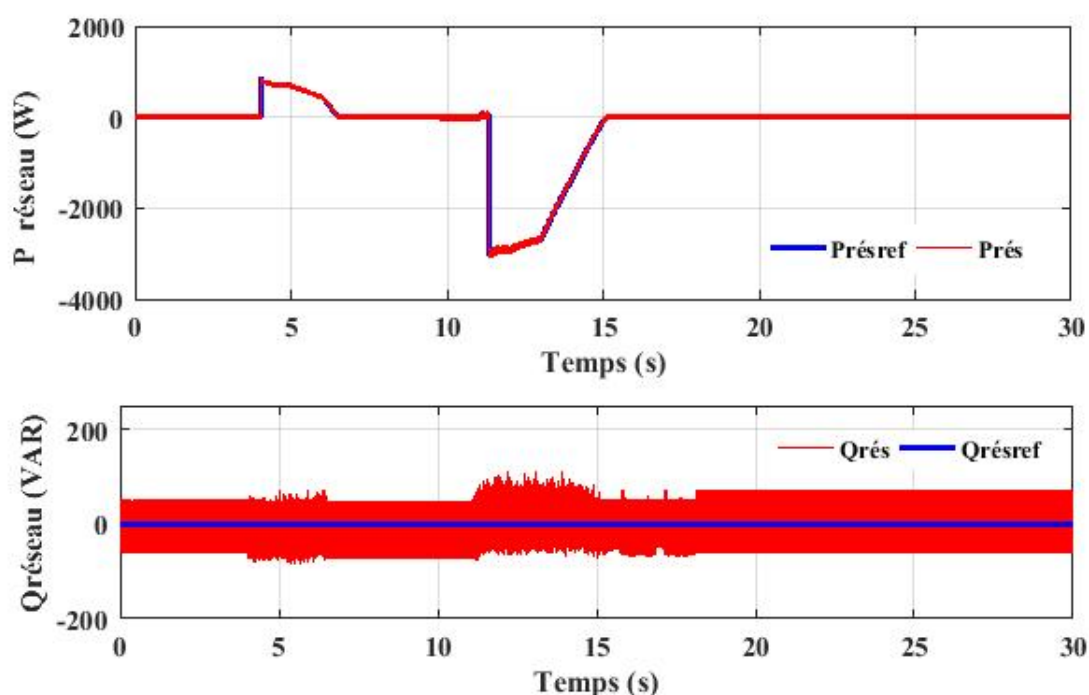


FIGURE 4.10 – Les Allures de la puissance active et réactive du réseau.

Chapitre 4. Résultats et discussion

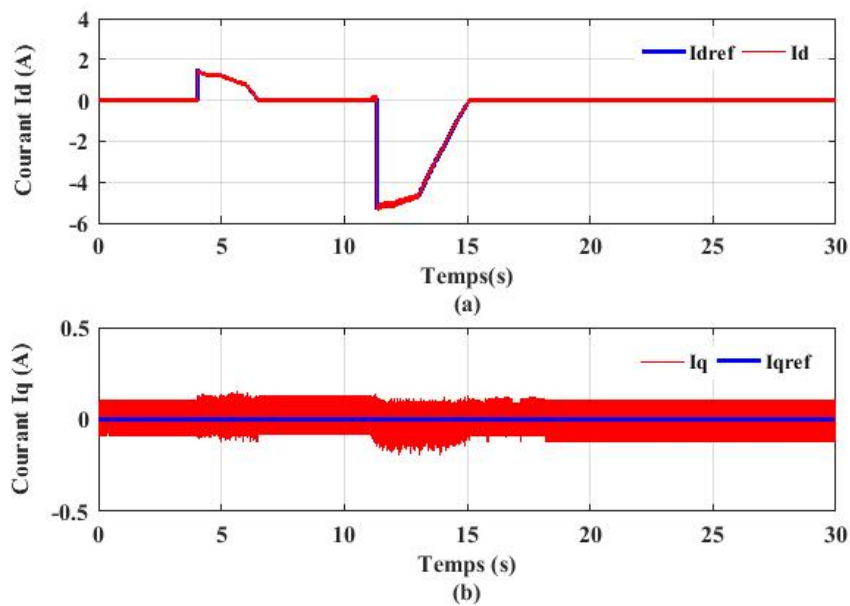


FIGURE 4.11 – Les courants directs (a) et quadratures (b) en fonction du temps du réseau .

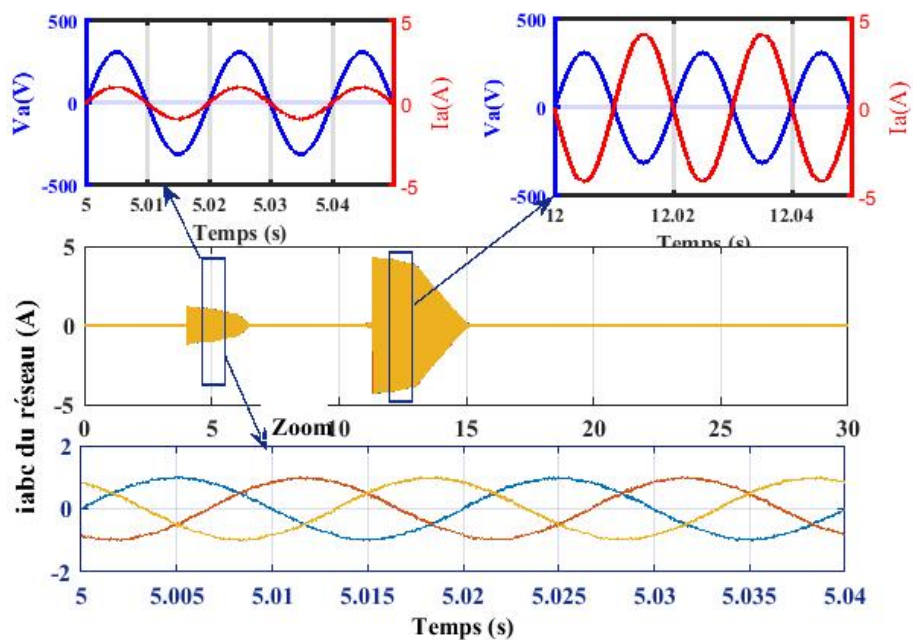


FIGURE 4.12 – Les Courant de sortie du réseau avec l'allure de la tension et du courant du phase a .

Chapitre 4. Résultats et discussion

Afin de comparer la variation de déphasage entre le courant et la tension nous avons représentés l'allure de la tension et du courant du phase (a) dans une même courbe . La figure 4.12 montre que la tension et le courant du phase AC triphasé sont exactement en phase pendant le mode de fonctionnement du redresseur, ce qui garantit le facteur de puissance unitaire. en mode onduleur, le convertisseur permet le transfert de puissance avec un facteur de puissance unitaire du bus de tension continue à l'extrémité de tension alternative en maintenant la tension et le courant de phase avec un déphasage de 180° , comme présenté à la Figure 4.12 .

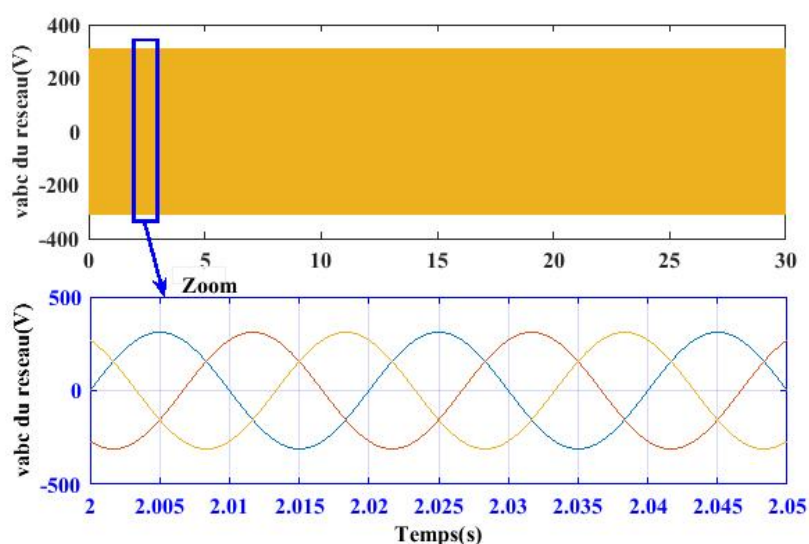


FIGURE 4.13 – Les Allures de tensions sortie du réseau.

Une analyse de la distorsion harmonique du courant du réseau (phase a) a été réalisée en Deux scénarios envisageables; comme le montrent les Figures (4.14,4.15). Dans le premier, l'analyse THD pour le courant de grille de la plage de fréquences de 0 Hz à 1 kHz pendant six cycles avec la fréquence fondamentale de 50 Hz est illustrée à la Figure 4.14. Cela montre clairement que la teneur en THD dans le courant du réseau est de 2,46% en mode injecté dans le réseau. tandis que dans le second, en mode sollicitation du réseau électrique. L'analyse THD pour le courant du réseau dans la plage de fréquences de 0 Hz à 1 kHz pendant six cycles avec la fréquence fondamentale de 50 Hz est illustrée à la Figure 4.15 est obtenue à 1,46 %. Nous avons

Chapitre 4. Résultats et discussion

conclu que la logique floue crée une haute qualité d'énergie électrique injectée dans le réseau. Une supériorité significative (logique floue) est illustrée dans la forme lisse du courant (due à la suppression des harmoniques).

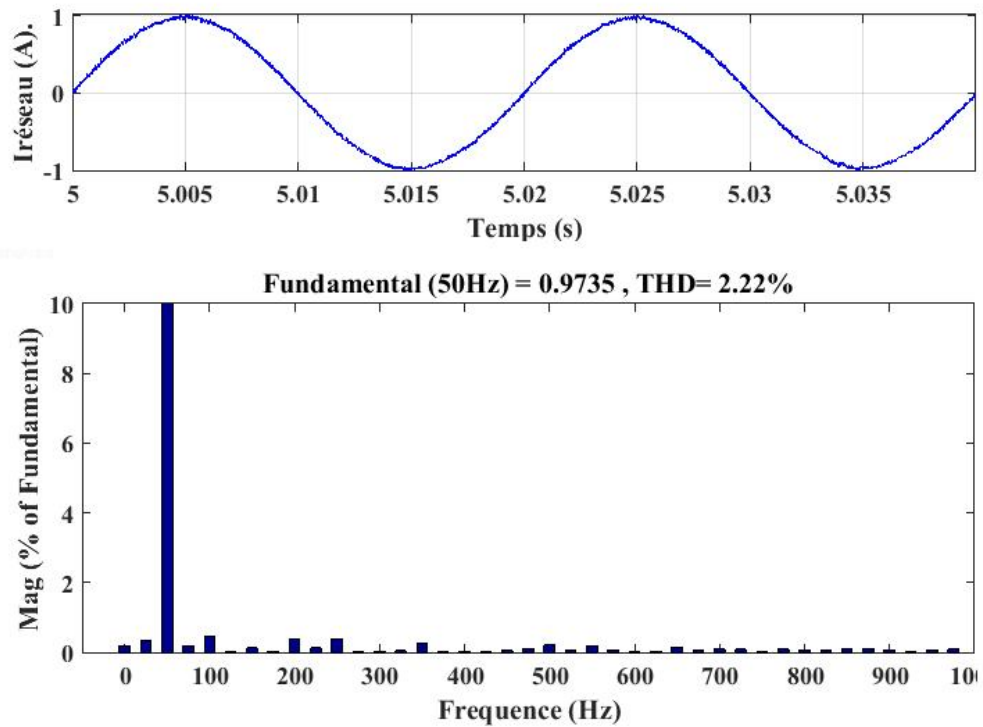


FIGURE 4.14 – Performance THD du courant de réseau en mode sollicitation du réseau électrique

