

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 en sciences

Spécialité (Option) : ELECTROTECHNIQUE

Techniques de supervision d'énergie d'un système d'entraînement
Electrique hybride.

Présentée par : **MAAMIR Madiha**

Soutenu publiquement le : 18 Novembre 2020

Devant le jury composé de

Dr. S. ABDEDDAIM	Maitre de Conférence A	Université de Biskra	Président
Dr. A. BETKA.	Professeur	Université de Biskra	Directeur de thèse
Dr. Dj. RAHEM	Professeur	Université d'Oum El Bouaghi	Examineur
Dr. O. BENAISSA	Maitre de Conférence A	Université de Djelfa	Examineur
Dr. A. TERKI	Maitre de Conférence A	Université de Biskra	Examineur
Dr. K. BARRA	Professeur	Université d'Oum El Bouaghi	Examineur

Dédicace

À :

*la mémoire de mes parents, que Dieu ait pitié d'eux,
mon mari et mon fils,
mes frères et sœurs,
mes enseignants et mes chers amis,*

je dédie ce modeste travail.

Remerciements

*Je remercie tout d'abord **ALLAH** de m'avoir prêté santé et volonté pour mener à terme cette thèse du doctorat. Les travaux de recherche présentés dans cette thèse ont été réalisés au sein du Laboratoire de Génie Electrique de Biskra (LGEB), que je remercie vivement le directeur, Professeur **Salah Eddine ZOOUOU** pour les facilitées, et la mise à disposition des moyens du laboratoire.*

*Je profite cette occasion pour exprimer ma sincère gratitude à mon directeur de thèse : Professeur Achour **Betka Professeur**, à l'Université de Biskra. Pour ses précieux conseils, ses encouragements, ses discussions techniques novatrices et pour me fournir toutes les facilités nécessaires tout au long de ce travail. Cela n'aurait pas été possible sans ses motivations et son soutien sans fin*

*J'adresse également mes meilleurs sentiments de gratitude aux honorables membres du Jury qui ont accepté de juger ce travail. Je remercie docteur **Sabrina Abdeddaim** à l'université de Biskra, qui m'a fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.*

*Je tiens également à remercier vivement les membres de jury : Monsieur **Djamel RAHEM** et Monsieur **Kamel Barra** Professeur à l'Université d'Oum-El Bouaghi, Monsieur **Omar BENAÏSSA** docteur à l'Université Djelfa, docteur **Amel TERKI** à l'université de Biskra*

pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être les examinateurs de cette thèse.

*Je remercie tous les membres du personnel enseignant et administratif du laboratoire de génie électrique de Biskra (LGEB) et je remercie aussi tous mes collègues et amies à d'EL oued particulier mes collègues **Sasia Boualem, Cherif Hakima et Hania Aboub.***

Du fond du cœur, je remercie toutes les personnes m'ayant aidé de près ou de loin à mener ce travail.

RESUME

Dans la présente cette thèse, une contribution à l'étude et à la supervision d'un système d'énergie renouvelables hybride, dédié au pilotage d'un ascenseur est proposée. Le système comprend un générateur photovoltaïque comme source principale, doté d'un système de stockage de batteries et des super condensateurs (SC), le tout étant connecté à un réseau de distribution externe qui permet l'appoint ou l'évacuation de l'énergie, afin d'alimenter un moteur synchrone à aimant permanent (PMSM), déplaçant la cage de l'ascenseur. L'objectif principal de cette recherche consiste à concevoir deux stratégies de gestion d'énergie, l'une est basé sur l'algorithme intelligent par réseaux de neurone et l'autre basé sur la séparation de fréquence garantissent au système de passer intelligemment entre les différents modes de fonctionnement, en fonction de la demande de la charge et la disponibilité de la source solaire.

Ces stratégies ont pour objectif de diriger la composante basse fréquence de la puissance résultante vers la batterie et sa composante haute fréquence vers le SC afin de préserver la durée de vie de la batterie. Par ailleurs, des approches de commande ont été envisagées pour le contrôle des différents sous-systèmes. Le générateur photovoltaïque délivre en permanence son maximum, via une MPPT par logique floue. De plus, pour le système d'entraînement, une commande prédictive (MPC) est utilisée pour le suivi des courants statoriques de l'MSAP permet de récupérer l'énergie durant certaines phases de fonctionnement.