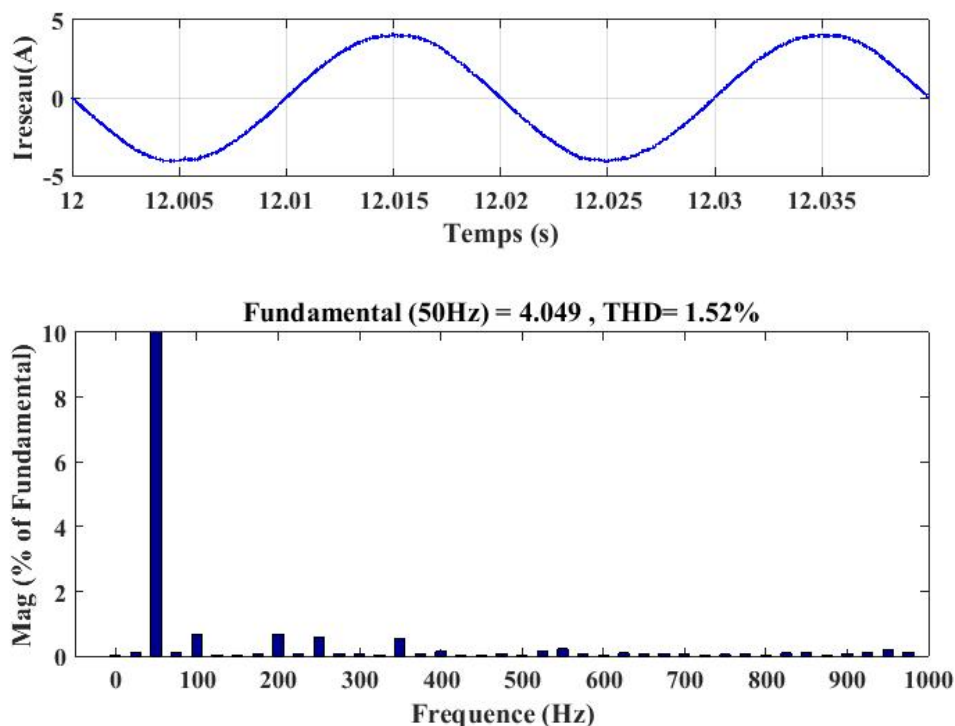
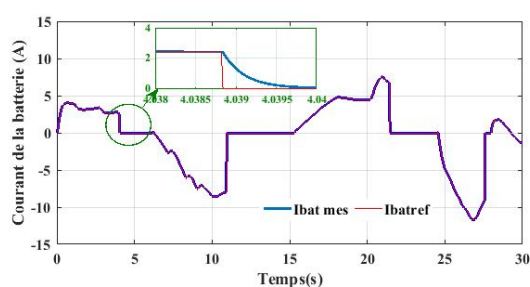
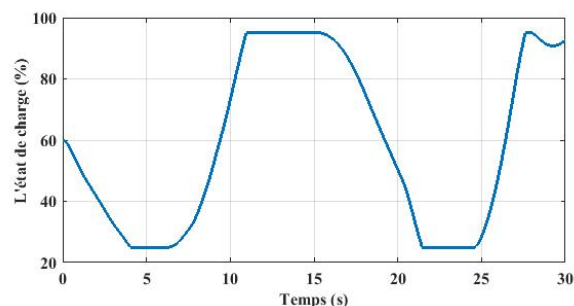


FIGURE 4.15 – Performance THD du courant de réseau en mode d'injection au réseau

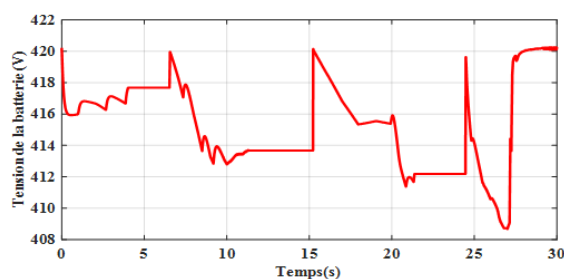
Le courant de la batterie varie en fonction de la variation de charge et des sources principales. La valeur négative du courant de la batterie représente le courant de charge tandis que la valeur positive représente le courant de décharge. De plus, le courant i_{bat} suit leur référence après un temps de réponse acceptable d'environ 0.001 seconds (voir figure 4.16a). On peut distinguer un bon suivi de consigne de courant et une rapidité notable, ce qui prouve l'efficacité de performance la commande prédictive en courant. On constate bien que les états de charge des sources d'appoint augmentent en cas de charge et diminuent en cas de décharge et ils sont compris entre les limites de seuils minimum et maximum ($25\% < SOC < 95\%$) pendant tout le temps de la simulation voir le (Figure 4.16b). La tension aux bornes de sortie de la batterie varie également avec le courant de charge et de décharge comme illustré à la Figure 4.16b.



(a) Courant de la batterie



(b) l'état de charge de la batterie



(c) tension de la batterie

FIGURE 4.16 – (a) Courant de la batterie ,(b) l'état de charge ,(c) la tension de la batterie

Une mesure de performance importante d'un système hybride est la tension du bus continu entre le côté sources et le convertisseur à deux niveaux côté réseau, Comme le montre la Figure 4.17, la tension du bus continu a été maintenue constante à la valeur spécifiée (700 V) et a rapidement atteint sa valeur souhaitée avec une bonne précision sans dépassement, malgré les petites perturbations qui sont causées par le changement des conditions de fonctionnement variables tout au long du temps, ce qui prouve l'efficacité du contrôleur flou proposé. Les résultats de la simulation montrent clairement que la commande par logique floue a une meilleure performance dynamique avec moins de temps de stabilisation et de dépassement.

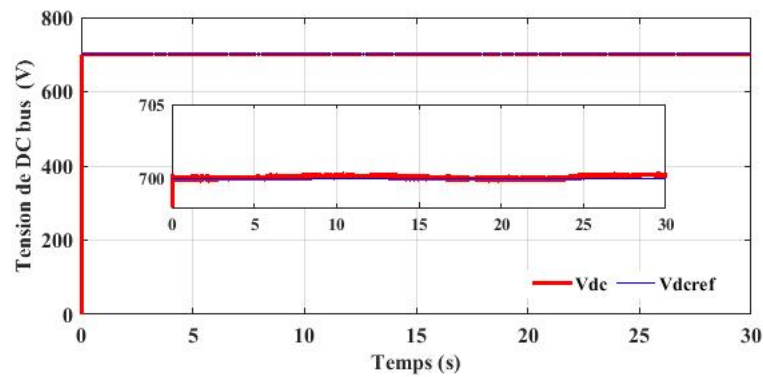


FIGURE 4.17 – la tension du bus DC.

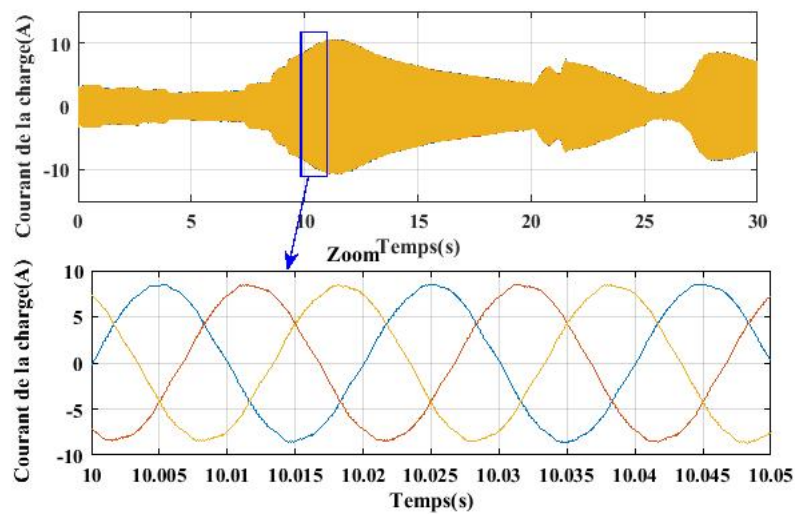


FIGURE 4.18 – Les Allures de Courants de la charge .

D'autre part, Les courants et les tensions triphasées instantanées consommées par la charge sont purement sinusoïdaux. Ce résultat montre l'efficacité du contrôle proposé au niveau de l'onduleur et une meilleure qualité de l'énergie fournie Figure 4.18 . ici, il est évident que l'onduleur contrôle la tension sinusoïdale et la bande de courant lors des changements de charge.

4.2.7 Résultats de simulation du générateur diesel

De 21.4 à 24.53 secondes, le générateur diesel peut fournir la puissance nécessaire 3.6 kW (50% de la puissance nominale) tout en maintenant la tension constante .

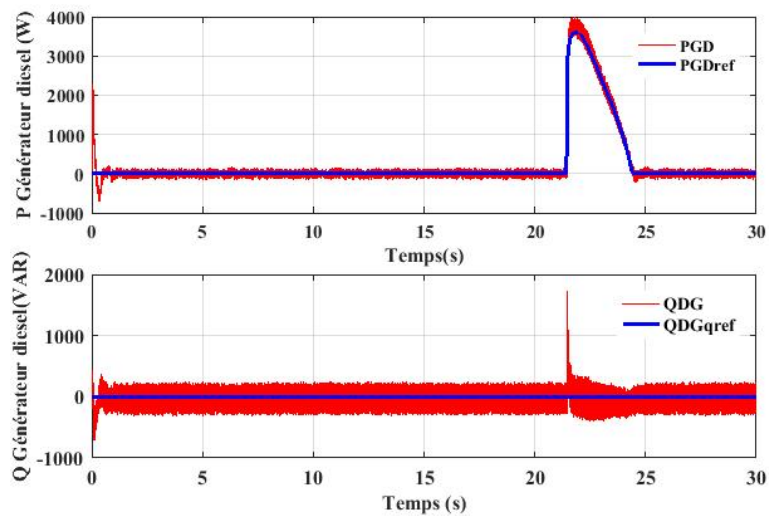


FIGURE 4.19 – la puissance active et réactive du générateur diesel .

A partir de la Figure 4.19 , on voit que le générateur diesel peut fournir une tension de sortie sinusoïdale et reprend sa valeur nominale après cinq secondes transitoires. De plus ,On peut remarquer que le courant réactif toujours après un bref état transitoire revient à zéro. La figure 4.20 présente les allures du courants direct et quadrature du générateur diesel .

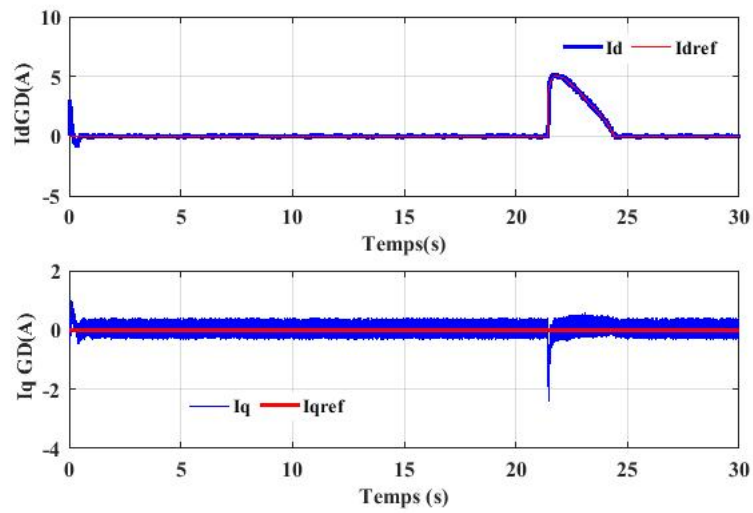


FIGURE 4.20 – Les courants directs et quadratures en fonction du temps du générateur diesel.

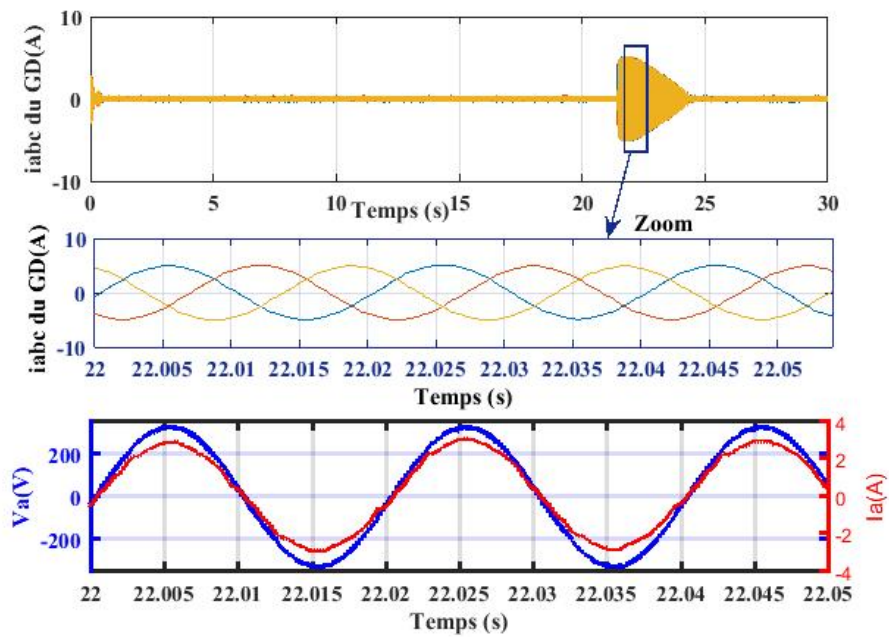


FIGURE 4.21 – Les Allures de courants de sortie du générateur diesel.

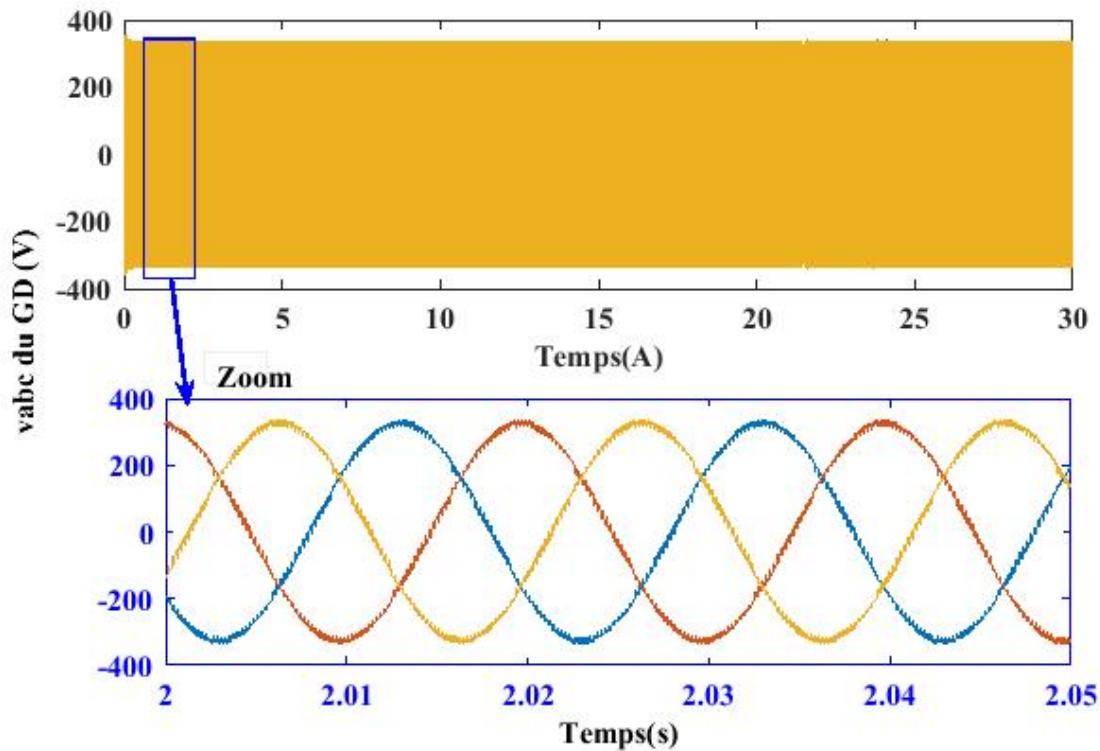


FIGURE 4.22 – Les tensions de sortie du générateur diesel.

4.2.8 Résultats de simulation du gestionnaire d'énergie basé sur le RNA

Comme première étape dans la construction du RNA, le programme hors ligne est résolu pour différents mode de fonctionnement du système hybride. La figure 4.23 représente les données d'entrée d'apprentissage du RN qui sont composées des vecteurs d'entrée : P_{pv} ; P_{eol} ; $P_{ch}(P_2, P_2, P_3, P_4)$; P_{dcref} ; SOC . Compte tenu de ces données d'entrée du RNA, la puissance de référence des batteries, la charge et du réseau électrique sont utilisées comme vecteur de sorties désiré [155].

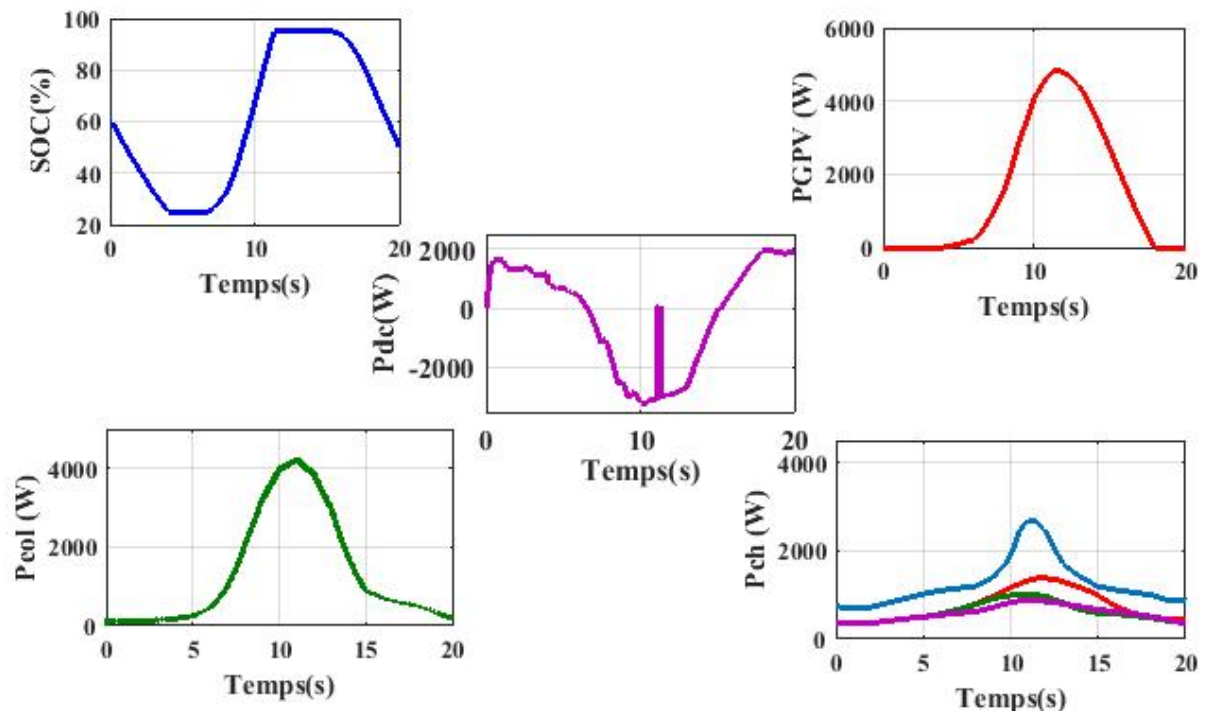


FIGURE 4.23 – Les entrées de l'apprentissage du RNA.

La figure 4.24 illustre l'interface graphique de l'outil de formation de réseau neurone (nn-traintool) affiché dans MATLAB Pendant l'apprentissage pour surveiller la progression d'apprentissage . La meilleure performance de validation s'est produite à l'époque 1000 avec une erreur quadratique moyenne (mse) de 0,01 a été utilisée pour la formation RNA.

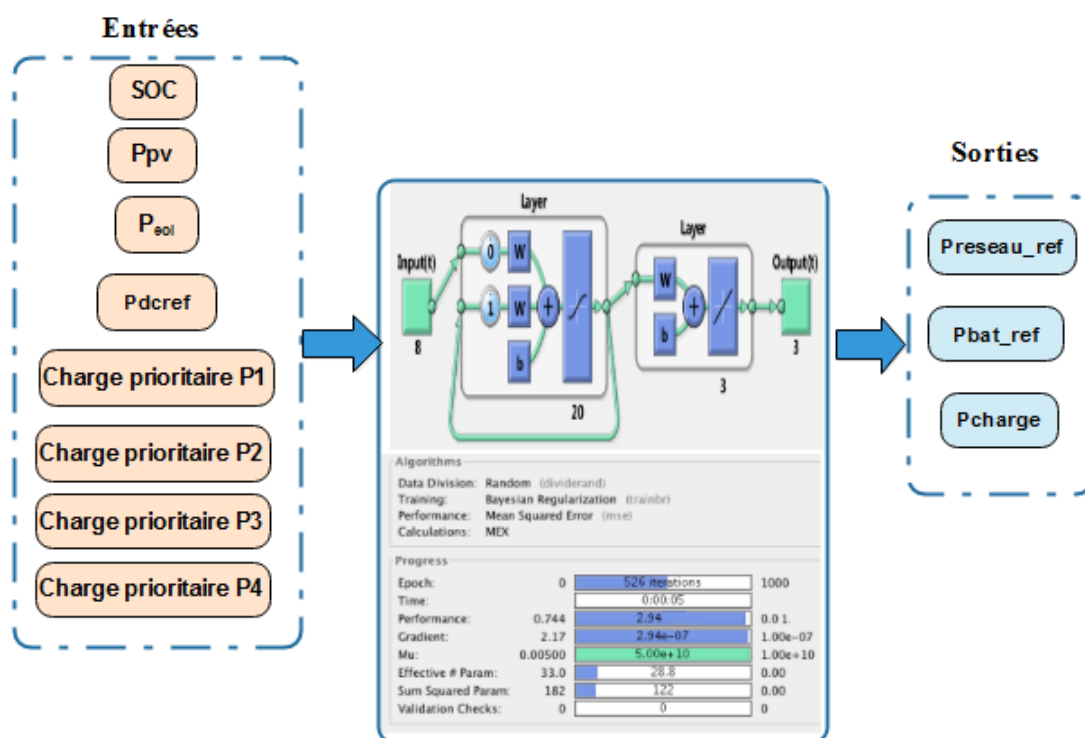


FIGURE 4.24 – L’outil d’apprentissage de réseau de neurones (ntraintool) dans MATLAB.