Pour tester l'efficacité des algorithmes proposés, les résultats de simulation obtenus avec un profil de charge donnée sont présentés et commentés. Les résultats obtenus montrent la faisabilité du système de contrôle proposé. De ce fait le gestionnaire par RN fonctionne différemment pour gérer la distribution d'énergie entre les différentes sources et la charge, plus intelligemment, par rapport au gestionnaire par séparation fréquentielle conventionnel.

Mots clés : Système hybride, stockage d'énergie, générateur PV, Gestion d'énergie, supercondensateurs, logique flou, réseaux de neurone

Abstract

In this thesis, a contribution to the study and supervision of a hybrid renewable energy system, dedicated to steering an elevator is proposed. The system includes a photovoltaic generator as the main source, equipped with a battery storage system and a super Capacitors (SC), the all is connected to the utility grid which allows the supplementation or the evacuation of the energy, to power a permanent magnet synchronous motor (PMSM), moving the elevator box. The main objective of this research is to design two energy management strategies, one is based on intelligent algorithm by neural networks and the other based on frequency separation guarantee the system to switch intelligently between different operating modes, depending on the load demand and the availability of the solar source.

The objective of these strategies is to direct the low-frequency component of the resulting power to the battery and its high-frequency component to the SC to preserve the battery life.

Also, control approaches have been considered for the control of the different subsystems.

The photovoltaic generator continuously delivers its maximum, via an MPPT by fuzzy logic.

In addition, for the drive system, a predictive control (MPC) is used to follow the PMSM stator currents to recover the energy during certain phases of operation.

To test the efficiency of the proposed algorithms, the simulation results obtained with a given load profile are presented and commented. The obtained results show the feasibility of the proposed control system. Therefore, the power management by ANN operates differently to manage the distribution energy between the different sources and the load, more intelligently, compared to the power management by the conventional frequency separation.

Keywords: Hybrid system, energy storage, PV generator, Energy management, supercapacitor, fuzzy logic, neural networks

ملخص

هذه الأطروحة، تقترح دراسة حول تسيير الطاقة لنظام هجين للطاقة المتجددة، مخصص لتوجيه المصعد. يشتمل النظام على مولد كهربائي ضوئي كمصدر رئيسي ، مزود بنظام تخزين بطارية ومكثفات فائقة (SC) ، كلها متصلة بشبكة توزيع خارجية تسمح بتغطية الطاقة كمولد احتياطي أو ضخ الفائض من الطاقة نحوها ، لتشغيل محرك مترامن ذو مغناطيس دائم (PMSM) لتحريك عمود المصعد. الهدف الرئيسي من هذا البحث هو تصميم استراتيجيتين لإدارة الطاقة ، واحدة تعتمد على خوارزمية الشبكة العصبية الذكية والأخرى على أساس فصل التردد لضمان مرور النظام بذكاء بين أوضاع التشغيل المختلفة ، اعتماداً على طلب الشحنة وتوافر مصدر الطاقة الشمسية.

تهدف هذه الاستراتيجيات إلى توجيه مكون التردد المنخفض للطاقة الناتجة إلى البطارية ومكوناتها عالية التردد إلى SC من أجل الحفاظ على عمر البطارية. بالإضافة إلى ذلك ، تم النظر في مناهج التحكم للتحكم في النظم الفرعية المختلفة. يوفر المولد الكهروضوئي الحد الأقصى باستمرار ، عبر MPPT بواسطة منطق ضبابي. بالإضافة إلى ذلك ، بالنسبة لنظام القيادة ، يتم استخدام التحكم التنبئي (MPC) لمراقبة تيارات الجزء الثابت ، ويسمح ل MSAP باستعادة الطاقة خلال مراحل معينة من التشغيل.

لاختبار كفاءة الخوارزميات المقترحة، يتم تقديم نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها باستخدام منحنى حمولة معين والتعليق عليها. لذلك يعمل مسير الطاقة باستخدام RN بشكل مختلف لإدارة توزيع الطاقة بين المصادر المختلفة والحمل، بشكل أكثر ذكاءً، مقارنةً بمسير الطاقة التقليدي عن طريق فصل التردد.