Le processus d’apprentissage est arrêté si :

1. s’il atteint le nombre maximum d’itérations 1000.
2. le performance a un niveau acceptable.
3. l’erreur d’estimation est inférieure à la cible.

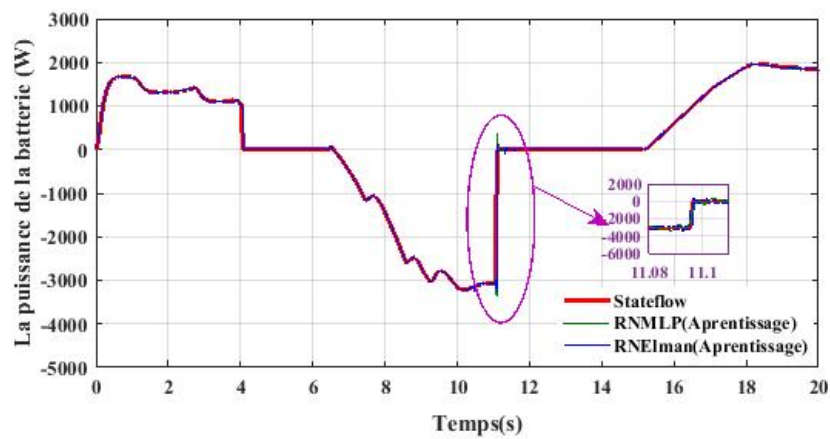
Pour évaluer les performances de chaque réseau dans tous les modes de fonctionnement du système hybride on utilise des exemples non appris dans la base d’apprentissage. Le profil de la charge demandée (*Pcharge*), l’état de charge (SOC), l’irradiation solaire et les profils de vitesse ont été modifiés. La figure 4.26 représente les résultats des trois sorties. Il est évident que le résultat Elman est le plus similaire à celui obtenu par la stratégie Stateflow à presque chaque pas de temps. Par rapport au réseau Elman, les sorties du modèle MLP proposé ne diffèrent que légèrement de l’optimisation Stateflow basée sur la cible d’optimisation. On peut conclure que notre ElmanNN proposé est le meilleur pour les applications en ligne par rapport au MLP. Comme le suggèrent les résultats, il existe une nette différence dans les performances de prédiction entre les deux modèles.

Chapitre 4. Résultats et discussion

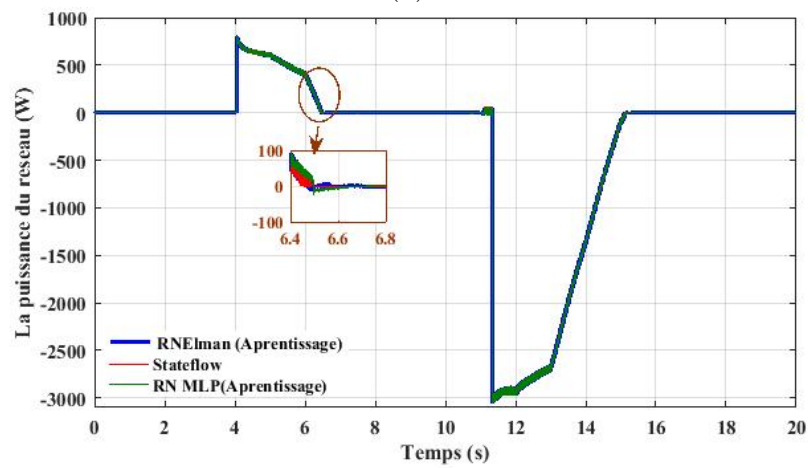
. Pour évaluer quantitativement la généralisation de différents modèles RNA, Les performances de prévision des deux modèles sont évaluées par RMSE et MAE. Dans le tableau 4.1. Nous pouvons voir que les résultats prédits de l'Elman NN proposé sont significativement meilleurs que ceux du MLP . Pour évaluer quantitativement la généralisation de différents modèles du RNA , les résultats des escomptes sont également présentés dans le tableau 4.1. Pour la puissance de référence du réseau, on observe que le modèle Elman a obtenu en apprentissage les erreurs MAE de 0.6867 et le $RMSE$ de 1.3574, tandis que MLP a obtenu le MAE de 1.2703 et le $RMSE$ de 3.1119 . ELMAN surpasse légèrement MLP, ce qui peut également être observé dans la prédiction en plusieurs étapes. Pour la puissance de batterie, l'MLP a obtenu le MAE de 1.0092 et le $RMSE$ de 9.0858. Le réseau Elman améliorerait les indices d'erreur à MAE de 0,6182 et $RMSE$ de 1,4024. Pour la puissance de charge, Elman a obtenu le MAE de 0.0062 et le $RMSE$ de 0.0100 , MLP a obtenu le MAE de 0.0958 et le $RMSE$ de 0.1391 Ce qui prouve sa bonne gestion et la fiabilité de la technique de supervision proposée,

TABLE 4.1 – Analyse statistique entre ENN et MLPNN

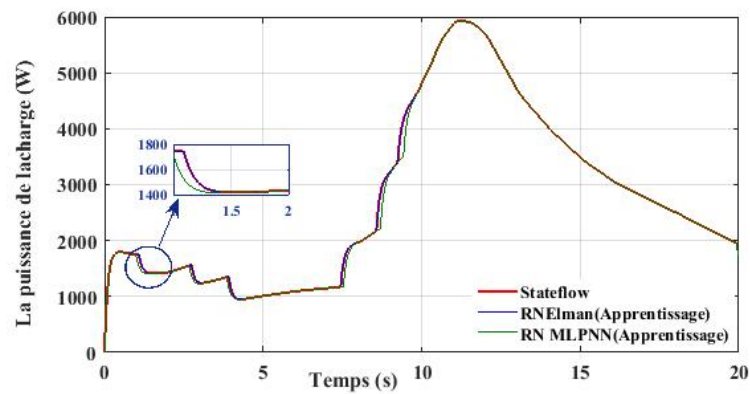
Phase	sortie	RMSE		MAE	
		RN Elman	RN MLP	RN Elman	RN MLP
Apprentissage	$Prés_{ref}$	1.3574	3.1119	0.6867	1.2703
	$Pbat_{ref}$	1.4024	9.0858	0.6182	1.0092
	Pcharge	0.0100	0.1391	0.0062	0.0958
Test	$Prés_{ref}$	20.885	39.7841	14.61	19.1684
	$Pbat_{ref}$	8.7493	28.1926	6.19	12.9464
	Pcharge	2.8486	13.3036	2.1927	9.5375



(a)



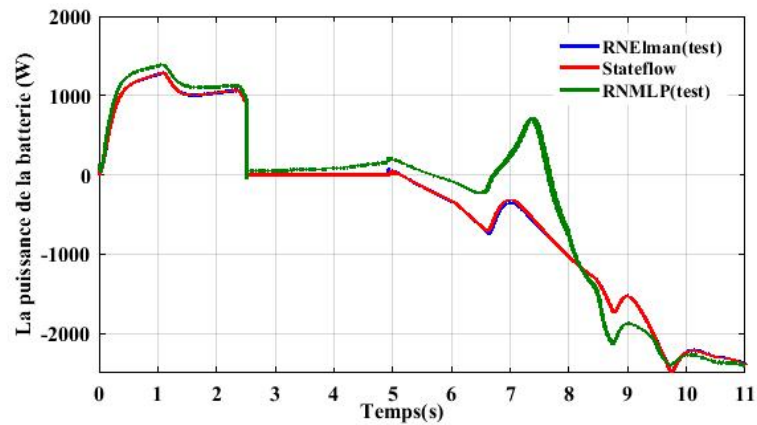
(b)



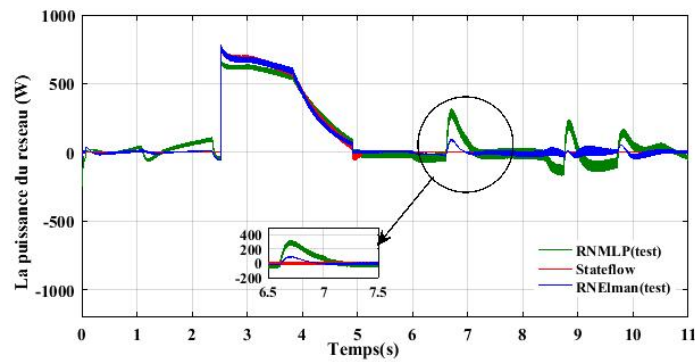
(c)

FIGURE 4.25 – les sorties de l'apprentissage

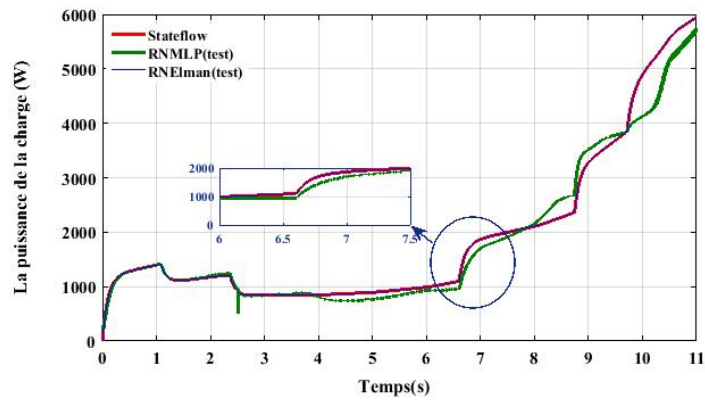
Chapitre 4. Résultats et discussion



(a)



(b)



(c)

FIGURE 4.26 – les sorties de test RNA

4.3 Conclusion

Ce chapitre, structuré en trois parties : Le chapitre a commencé par le résultat simulation numérique a permis de démontrer les performances de l'algorithme de gestion d'énergie Stateflow, qui supervise les différents modes d'opérations, ainsi que les flux énergétiques à travers les composants du système hybride. afin de former une base de données fiable pour l'apprentissage de deux types des réseaux de neurones. La deuxième partie La dernière partie du chapitre décrit la mise en place du système multisources que les puissances désiré ($P_{res_{ref}}$, $P_{bat_{ref}}$, P_{charge}) coïncident avec les profils de puissance prédits.

Les principaux points de ce chapitre peuvent être résumés comme suit : Premièrement, la stratégie de gestion de l'énergie basée sur Stateflow offre les fonctionnalités de modélisation les plus avancées pour les stratégies de gestion de l'énergie afin d'obtenir un écoulement souple du flux d'énergie pendant différents modes de fonctionnement. Deuxièmement, la stabilité de la tension du bus DC et la haute qualité du contrôle de la puissance active et réactive avec un bon découplage, une réduction du dépassement, un bon suivi et une précision ont été obtenus à l'aide d'un contrôleur à logique floue. De plus, le contrôleur prédictif a un suivi de référence approprié et une réponse dynamique rapide pendant les modes de charge, de décharge et d'inactivité. le suivi du point de puissance maximale a été réalisé à l'aide d'un contrôleur de mode glissant pour extraire la puissance maximale disponible de l'éolienne sous différentes vitesses de vent. apporte de meilleures performances et de robustesse par rapport au régulateur classique. Enfin, l'efficacité l'algorithme MPPT utilisé, ainsi que la technique de limitation de puissance PV proposée. vue sa simplicité et ces bonnes performances. De plus, la stratégie suggérée a montré un niveau élevé de précision prédictive dans la puissance prédite par rapport au MLP en termes d'erreur absolue moyenne et de mesures de performance de l'erreur quadratique moyenne. En résumé, les résultats ont indiqué que le contrôleur ENN proposé est approprié pour la gestion de l'alimentation en ligne Avec une grande précision. Les résultats de la simulation avec MATLAB Simulink démontrent la performance des trois stratégies de contrôle des micro-réseaux proposées (PI, contrôle prédictif

Chapitre 4. Résultats et discussion

et logique floue). Les résultats de la comparaison ont confirmé la viabilité et l'efficacité de la technique proposée pour la gestion de l'énergie basée sur le réseau de neurone ELMAN.