الكلمات المفتاحية: النظام الهجين ، تخزين الطاقة ، المولد الكهروضوئي ، إدارة الطاقة ، المكثف الفائق ، المنطق الضبابي ، الشبكات العصبية

Table des matières

Résumé.....	i
Table des matières.....	iv
Liste des figures	viii
Liste des Tableaux	xi
Liste notations et symboles.....	xii
Introduction générale.....	1

Chapitre 1

Etat de l’art sur les Stratégies de Gestion D’énergie

1.1 Introduction :.....	8
1.2 Définition et architectures des SHER :	8
1.2.1 Architecture à bus CC (courant continu) :	9
1.2.2 Architecture à bus AC (Alternative continu):	10
1.2.3 Architecture à bus CC/AC (continu/alternatif) :	11
1.3 Description des différentes sources utilisables:	11
1.3. 1 Conversion photovoltaïque :	12
1.3.2 Systèmes de stockage :	13
1.3.2.1 Batteries :.....	13
1.3.2.2 Les super condensateurs	15
1.3.2.3 Convertisseurs :	16
1.3.2.4 Etude de l’entraînement d’un ascenseur :	17
1.4 Etat de l’art des stratégies de gestion d’énergie :.....	20
1.4.1 Stratégies à base de règles :.....	20
1.4.1.1 Les règles déterministes :	21
1.4.1.2 Stratégies basées sur des règles prédéfinies (Intelligence artificielle):	23
1.4.2 Les stratégies basées sur l’optimisation:	28
1.4.2.1 La Programmation dynamique:	29
1.4.2.2 Commande optimale:.....	30
1.4.2.3 Commande prédictive:.....	31
1.5 Conclusion:	32
1.6. Références du chapitre 1:.....	33

Chapitre 2

Modélisation des composants du SEH

2.1 Introduction:.....	42
2.2 Description du système hybride :.....	42
2.3 Dimensionnement des éléments du système hybride :	43
2.3.1 Dimensionnement des convertisseurs statiques:	44
2.3.2 Dimensionnement de la tension de bus continu :.....	45
2.4 Modélisation des sources à puissances finies :	46
2.4.1 Modèle du générateur photovoltaïque:.....	46
2.4.1.1 Caractéristique et influence de l'éclairement et de la température:.....	47
2.4.2 Modèle de la batterie:.....	49
2.4.2.1 Equation électrique de charge et décharge :.....	51
2.4.2.2 Etat de charge de la batterie :.....	51
2.4.3 Modèle des Supercondensateurs:	51
2.4.3.1 Equation de l'état de charge :	52
2.4.4 Modèle de la MSAP avec l'Ascenseur :.....	53
2.4.4.1 Equations de tensions et de flux:	54
2.4.4.2 Equations de la machine dans les axes d-q :.....	56
2.4.4.3 Equation mécanique :	57
2.4.5 Modèles des convertisseurs statiques :.....	59
2.4.5.1 Modèle moyen du convertisseur survolteur du GPV :	60
2.4.5.2 Modèle moyen du convertisseur bidirectionnel :	62
2.4.5.3 Modèle de l'onduleur de tension :	64
2.4.5.4 Réseau et convertisseur associé :.....	65
2.4.6 Modélisation du bus continu :	66
2.5 Conclusion :	67
2.6. Références du chapitre 2:.....	68

Chapitre 3

Description des Approches de Commande d'un SEH

3.1 Introduction :.....	72
3.2 Description du gestionnaire d'énergie :.....	72
3.2.1 Contrôleur robuste du bus continu :.....	74
3.2.2 Description des Modes de fonctionnement du SGE :.....	77
3.2.3. Gestionnaire de l'énergie basée sur la séparation fréquentielle :.....	78
3.2.4. Gestion de l'énergie basée sur le réseau de neurone :.....	81
3.2.4.1 Neurone formel :.....	81
3.2.4.2 Perceptron Multicouches (MLP) :.....	83
3.2.4.3 Apprentissage du RNA Multicouches (MLP) :.....	84
3.3 Commande rapprochée des convertisseurs statiques :.....	85
3.3.1 Commande côté source photovoltaïque (PV) :.....	85
3.3.1.1 Configuration interne d'un régulateur par logique floue :.....	86
3.3.2 Commande de la batterie :.....	88
3.3.3. Commande des Supercondensateurs :.....	90
3.3.4 Commande prédictive de la partie de traction (Moteur MSAP) :.....	91
3.3.4.1 Eléments de la commande prédictive :.....	92
3.3.4.2 Modèle au temps discret :.....	93
3.3.4.3 Schéma de contrôle.....	93
3.3.4.4 Synthèse des différents régulateurs :.....	94
3.3.4.5 Correcteur de vitesse :.....	95
3.3.5 Stratégie de contrôle de l'onduleur côté réseau :.....	97
3.4 Conclusion	99
3.5. Références du chapitre 3.....	99