*"Le succès appartient à ceux
qui croient au pouvoir de
leurs idées."*

Michael Irwin

Conclusion générale et Perspectives

Conclusion générale

Les micro-réseaux font actuellement l'objet d'une grande attention et sont considérés comme la tendance future des systèmes de distribution d'énergie. Dans un micro-réseau, il est nécessaire de maintenir l'équilibre énergétique pour la stabilité en raison de la génération incertaine de sources d'énergie renouvelables. La fiabilité des systèmes d'énergie renouvelable est une tâche importante en raison de l'inadéquation entre l'offre et la demande d'énergie. Les systèmes de stockage d'énergie sont une partie importante du micro-réseau car ils permettent une meilleure utilisation des SER. Cependant, compte tenu de la variabilité des sources renouvelables et de la complexité du calcul de la disponibilité des ressources renouvelables et de la gestion de l'énergie, il n'est pas facile d'intégrer des modèles efficaces de gestion de l'énergie dans un micro-réseau. Un système de gestion de l'énergie dans un micro-réseau est défini comme un système de contrôle qui offre des fonctionnalités essentielles, qui garantissent que les systèmes de distribution et de production fournissent de l'électricité à des coûts d'exploitation minimaux. Le système de gestion de l'énergie joue un rôle important dans l'augmentation de la fiabilité et de l'efficacité d'un micro-réseau.

Contributions

L'objectif principal de ce travail est de concevoir un système de gestion de l'énergie intelligent pour maintenir la durabilité énergétique dans les systèmes d'énergies renouvelables. Le système d'énergie hybride constitué d'un générateur photovoltaïque, d'une éolienne et d'un générateur diesel, avec un système de stockage des batteries destiné à fonctionner en mode connecté au réseau ou site isolé. En premier lieu, nous avons exposé d'une façon plus détaillée les principaux composants de notre SEH, ensuite, nous avons présenté les différentes typologies et les architectures de supervision de systèmes hybrides. Enfin, nous avons donné une classification des différentes stratégies de gestion de l'énergie et nous avons présenté un bref état de l'art sur les stratégies de gestion énergétique d'un micro réseau. La deuxième Chapitre a été consacré à la modélisation de chaque sous système du SEH étudié avec le réseau électrique. La modélisation du générateur photovoltaïque a été commencée par la présentation du modèle de la cellule, ensuite, nous avons présenté la méthode de connexion des cellules pour réaliser un panneau puis un générateur PV. Puis, nous avons détaillé La modélisation du système éolien en tenant compte de ses trois éléments, la turbine éolienne, la transmission mécanique et la machine synchrone à aimant permanent. La troisième partie de ce chapitre a été entamée par la modélisation de la batterie. Concernant le générateur diesel, il a été modélisé en tenant compte de ses deux éléments, une turbine diesel entraînant une génératrice synchrone. la dernière partie de ce chapitre a été consacré par la modélisation des convertisseurs de puissance utilisés dans la chaîne de conversion. Le troisième chapitre est consacré au développement des deux algorithmes de gestion deux stratégies de gestion d'énergie ont été développées pour maintenir l'équilibre entre la production et la consommation d'énergie : la première stratégie est basée sur la théorie des machines à états finis (Stateflow), et la deuxième stratégie est inspirée de l'intelligence artificielle (Les réseaux de neurones artificiels). l'évaluation de ces algorithmes de gestion a été faite par leurs application sur deux SEHs, l'un était connecté au réseau et l'autre à une charge isolée. les stratégies de gestion d'énergie proposées permettent de :

Conclusion

- Assurer la demande de la charge sans interruption
- Minimiser l' utilisation du système de stockage .
- Protéger les batteries contre les charges excessives et les décharges profondes.
- Brancher et débrancher automatiquement le réseau électrique et le générateur diesel selon le mode de fonctionnement.

Ce chapitre est composé principalement de deux partie : Dans la première partie nous avons présenté quelques notions de bases nécessaires à la compréhension des Stateflow et RNAs. A la fin, une étude détaillée de l'architecture et de ses deux principales méthodes d'apprentissage a été présentée.

Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous avons détaillé les techniques de commande pour les différents constituants du système pour mieux maîtriser les interactions entre les différentes sources du système proposé.

Les techniques de commande a été développé qui permettent le générateur photovoltaïque de fonctionner, soit en mode de puissance maximale, soit en mode de puissance . Un algorithme d'optimisation du fonctionnement de la turbine a été faite avec la stratégie de rapport optimal de vitesse (TSR). Le processus de la charge/décharge de la batterie est contrôlé à travers un hacheur réversible en courant, ce dernier est commandé par un régulateur predictive La présence du réseau électrique exige d'étudier leur synchronisation. Cette dernière est assurée par un contrôle la commande par tension orientée VOC. Pour valider l'algorithme Elman , des tests de simulation ont été menés. Afin d'évaluer les performances de la commande, nous avons comparé les résultats obtenus par les deux structures de réseaux de neurones proposées et le stratégie Stateflow.

les principaux résultats

Les principaux résultats de cette thèse peuvent être résumés comme suit :

- Affirmer les bonnes performances de la stratégie suivie pour la commande du système éolien global turbine-GSAP.De plus, Un bon suivi de la vitesse de référence est obtenu par la stratégie de commande par mode glissant.

Conclusion

- Montrent que la loi de commande développée basée sur un contrôleur à logique floue permet d'obtenir un bon découplage, un contrôle de puissance ,et des formes d'ondes sinusoïdales avec des THDs insignifiants et des temps de réponse faibles ont été obtenus.
- La commande prédictive a prouvé des performances notables lors des changements des modes d'opération. Les résultats obtenus ont montré la capacité de ce système à répondre aux besoins énergétiques de la charge en contrôlant l'intensité du courant délivré et absorbé par les batteries
- Finalement, Les deux superviseurs proposés ont prouvé une efficacité notable, et une robustesse vis-à-vis de la variation de la charge, par la permutation souple entre les différents modes de fonctionnement. de plus , Les résultats ont démontré que le superviseur Elman avait une erreur statistique minimale (RMSE et MAE) par rapport au superviseur MLP.

Perspectives

Le présent travail est loin d'être achevé. Sur la base du travail réalisé, plusieurs points très intéressants peuvent être, entres autres envisagés :

- Développement de nouvelles techniques de gestion basées sur un hybridation entre l'intelligence artificielle et les méthodes métaheuristiques pour la résolution de certains problèmes rencontrés dans les systèmes hybrides à énergie renouvelables
- Effectué les simulations du système avec le modèle réel de chaque convertisseur pour se rapprocher plus du comportement réel du système.
- Valider les résultats de simulation par un banc d'essais

*"Celui qui apprend un peu,
croit savoir beaucoup. Celui
qui apprend beaucoup, prend
conscience qu'il sait si peu de
chose"*

Jay Shetty



PARAMÈTRES DES SOURCES DU SEH

A.1 Paramètres du générateur PV

- Paramètres du panneau photovoltaïque Les paramètres du panneau utilisé sont donnés dans le tableau [A.1](#) :

Annexe A. PARAMÈTRES DES SOURCES DU SEH

TABLE A.1 – Paramètres du panneau utilisé au STC : Température = $25^{\circ}C$ et Irradiance = $1000W/m^2$

Paramètre	Valeur
Puissance Maximale ($PMMP$)	160W
Tension au point de puissance maximale ($VMMP$)	36V
Courant au point de puissance maximale ($IMMP$)	5A
Tension de circuit ouvert (VOC)	45V
Courant de court-circuit (ISC)	5.5A
Nombre de cellule	60

- **Paramètre du générateur photovoltaïque :** Les paramètres du générateur PV utilisé dans la simulation du système d'énergie hybride sont donnés dans le tableau [A.2](#) :

TABLE A.2 – Paramètres du générateur PV utilisé au STC : Température = $25^{\circ}C$ et Irradiance = $1000W/m^2$

Paramètre	Valeur
Nombre du panneau en série	14
Nombre du panneau en parallèle	2
Puissance Maximale ($PMMP$)	160W
Tension au point de puissance maximale ($VMMP$)	36V
Courant au point de puissance maximale ($IMMP$)	5A
Tension de circuit ouvert (VOC)	45V
Courant de court-circuit (ISC)	5.5A

A.2 Paramètres de l'aérogénérateur

Les paramètres de la machine synchrone à aimant permanent et la turbine éolienne utilisé sont donnés dans le tableau [A.3](#)

Annexe A. PARAMÈTRES DES SOURCES DU SEH

TABLE A.3 – Paramètre de la chaîne éolienne

Paramètres de la turbine éolienne	
Paramètre	Valeur
Rayon des pales (R)	2
Rapport de multiplication (G)	2
Densité de l'air (ρ)	1.25 (kg/m^2)

Paramètres de machine synchrone à aimant permanent GSAP	
Paramètre	Valeur
Résistance statorique (R_s)	0.895(Ω)
Inductance directe (L_d)	0.012 (H)
Inductance directe (L_d)	0.0211 (H)
Nombre de paires de pôle (P)	3
Le flux (φ_f)	0.9 (Wb)
Inertie du générateur (J)	0.00141 ($kg.m^2$)
Coefficient de frottement visqueux (f)	0.001 (N.m.s/rad)

A.3 Paramètres du système de stockage d'énergie

Les paramètres du système de stockage (batterie) utilisé sont donnés dans le tableau [A.4](#)

TABLE A.4 – Paramètres de la batterie plomb-acide

Paramètre	Valeur
La tension	420 V
La capacité	200Ah
Résistance interne	0.02 Ω
Nombres de cellules	210

A.4 Paramètre du générateur diesel

Les paramètres de la machine synchrone et la turbine diesel sont donnés dans le tableau [A.5](#)

Annexe A. PARAMÈTRES DES SOURCES DU SEH

TABLE A.5 – Paramètres de générateur diesel

Paramètres de la turbine diesel	
Paramètre	Valeur
Constante de temps de la turbine	50ms
Retard entre explosion	20ms
Coefficient de friction	0.005 pu

Paramètres de machine synchrone	
Paramètre	Valeur
Puissance nominale (P_n)	8.1 (kVA)
Vitesse nominale (N)	1500 (tr/min)
Tension nominale (U_N)	400 (V)
Résistance statorique (R_s)	1.62 (Ω)
Inductance de fuite statorique (Ll)	0.004527 (H)
Réactance de magnétisation d'axe d (Lmd)	0.1086 (H)
Réactance de magnétisation d'axe q (Lmq)	0.05175 (H)
Résistance de champ (Rf)	1.208 (Ω)
Inductance de champ (Lf)	0.01132 (H)
Résistance d'amortisseur d'axe D (RD)	3.142 (Ω)
Inductance d'amortisseur d'axe D (LD)	0.007339 (H)
Résistance d'amortisseur d'axe Q (RQ)	4.772 (Ω)
Inductance d'amortisseur d'axe Q (LQ)	0.01015 (H)
Nombre de paires de poles (p)	2

A.5 Paramètres du système d'énergie hybride

TABLE A.6 – Paramètres du SEH

Paramètres du réseau	
Paramètre	Valeur
Fréquence	50 Hz
Tension AC	(RMS) 230 V
la fréquence de coupure	20 KHz
Inductance du filtre L_f	0.04H
Résistance du filtre R_f	0,4 Ω
Paramètres du bus continue	
Paramètre	Valeur
Tension du bus DC	700 V
du bus DC	2000 μ F
Paramètres des régulateurs de courant	
Paramètre	Valeur
Kpi	2
Kii	200
Paramètres des régulateurs de puissance	
Paramètre	Valeur
Kpp	1
Kip	100

"Le succès n'est pas un hasard. C'est le travail acharné, la persévérance, l'apprentissage, l'étude, le sacrifice et surtout, l'amour de ce que vous faites ou apprenez à faire."