Chapitre 4

Résultats de simulation

4.1 Introduction :.....	104
4.2. Résultats et discussion :.....	104

TABLE DES MATIERE

4.2.1 Choix des entrées	104
4.2.1.1 Les conditions climatiques	104
4.2.1.2 Les variations de la charge :	105
4.2.2 Caractéristique de GPV :.....	107
4.2.3 Résulta de simulation du gestionnaire d'énergie basé sur le RNA :.....	109
4.2.3.1 Les Résultats de l'apprentissage du gestionnaire par RNA :	110
4.2.3.2 Les Résultats de test du gestionnaire de RNA :.....	111
4.2.4. Différents modes de fonctionnement du système hybride.	114
4.2.4.1 Conditions initiales	114
4.2.4.2 Mode 1 : Mode de décharge de la batterie :	115
4.2.4.3 Mode2: Mode de demande de réseau.	116
4.2.4.4 Mode de charge de la batterie.....	117
4.2.4.5 Mode4 : Mode d'injecté au réseau :	119
4.2.5. Résultat de simulation de l'MSAP :.....	121
4.2.6. Résultats de simulation du réseau électrique :	124
4.3 Conclusion :	128
Conclusion générale.....	130

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre 1

Figure.1.1.Structure à bus DC d'un système hybride.	9
Figure.1.2.Structure à bus AC d'un système hybride.	10
Figure.1.3.Structure à bus mixte (DC&AC) d'un système hybride.....	11
Figure.1.4.Structure d'une cellule photovoltaïque utilisant le silicium comme matériau PV.	12
Figure.1.5.Composition d'un super condensateur.	16
Figure.1.6.Différents ascenseurs hydrauliques.	18
Figure.1.7. (a).Ascenseur à moteur treuil (b). Ascenseur à moteur à attaque directe.....	19
Figure.1.8.Classification des différentes stratégies de gestion de l'énergie.	20
Figure.1.9.Principe de la stratégie de thermostat « On ou Off ».	21
Figure.1.10.Principe de la stratégie de gestion « partage fréquentiel ».	22
Figure.1.11.Principe de la décomposition fréquentielle de puissance.	22
Figure.1.12.Principe de la logique floue.	24
Figure.1.13.Structure générale de NN.	25
Figure.1.14.Structure d'un système hybride géré par le technique multi-agent.	28

Chapitre 2

Figure.2.1.Schéma électrique détaillé du système ascenseur.	43
Figure.2.2.Caractéristiques d'un convertisseur boost.	45
Figure.2.3.Schéma équivalent d'une cellule solaire.	46
Figure.2.4.Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) et P(V) à T=25°C.....	48
Figure.2.5.Influence de la température sur la caractéristique I(V) et P(V) à E=1000W/m ²	49
Figure.2.6.Cellule électrochimique de base.	50
Figure.2.7.Modèle équivalent électrique simple d'une batterie.....	50
Figure.2.8.Modèle d'un Super condensateur.	52
Figure.2.9.Schéma de la machine synchrone.....	54
Figure.2.10.Schéma de la machine synchrone dans le référentiel (d,q).	56
Figure.2.11.Schéma simplifié du système de masses de l'ascenseur	57
Figure.2.12.Le schéma de principe d'un hacheur survolteur.	60

Liste Des Figures

Figure.2.13.Schéma de principe de la première séquence de conduction	61
Figure.2.14.Le schéma de principe de la deuxième séquence de conduction.....	61
Figure.2.15.Convertisseur associé aux batteries.	62
Figure.2.16.Le schéma de principe de la première séquence de conduction	63
Figure.2.17.Le schéma de principe de la deuxième séquence de conduction.....	63
Figure.2.18.Structure d'un onduleur de tension à deux niveaux.	64
Figure.2.19.Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux coté réseau.	66
Figure.2.20.Modèle du bus continu	67