Pele

B

B.1 MÉTHODE DE CONCEPTION DE FILTRE LC

Le filtre LC est un filtre de second ordre qui diminue les composantes harmoniques à la tension de sortie de l'onduleur. Le filtre LC illustré est utilisé à la fois dans les systèmes électriques connectés au réseau et hors réseau. La fréquence de résonance de ce type de filtre varie avec la grille incluant les valeurs, ce qui est un inconvénient important. En conséquence, son filtre LC d'exportation doit être construit de manière à réduire les harmoniques de l'onduleur tout en garantissant qu'une énergie propre est fournie au réseau. Les paramètres de filtre L_f et C_f sont calculés en utilisant les équations 3.32 et 3.33 pour fournir les valeurs de courant et de tension d'ondulation d'inductance, respectivement.

$$\Delta_{iL}(max) = \frac{V_{dc}}{8.f_c.L_f} \quad (B.1)$$

Avec V_{dc} est la tension du bus DC, I_{ref} est le courant maximum de référence, f_c est la fréquence de commutation, $\Delta_{iL}(max)$ est le taux d'ondulation du courant coté onduleur, qui est généralement inférieur de 15 à 20% du courant nominal du filtre LC. La valeur de l'inductance du filtre peut être calculée à partir de B.1. En négligeant les résistances parasites, la fréquence de résonance du filtre est définie comme suit :

$$f_{res} = \frac{2}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} \quad (B.2)$$

Selon les exigences de bande passante du filtre et de stabilité du système, et afin d'éviter une suramplification des signaux basse fréquence, Comme expliqué par La valeur de C_f est donnée par :

$$C_f = \frac{1}{4.\pi^2.f_c^2.L_f} \quad (B.3)$$

Annexe B.

les harmoniques dominants à la sortie de l'onduleur triphasé sont 7 et 11. Pour cette raison, la fréquence de résonance est conçue en tenant compte du critère suivant :

$$10f_1 \leq f_r \leq f_s/10 \quad (\text{B.4})$$

où f_1 est la fréquence fondamentale et f_s est la fréquence de commutation. La fréquence de résonance du filtre est choisie entre dix fois la fréquence de ligne f_1 et un dixième de la fréquence de commutation f_s ;

Bibliographie

- [1] Hui HU et al. « The role of renewable energy consumption and commercial services trade in carbon dioxide reduction: Evidence from 25 developing countries ». In : *Applied energy* 211 (2018), p. 1229-1244.
- [2] Akhtar HUSSAIN, Van-Hai BUI et Hak-Man KIM. « Microgrids as a resilience resource and strategies used by microgrids for enhancing resilience ». In : *Applied energy* 240 (2019), p. 56-72.
- [3] Hassan FARHANGI. « The path of the smart grid ». In : *IEEE power and energy magazine* 8.1 (2009), p. 18-28.
- [4] FJ VIVAS et al. « A review of energy management strategies for renewable hybrid energy systems with hydrogen backup ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82 (2018), p. 126-155.
- [5] Xiaofeng SUN et al. « A Hybrid renewable DC microgrid voltage control ». In : *2009 IEEE 6th international power electronics and motion control conference*. IEEE. 2009, p. 725-729.
- [6] F SEGURA, E DURÁN et JM ANDÚJAR. « Design, building and testing of a stand alone fuel cell hybrid system ». In : *Journal of Power Sources* 193.1 (2009), p. 276-284.
- [7] Iker Diaz de CERIO MENDAZA et al. « Optimal sizing and placement of power-to-gas systems in future active distribution networks ». In : *2015 IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia (ISGT ASIA)*. IEEE. 2015, p. 1-6.
- [8] Xiao LI, Xiaohong JIAO et Luhao WANG. « Coordinated power control of wind-PV-fuel cell for hybrid distributed generation systems ». In : *The SICE Annual Conference 2013*. IEEE. 2013, p. 150-155.
- [9] Rodolfo DUFO-LOPEZ, José L BERNAL-AGUSTIN et Javier CONTRERAS. « Optimization of control strategies for stand-alone renewable energy systems with hydrogen storage ». In : *Renewable energy* 32.7 (2007), p. 1102-1126.
- [10] Bilal GÜMÜŞ. « Integration of Renewable Energy Sources to Power Networks and Smart Grids ». In : *Renewable Energy Based Solutions*. Springer, 2022, p. 81-103.
- [11] Yahia AMOURA. « Optimal energy management of a microgrid system ». Thèse de doct. 2021.

Bibliographie

- [12] Ramzi SAIDI. « Développement d'un outil de dimensionnement et de gestion énergétique optimisés de systèmes multisources.: application à une installation de production électrique autonome ». Thèse de doct. Nantes, 2019.
- [13] Aurélie CHABAUD. « Micro-réseau intelligent pour la gestion des ressources énergétiques ». In : *Automatique/Robotique, Université de Perpignan Via Domitia* 68 (2014).
- [14] Ionel VECHIU. « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome ». Thèse de doct. Université du Havre, 2005.
- [15] Jihane KARTITE et Mohamed CHERKAOUI. « Study of the different structures of hybrid systems in renewable energies: A review ». In : *Energy Procedia* 157 (2019), p. 323-330.
- [16] Amrutha Raju BATTULA, Sandeep VUDDANTI, Surender Reddy SALKUTI et al. « Review of Energy Management System Approaches in Microgrids ». In : *Energies* 14.17 (2021), p. 1-32.
- [17] Chaima GHANJATI. « Contrôle de puissance et optimisation des flux d'énergie au sein des systèmes multi-sources à énergies renouvelables ». Thèse de doct. Université de Poitiers; École nationale d'ingénieurs de Tunis (Tunisie), 2021.
- [18] Kyung-Min KANG et al. « Energy management method of hybrid AC/DC microgrid using artificial neural network ». In : *Electronics* 10.16 (2021), p. 1939.
- [19] Madiha MAAMIR. « Techniques de supervision d'énergie d'un système d'entraînement Electrique hybride ». Thèse de doct. Université Mohamed Khider-Biskra, 2020.
- [20] Sarat Chandra VEGUNTA et al. « AC Microgrid Protection System Design Challenges—A Practical Experience ». In : *Energies* 14.7 (2021), p. 2016.
- [21] Mehdi DHIFLI et al. « Enhanced Intelligent Energy Management System for a Renewable Energy-Based AC Microgrid ». In : *Energies* 13.12 (2020), p. 3268.
- [22] Bouthaina MADACI, Rachid CHENNI et Kamel Eddine HEMSAS. « Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multisystèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs. » Thèse de doct. Université Frères Mentouri, 2018.
- [23] Fatima BOU TLILIS. « Modélisation et simulation des sources de production décentralisée Application à l'intégration d'un générateur PV à stockage dans un réseau électrique ». Thèse de doct. Thèse de Doctorat EN GENIE ELECTRIQUE, Université Abdelhamid Ibn Badis de . . . , 2018.
- [24] Yann PANKOW. « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque ». In : *National School Superior of Art and Trades, Lille* (2004).
- [25] Mohamed BENCHERIF. « Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension ». Thèse de doct. Université de Tlemcen-Abou Bekr Belkaid, 2014.

Bibliographie

- [26] Naima RAHOUA. « Contribution aux Contrôles des Générateurs Synchrones à Aimants Permanents ». Thèse de doct. Université Mohamed Khider–Biskra, 2021.
- [27] Darya Khan BHUTTO et al. « Wind energy conversion systems (WECS) generators: A review ». In : *2019 2nd International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*. IEEE. 2019, p. 1-6.
- [28] Miguel LOPEZ. « Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée ». Thèse de doct. Université Paris Sud-Paris XI, 2008.
- [29] Abdelkader BERHAIL. « Commande d'une éolienne à base de GSAP connectée au réseau électrique par convertisseur multiniveaux ». Thèse de doct. Université du Québec à Trois-Rivières, 2020.
- [30] Bin WU et al. *Power conversion and control of wind energy systems*. John Wiley & Sons, 2011.
- [31] Sourav GHOSH, Pradip Kumar SAHA et Gautam Kumar PANDA. « Wind Energy Conversion System Connected With Grid Using Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) ». In : *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering* 4.1 (2015).
- [32] Louar FATEH et al. « Modeling and control of a permanent magnet synchronous generator dedicated to standalone wind energy conversion system ». In : *Frontiers in Energy* 10.2 (2016), p. 155-163.
- [33] Imane IDRISSE. « Contribution au Diagnostic des Défauts de la Machine Asynchrone Doublement Alimentée de l'Eolienne à Vitesse Variable. » Thèse de doct. Normandie Université; Université Sidi Mohamed ben Abdellah (Fès, Maroc), 2019.
- [34] Salih Mohammed SALIH, Mohammed Qasim TAHA et Mohammed K ALAWSAJ. « Performance analysis of wind turbine systems under different parameters effect ». In : *International Journal of Energy and Environment* 3.6 (2012), p. 895-904.
- [35] M TAZIL et al. « Three-phase doubly fed induction generators: an overview ». In : *IET Electric Power Applications* 4.2 (2010), p. 75-89.
- [36] Dawit SEYOUM et Muhammed Fazlur RAHMAN. « The dynamic characteristics of an isolated self-excited induction generator driven by a wind turbine ». In : *Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No. 02CH37344)*. T. 2. IEEE. 2002, p. 731-738.
- [37] Syed Naime MOHAMMAD, Nipu Kumar DAS et Saikat ROY. « A review of the state of the art of generators and power electronics for wind energy conversion systems ». In : *2014 3rd International Conference on the Developments in Renewable Energy Technology (ICDRET)*. IEEE. 2014, p. 1-6.
- [38] Lila CROCI. « Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs ». Thèse de doct. Université de Poitiers, 2013.

Bibliographie

- [39] Mohammad FAISAL et al. « Review of energy storage system technologies in micro-grid applications: Issues and challenges ». In : *Ieee Access* 6 (2018), p. 35143-35164.
- [40] Sergio VAZQUEZ et al. « Energy storage systems for transport and grid applications ». In : *IEEE Transactions on industrial electronics* 57.12 (2010), p. 3881-3895.
- [41] Omid PALIZBAN et Kimmo KAUHANIEMI. « Energy storage systems in modern grids—Matrix of technologies and applications ». In : *Journal of Energy Storage* 6 (2016), p. 248-259.
- [42] Rui XIONG, Quanqing YU, Cheng LIN et al. « A novel method to obtain the open circuit voltage for the state of charge of lithium ion batteries in electric vehicles by using H infinity filter ». In : *Applied energy* 207 (2017), p. 346-353.
- [43] Raisa DIAS BARBOSA. « Modélisation d'un générateur diesel avec stator rotatif ». Thèse de doct. Université du Québec à Rimouski, 2021.
- [44] Tommy Andy Theubou TAMEGHE. *Modélisation et simulation d'un système de jumelage éolien-diesel alimentant une charge locale*. Université du Québec en Abitibi-Temiscamingue (Canada), 2012.
- [45] Abdellatif ELMOUATAMID et al. « Review of control and energy management approaches in micro-grid systems ». In : *Energies* 14.1 (2020), p. 168.
- [46] MH NEHRIR et al. « A review of hybrid renewable/alternative energy systems for electric power generation: Configurations, control, and applications ». In : *IEEE transactions on sustainable energy* 2.4 (2011), p. 392-403.
- [47] Anurag CHAUHAN et RP SAINI. « A review on Integrated Renewable Energy System based power generation for stand-alone applications: Configurations, storage options, sizing methodologies and control ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38 (2014), p. 99-120.
- [48] Hee-Sang KO et Juri JATSKEVICH. « Power quality control of wind-hybrid power generation system using fuzzy-LQR controller ». In : *IEEE Transactions on energy conversion* 22.2 (2007), p. 516-527.
- [49] Dhaker ABBES. « Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome ». In : *Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs-Poitiers* (2012).
- [50] Norat Mal SWARNKAR et Lata GIDWANI. « Analysis of hybrid energy system for supply residential electrical load by HOMER and RETScreen: A case in Rajasthan, India ». In : *2016 International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering (ICRAIE)*. IEEE. 2016, p. 1-6.
- [51] Samia SAIB. « Contribution à l'optimisation d'un système hybride (PV/éolien) avec stockage d'énergie connecté au réseau électrique ». Thèse de doct. 2018.
- [52] Hemani PALIWAL et Vikramaditya DAVE. « TOOLS AND TECHNIQUES FOR OPTIMIZATION OF HYBRID RENEWABLE ENERGY SOURCES: A REVIEW ». In : *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara* 19.4 (2021), p. 85-97.

Bibliographie

- [53] JF MANWELL et al. « Hybrid2—a hybrid system simulation model—theory manual ». In : *Renewable Energy Research Laboratory, University of Massachusetts* (2006).
- [54] T NACER, O NADJEMI et A HAMIDAT. « Optimal sizing method for grid connected renewable energy system under Algerian climate ». In : *IREC2015 The Sixth International Renewable Energy Congress*. IEEE. 2015, p. 1-5.
- [55] Daljeet KAUR et PS CHEEMA. « Software tools for analyzing the hybrid renewable energy sources:-a review ». In : *2017 International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)*. IEEE. 2017, p. 1-4.
- [56] Saif JAMAL, Nadia ML TAN et Jagadeesh PASUPULETI. « A Review of Energy Management and Power Management Systems for Microgrid and Nanogrid Applications ». In : *Sustainability* 13.18 (2021), p. 10331.
- [57] João FARIA et al. « Power management control strategy based on artificial neural networks for standalone PV applications with a hybrid energy storage system ». In : *Energies* 12.5 (2019), p. 902.
- [58] Loïc JOUD. « Stratégie intelligente de gestion du système énergétique global d'un véhicule hybride ». Thèse de doct. Bourgogne Franche-Comté, 2018.
- [59] Okba KRAA, Sassia BOUALEM et Mostefa KERMADI. « Flow-Chart Power Management for Grid-Connected Hybrid System ». In : *Electrotehnica, Electronica, Automatica* 71.1 (2023), p. 75-82.
- [60] MMG LAWAN et al. « Power control for decentralized energy production system based on the renewable energies—using battery to compensate the wind/load/PV power fluctuations ». In : *2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*. IEEE. 2017, p. 1132-1138.
- [61] Chaïma MAHJOUBI. « Modélisation multi-physique et gestion d'énergie d'un micro-réseau résidentiel ». Thèse de doct. Nantes, 2019.
- [62] Madiha MAAMIR et al. « Neural network power management for hybrid electric elevator application ». In : *Mathematics and Computers in Simulation* 167 (2020), p. 155-175.
- [63] Safa SLOUMA et al. « Frequency separation model based on infinite-impulse response filter applied to hybrid power generation intended for residential sector ». In : *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)* 9.1 (2019), p. 118-127.
- [64] Aftab Ahmad KHAN et al. « A compendium of optimization objectives, constraints, tools and algorithms for energy management in microgrids ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58 (2016), p. 1664-1683.
- [65] Yimy E GARCIA VERA, Rodolfo DUFO-LÓPEZ et José L BERNAL-AGUSTIN. « Energy management in microgrids with renewable energy sources: A literature review ». In : *Applied Sciences* 9.18 (2019), p. 3854.

Bibliographie

- [66] Y Jaganmohan REDDY et al. « Distributed ANNs in a layered architecture for energy management and maintenance scheduling of renewable energy HPS microgrids ». In : *2012 International Conference on Advances in Power Conversion and Energy Technologies (APCET)*. IEEE. 2012, p. 1-6.
- [67] O CHARROUF et al. « Artificial Neural Network power manager for hybrid PV-wind desalination system ». In : *Mathematics and Computers in Simulation* 167 (2020), p. 443-460.
- [68] Diego ARCOS-AVILES et al. « Energy management strategy for a grid-tied residential microgrid based on Fuzzy Logic and power forecasting ». In : *IECON 2016-42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE. 2016, p. 4103-4108.
- [69] Messaoud MOHAMMEDI. « Gestion de l'énergie pour une chaine multi-sources ». Thèse de doct. Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.
- [70] Piyali GANGULY, Akhtar KALAM et Aladin ZAYEGH. « Fuzzy logic-based energy management system of stand-alone renewable energy system for a remote area power system ». In : *Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering* 16.1 (2019), p. 21-32.
- [71] Wei DONG et al. « Adaptive optimal fuzzy logic based energy management in multi-energy microgrid considering operational uncertainties ». In : *Applied Soft Computing* 98 (2021), p. 106882.
- [72] Mohammad JAFARI et al. « A Novel Predictive Fuzzy Logic-Based Energy Management System for Grid-Connected and Off-Grid Operation of Residential Smart Microgrids ». In : *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics* 8.2 (2020), p. 1391-1404. DOI : [10.1109/JESTPE.2018.2882509](https://doi.org/10.1109/JESTPE.2018.2882509).
- [73] Lotfi FARAH, Adel HADDOUCHE et Ali HADDOUCHE. « Comparison between proposed fuzzy logic and ANFIS for MPPT control for photovoltaic system ». In : *International Journal of Power Electronics and Drive Systems* 11.2 (2020), p. 1065.
- [74] Jabash Samuel GK et al. « MANFIS based SMART home energy management system to support SMART grid ». In : *Peer-to-Peer Networking and Applications* 13.6 (2020), p. 2177-2188.
- [75] Mehdi RAHMANI-ANDEBILI et Haiying SHEN. « Cooperative distributed energy scheduling for smart homes applying stochastic model predictive control ». In : *2017 IEEE international conference on communications (ICC)*. IEEE. 2017, p. 1-6.
- [76] Carlos BORDONS et al. « Effect of the integration of disturbances prediction in energy management systems for microgrids ». In : *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*. IEEE. 2019, p. 1-6.
- [77] Giorgio CAU et al. « Energy management strategy based on short-term generation scheduling for a renewable microgrid using a hydrogen storage system ». In : *Energy Conversion and Management* 87 (2014), p. 820-831.

Bibliographie

- [78] RR NEGENBORN et al. « Model predictive control for residential energy resources using a mixed-logical dynamic model ». In : *2009 International Conference on Networking, Sensing and Control*. IEEE. 2009, p. 702-707.
- [79] Mohamed-Hamza LARAKI. « L'étude de la gestion d'énergie dans les systèmes résidentiels raccordés aux réseaux autonomes dans le Nord québécois ». Thèse de doct. École de technologie supérieure, 2019.
- [80] Wenhao ZHUO. « Microgrid energy management strategy with battery energy storage system and approximate dynamic programming ». In : *2018 37th Chinese Control Conference (CCC)*. IEEE. 2018, p. 7581-7587.
- [81] Adel CHOUDAR et al. « A local energy management of a hybrid PV-storage based distributed generation for microgrids ». In : *Energy Conversion and Management* 90 (2015), p. 21-33.
- [82] Luu Ngoc AN et Tran Quoc TUAN. « Dynamic programming for optimal energy management of hybrid wind-PV-diesel-battery ». In : *Energies* 11.11 (2018), p. 3039.
- [83] Joelle KLAIMI. « Gestion multi-agents des smart grids intégrant un système de stockage: cas résidentiel ». Thèse de doct. Troyes, 2017.
- [84] T BOGARAJ et J KANAKARAJ. « Intelligent energy management control for independent microgrid ». In : *Sādhanā* 41.7 (2016), p. 755-769.
- [85] Amjad ANVARI-MOGHADDAM et al. « A multi-agent based energy management solution for integrated buildings and microgrid system ». In : *Applied energy* 203 (2017), p. 41-56.
- [86] Linyun XIONG et al. « Multi-agent based multi objective renewable energy management for diversified community power consumers ». In : *Applied energy* 259 (2020), p. 114140.
- [87] Stefano LEONORI et al. « Optimization strategies for Microgrid energy management systems by Genetic Algorithms ». In : *Applied Soft Computing* 86 (2020), p. 105903.
- [88] Kutaiba Sabah NIMMA et al. « Grey wolf optimization-based optimum energy-management and battery-sizing method for grid-connected microgrids ». In : *Energies* 11.4 (2018), p. 847.
- [89] Sahar RAHIM et al. « Ant colony optimization based energy management controller for smart grid ». In : *2016 IEEE 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*. IEEE. 2016, p. 1154-1159.
- [90] Mousa MARZBAND et al. « An optimal energy management system for islanded microgrids based on multiperiod artificial bee colony combined with Markov chain ». In : *IEEE systems journal* 11.3 (2015), p. 1712-1722.
- [91] ASO OGUNJUYIGBE, TR AYODELE et OA AKINOLA. « Optimal allocation and sizing of PV/Wind/Split-diesel/Battery hybrid energy system for minimizing life cycle cost, carbon emission and dump energy of remote residential building ». In : *Applied Energy* 171 (2016), p. 153-171.