Chapitre 3

Figure.3.1.Schéma synoptique de l'installation hybride.....	73
Figure.3.2.Synoptique du contrôle et de gestion d'énergie.	74
Figure.3.3.Régulation du bus continu par le FLC.....	75
Figure.3.4.Fonctions d'appartenance des entrées et de la sortie.....	76
Figure.3.5.Système de Gestion d'Énergie (SGE) par la technique de séparation de fréquence.....	80
Figure.3.6.Structure générale du neurone formel.	81
Figure.3.7.Exemples de fonctions d'activation.....	82
Figure.3.8.Réseau de neurones de type perceptron à 20 couche cachée.....	84
Figure.3.9.Structure de base du contrôleur flou.	86
Figure.3.10.Les fonctions d'appartenance pour les variables d'entrées et de sortie.....	87
Figure.3.11.Schéma de commande de la batterie.	90
Figure.3.12.Schéma de commande de la supercapacité.....	91
Figure.3.13.Schéma du principe de l'horizon fuyant.....	92
Figure.3.14.Le schéma fonctionnel de la structure de base des algorithmes MPC.	92
Figure.3.15.Commande vectorielle prédictive en Position du moteur MSAP.....	94
Figure.3.16.Régulateur de position.	95
Figure.3.17.Régulation de la vitesse.	96
Figure.3.18.Contrôle en courant de l'onduleur réseau dans le référentiel d-q.....	98

Chapitre 4

Figure.4.1.Evolution de l'irradiation de GPV.....	105
Figure.4.2.La position de l'ascenseur.	106

Liste Des Figures

Figure.4.3 : La masse de l'ascenseur	106
Figure.4.4.Puissance de la charge.	107
Figure.4.5.Evolution de la puissance, courant et tension du système PV	108
Figure.4.6.Précision du contrôleur MPPT flou (dP_{pv}/dI_{pv} , W/A).....	109
Figure.4.7.GUI du RN développé pour le gestionnaire d'énergie.....	110
Figure.4.8.Les entrées de l'apprentissage.....	111
Figure.4.9.Les Sorties de l'apprentissage.	112
Figure.4.10.Les Sorties de test de RN.....	113
Figure.4.11.Evolution de la puissance P_{net} , P_{ch} et la puissance de GPV.....	114
Figure.4.12.Puissance du système hybride en mode 1.....	115
Figure.4.13.Zoom des puissances du système hybride en mode 1.	116
Figure.4.14.Puissance du système hybride en mode 2.....	117
Figure.4.15.Puissance du système hybride en mode 3.....	118
Figure.4.16. Puissance du système hybride en mode 4.....	119
Figure.4.17.Courant et courant de référence de la batterie et des SC.....	120
Figure.4.18.Etat de charge des SC et de la batterie.	121
Figure.4.19.Position et sa consigne de l'ascenseur.....	122
Figure.4.20.Vitesse de rotation mécanique.....	122
Figure.4.21.Le courant en quadrature (i_{qs}) et son référence.	123
Figure.4.22.Le courant direct (i_{ds}) et son référence.	123
Figure.4.23. Le couple électromagnétique (C_{em}).	124
Figure.4.24.Courant injectée au réseau : a. I_{abc} ; b. i_d ; c. i_q	125
Figure.4.25.Allure de la tension et du courant du réseau (a: mode 2 et b : mode4)	126
Figure 4.26. Allure de la puissance active et réactive du réseau (a: active et b : réactive).....	127
Figure.4.27.Evolution de la tension du bus DC.....	128

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau 3.1. Table des règles de décision floues	76
Tableau 3.2. Base de règles floues	88

NOMENCLATURE

Symboles et notations

R_p	Résistance série (Ω)
R_{ch}	Résistance shunt (Ω)
I_{pv}	Courant d'une cellule photovoltaïque (A)
I_{cc}	Courant de court-circuit (A)
I_0	Courant de saturation de la diode inverse (A)
V_{pv}	Tension d'une cellule photovoltaïque (A)
V_{oc}	Tension de circuit ouvert (V)
I_{op}	Courant optimum (A)
V_{op}	Tension optimale (V)
V_{th}	Tension thermique (V)
N_s	Nombre de modules en série
N_p	Nombre de branches en parallèle
α	Coefficient de variation du courant en fonction de la température
β	Coefficient de variation de la tension en fonction de la température
T	Température effective des cellules [$^{\circ}\text{C}$]
T_{ref}	Température de référence [$^{\circ}\text{C}$]
SOC_{bat}	L'état de charge de la batterie
DoD	Profondeur de décharge de la batterie
V_{bat}	Tension de la batterie (V)
i_{bat}	Courant de la batterie (A)
r_{bat}	Résistance série d'une cellule de la batterie (Ω)
n	Nombre de cellule
E_{bat}	Tension à vide (V)
C_N	La capacité nominale de la batterie (F)
$SoC_{bat_{int}}$	L'état de charge initiale de la batterie
v_{sc}	Tension de supercondensateur (V)
i_{sc}	Courant de supercondensateur (A)
SOC_{sc}	L'état de charge de supercondensateur