Bibliographie

- [92] Kutaiba S EI-BIDAIRI et al. « Multiobjective intelligent energy management optimization for grid-connected microgrids ». In : *2018 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2018 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC/I&CPS Europe)*. IEEE. 2018, p. 1-6.
- [93] Md Alamgir HOSSAIN et al. « Modified PSO algorithm for real-time energy management in grid-connected microgrids ». In : *Renewable energy* 136 (2019), p. 746-757.
- [94] M IQBAL et al. « Optimization classification, algorithms and tools for renewable energy: A review ». In : *Renewable and sustainable energy reviews* 39 (2014), p. 640-654.
- [95] Fady Y MELHEM. « Optimization methods and energy management in " smart grids" ». Thèse de doct. Université Bourgogne Franche-Comté, 2018.
- [96] MAGED MAHROUS ABDELSATTAR MAHROUS. « Modelica models of PV elements for system level simulation and control studies ». In : (2015).
- [97] SILVIA BONCOMPAGNI. « Modelling and validation in OpenModelica of a large-scale three-phase grid-connected photovoltaic model ». In : (2020).
- [98] Aminou MOUSSAVOU et Angès AKIM. « Modelling and analysis of microgrid control techniques for grid stabilisation ». Thèse de doct. Cape Peninsula University of Technology, 2014.
- [99] Yiyuan DING. « Energy management strategy of PV grid-connected household nano-grid system ». Thèse de doct. Carleton University, 2018.
- [100] Bijaya POKHAREL. *Modeling, control and analysis of a doubly fed induction generator based wind turbine system with voltage regulation*. Tennessee Technological University, 2011.
- [101] Mohamed Lamine FRIKH et al. « Fractional order PID controller design for wind turbine systems using analytical and computational tuning approaches ». In : *Computers and Electrical Engineering* 95 (2021), p. 107410.
- [102] Soufiane MARMOUH, Mohamed BOUTOUBAT et Lakhdar MOKRANI. « Performance and power quality improvement based on DC-bus voltage regulation of a stand-alone hybrid energy system ». In : *Electric Power Systems Research* 163 (2018), p. 73-84.
- [103] Adel ALORAINI et Moamar SAYED-MOUCHAWEH. « Graphical model based approach for fault diagnosis of wind turbines ». In : *2014 13th International Conference on Machine Learning and Applications*. IEEE. 2014, p. 614-619.
- [104] Yacine TRIKI. « Contribution à l'optimisation des systèmes hybrides de production d'énergies renouvelables ». Thèse de doct. Université de Haute Alsace-Mulhouse; Université Mouloud Mammeri (Tizi-Ouzou ...), 2020.
- [105] Prabha S KUNDUR et Om P MALIK. *Power system stability and control*. McGraw-Hill Education, 2022.

Bibliographie

- [106] Johannes ÖRNKLOO. *Comparison between active and passive rectification for different types of permanent magnet synchronous machines*. 2018.
- [107] Marcelo Gustavo MOLINA et Pedro Enrique MERCADO. « Modelling and control design of pitch-controlled variable speed wind turbines ». In : *Wind turbines*. In Tech, 2011.
- [108] SS KULKARNI et AG THOSAR. « Mathematical modeling and simulation of permanent magnet synchronous machine ». In : *International Journal of Electronics and Electrical Engineering* 1.2 (2013), p. 66-71.
- [109] Boualam BENLAHBIB. « Supervision d'un système hybride éolienne-photovoltaïque connecté au réseau électrique ». Thèse de doct. 2019.
- [110] Addisie BELAY. « Maximum Power Extraction of PMSG Based Variable Speed Wind Turbine Using Self-Tuning Fuzzy Controller ». In : *Masters, Addis Ababa University* (2017).
- [111] Omar Salah Elsayed ATWA. *Practical power system and protective relays commissioning*. Academic Press, 2019.
- [112] Damien PAIRE. « Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entraînements électriques hybrides: application à un ascenseur avec récupération d'énergie ». Thèse de doct. Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2010.
- [113] Ahmed BELILA et al. « Virtual synchronous generators for voltage synchronization of a hybrid PV-diesel power system ». In : *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 117 (2020), p. 105677.
- [114] James LARMINIE et John LOWRY. *Electric vehicle technology explained*. John Wiley & Sons, 2012.
- [115] RD CONSTANTINE et GG EVANGELOS. *Diesel engine transient operation: principles of operation and simulation analysis*. 2009.
- [116] Khaled OURAMDANE. « Modélisation et optimisation du système d'excitation du groupe turbine-alternateur du simulateur analogique d'Hydro-Québec ». Thèse de doct. Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, 2015.
- [117] Mohamed Yassine ALLANI et al. « FPGA-Based Controller for a Hybrid Grid-Connected PV/Wind/Battery Power System with AC Load ». In : *Energies* 14.8 (2021), p. 2108.
- [118] Nada Zine LAABIDINE et al. « Sliding mode control design of wind power generation system based on permanent magnet synchronous generator ». In : *International Journal of Power Electronics and Drive Systems* 12.1 (2021), p. 393-403.
- [119] Abdelmadjid CHAOUI. « Filtrage actif triphasé pour charges non linéaires ». Thèse de doct. 2018.
- [120] A NAAMANE et A KAISS. « State flow approach for multiple power sources management ». In : ()

Bibliographie

- [121] Mostefa KERMADI, Zainal SALAM et El Madjid BERKOUK. « A rule-based power management controller using stateflow for grid-connected PV-battery energy system supplying household load ». In : *2018 9th IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. IEEE. 2018, p. 1-6.
- [122] Muhammad Paend BAKHT et al. « Stateflow-Based Energy Management Strategy for Hybrid Energy System to Mitigate Load Shedding ». In : *Applied Sciences* 11.10 (2021), p. 4601.
- [123] Neeraj Kumar SINGH et al. « Stateflow to tabular expressions ». In : *Proceedings of the Sixth International Symposium on Information and Communication Technology*. 2015, p. 312-319.
- [124] Rana AHMED, A NAMAANE et NK M'SIRDI. « Improvement in perturb and observe method using state flow approach ». In : *Energy Procedia* 42 (2013), p. 614-623.
- [125] Ernest CZOGALA et Jacek LESKI. *Fuzzy and neuro-fuzzy intelligent systems*. T. 47. Springer Science & Business Media, 2000.
- [126] Pierre BORNE, Mohamed BENREJEB et Joseph HAGGÈGE. *Les réseaux de neurones: présentation et applications*. T. 15. Editions OPHRYS, 2007.
- [127] Nazmul SIDDIQUE. *Intelligent control: a hybrid approach based on fuzzy logic, neural networks and genetic algorithms*. T. 517. Springer, 2013.
- [128] Gérard DREYFUS et al. « Apprentissage statistique ». In : *Groupe Eyrolles* (2002), p. 77.
- [129] Alexander S POZNYAK, Edgar N SANCHEZ et Wen YU. *Differential neural networks for robust nonlinear control: identification, state estimation and trajectory tracking*. World Scientific, 2001.
- [130] Marcian CIRSTEA et al. *Neural and fuzzy logic control of drives and power systems*. Elsevier, 2002.
- [131] Kerim KARABACAK et Numan CETIN. « Artificial neural networks for controlling wind-PV power systems: A review ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29 (2014), p. 804-827.
- [132] Muhammet ÜNAL et al. *Optimization of PID controllers using ant colony and genetic algorithms*. T. 449. Springer, 2012.
- [133] Ibham VEZA et al. « Application of Elman and Cascade neural network (ENN and CNN) in comparison with adaptive neuro fuzzy inference system (ANFIS) to predict key fuel properties of ABE-diesel blends ». In : *International Journal of Green Energy* 18.14 (2021), p. 1510-1522.
- [134] CHERIF HAKIMA. « Détection des défauts dans la machine à induction par des techniques avancées ». Thèse de doct. Université Mohamed Khider-Biskra, 2021.
- [135] Yanling ZHENG et al. « Predictive study of tuberculosis incidence by time series method and Elman neural network in Kashgar, China ». In : *BMJ open* 11.1 (2021), e041040.

Bibliographie

- [136] Guanghua REN et al. « A modified Elman neural network with a new learning rate scheme ». In : *Neurocomputing* 286 (2018), p. 11-18.
- [137] Ngac-Ky NGUYEN. « Approche neuromimétique pour l'identification et la commande des systèmes électriques: application au filtrage actif et aux actionneurs synchrones ». Thèse de doct. Université de Haute Alsace-Mulhouse, 2010.
- [138] Hakima CHERIF et al. « Early detection and localization of stator inter-turn faults based on discrete wavelet energy ratio and neural networks in induction motor ». In : *Energy* 212 (2020), p. 118684.
- [139] Muhammad Amri YAHYA, Sasongko Pramono HADI et Lesnanto Multa PUTRANTO. « Short-term electric load forecasting using recurrent neural network (study case of load forecasting in central java and special region of Yogyakarta) ». In : *2018 4th International Conference on Science and Technology (ICST)*. IEEE. 2018, p. 1-6.
- [140] Abderrezzak BOUHARCHOUCHE, El Madjid BERKOUK et Tarrak GHENAM. « Control and energy management of a grid connected hybrid energy system PV-wind with battery energy storage for residential applications ». In : *2013 Eighth International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. IEEE. 2013, p. 1-11.
- [141] Amar GUICHI et al. « Energy management and performance evaluation of grid connected PV-battery hybrid system with inherent control scheme ». In : *Sustainable cities and society* 41 (2018), p. 490-504.
- [142] Sufang WEN et al. « Energy management and coordinated control strategy of PV/HESS AC microgrid during islanded operation ». In : *IEEE Access* 7 (2018), p. 4432-4441.
- [143] Hassan MORADI et al. « Sliding mode type-2 neuro-fuzzy power control of grid-connected DFIG for wind energy conversion system ». In : *IET Renewable Power Generation* 13.13 (2019), p. 2435-2442.
- [144] Okba KRAA et al. « Flatness and sliding mode based controller of fuel cell and supercapacitors hybrid source ». In : *2015 3rd International Conference on Control, Engineering & Information Technology (CEIT)*. IEEE. 2015, p. 1-6.
- [145] Raed ALTHOMALI et Mohammed ALSUMIRI. « Improved MPPT controllers for wind generation system based on hill climbing technique ». In : *2017 Intl Conf on Advanced Control Circuits Systems (ACCS) Systems & 2017 Intl Conf on New Paradigms in Electronics & Information Technology (PEIT)*. IEEE. 2017, p. 140-143.
- [146] Badreddine BABES. « PREDICTIVE CONTROL OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MACHINE USED IN A WIND SYSTEM ». Thèse de doct. Université Ferhat Abbas-Sétif 1.

Bibliographie

- [147] Yinghao SHAN et al. « Model predictive control of bidirectional DC–DC converters and AC/DC interlinking converters—A new control method for PV-wind-battery microgrids ». In : *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 10.4 (2018), p. 1823-1833.
- [148] A PIROOZ et R NOROOZIAN. « Model predictive control of classic bidirectional DC-DC converter for battery applications ». In : *2016 7th Power Electronics and Drive Systems Technologies Conference (PEDSTC)*. IEEE. 2016, p. 517-522.
- [149] Mourad TIAR. « Gestion Optimale D'énergie d'une Chaîne de Production Electrique Renouvelable ». Thèse de doct. Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [150] O KRAA et al. « Modeling and fuzzy logic control of electrical vehicle with an adaptive operation mode ». In : *4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives*. IEEE. 2013, p. 120-127.
- [151] MT BENCHOUIA et al. « Implementation of adaptive fuzzy logic and PI controllers to regulate the DC bus voltage of shunt active power filter ». In : *Applied soft computing* 28 (2015), p. 125-131.
- [152] KM SREEDIVYA, P Aruna JEYANTHY et D DEVARAJ. « Fuzzy logic based power system stabilizer for damping low frequency oscillations in power system ». In : *2017 International Conference on Innovations in Electrical, Electronics, Instrumentation and Media Technology (ICEEIMT)*. IEEE. 2017, p. 201-205.
- [153] Amar GUICHI et al. « Energy management and performance evaluation of grid connected PV-battery hybrid system with inherent control scheme ». In : *Sustainable cities and society* 41 (2018), p. 490-504.
- [154] Md E HAQUE, Michael NEGNEVITSKY et Kashem M MUTTAQI. « 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.
- [155] S BOUALEM et al. « Power management strategy based on Elman neural network for grid-connected photovoltaic-wind-battery hybrid system ». In : *Computers and Electrical Engineering* 99 (2022), p. 107823.