SYMBOLES ET NOTATIONS

c_1	La capacitance (F)
Q	La charge électrique (c)
V_1	La tension appliquée (V)
ε	Constante diélectrique du matériau isolant
A	La surface (m ²)
$v_{c_{sc}}$	La tension au borne de la capacité C_{sc} (V)
R_{sc}	La résistance interne du supercondensateur (Ω)
C_{sc}	La capacité du supercondensateur (F)
d	L'épaisseur (m)
W	L'énergie électrostatique stockée (J)
$[V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^T$	Tensions des phases statorique (V)
$[i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs}]^T$	Courant des phases statorique (I)
$[\Phi_{as} \ \Phi_{bs} \ \Phi_{cs}]^T$	Flux totaux à travers les bobines statorique (wb)
M_{s0}	Inductance mutuelle entre deux phases statorique (H)
L_{s0}	Inductance propre d'une phase statorique (H)
θ_e	La position angulaire du rotor par rapport au stator
C_e	Couple électromagnétique (N.m)
C_r	Couple résistante (N.m)
ϕ_f	Flux des aimants (Wb)
J	Moment d'inertie des masses en rotor (Kg.m ²)
P	Nombre de paires de pôles
$\Omega_{m_{ref}}$	Vitesse mécanique de rotation de référence (rd/s)
Ω_m	Vitesse mécanique de rotation (rd/s)
R_s	Résistance statorique (Ω)
L_{ds}, L_{qs}	Inductances cycliques directe et en quadrature (H)
i_{ds}, i_{qs}	Courants statoriques d'axe direct et en quadrature (I)
V_{ds}, V_{qs}	Tensions statoriques d'axe direct et en quadrature (V)
M_p	La masse de contreponds (Kg)
M_c	La masse de la cage (Kg)
Z	Position de la cage (m)
Z_{ref}	Position de la cage de référence (m)

SYMBOLES ET NOTATIONS

r	Rayon du pignon (m)
θ_m	Position du rotor (codeur incrémental)
V_c	Vitesse de la cage (m/s)
$i_{L_{pv}}$	Courant de la bobine (A)
L_{pv}	Inductance de l'hacheur du GPV (H)
R	Résistance de la charge (Ω)
$i_{pv_{dc}}$	Courant du GPV en sortie de l'hacheur (A)
i_{pv}	Courant du GPV (A)
α_{reg}	Rapport cyclique de l'hacheur du GPV en mode régulation de puissance
α_{mppt}	Rapport cyclique de l'hacheur du GPV fonctionnant en MPPT
$I_{pv_{ref}}$	Courant du générateur photovoltaïque de référence (A)
$P_{pv_{ref}}$	Puissance du générateur photovoltaïque de référence (w)
L_{bat}	Inductance de l'hacheur de la batterie (H)
$i_{bat_{dc}}$	Courant de la batterie en sortie de l'hacheur (A)
$I_{bat_{ref}}$	Courant de la batterie de référence (A)
α_{bat}	Rapport cyclique de l'hacheur de la batterie
L_{sc}	Inductance de l'hacheur du supercondensateur (H)
$i_{sc_{dc}}$	Courant du SC en sortie de l'hacheur (A)
$I_{sc_{ref}}$	Courant du SC de référence (A)
α_{sc}	Rapport cyclique de l'hacheur du supercondensateur
$i_{dc_{ref}}$	Courant de bus continu de référence (A)
i_c	Courant de bus continu (A)
P_{ch}	La puissance de la charge (moteur) (w)
i_m	Le courant de la charge (moteur) coté continu (A)
$V_{dc_{ref}}$	Tension de bus continu de référence (V)
V_{dc}	Tension de bus continu (V)
C_{dc}	Capacité du bus continu (F)
$e_a e_b e_c$	tensions simples du réseau électrique
R_g	Résistance de ligne
L_g	Inductance de ligne

SYMBOLES ET NOTATIONS

$V_a V_b V_c$	Tensions de l'onduleur triphasé
$i_a i_b i_c$	Courants des phases du réseau
$i_{gd} i_{gq}$	Courants direct et en quadrature du réseau (plan d-q)
$i_{gdref} i_{gqref}$	Courants de référence du réseau (plan d-q)
θ_g	Angle électrique
w_g	Pulsation du réseau électrique
$e_{gd} e_{gq}$	Tensions directe et en quadrature du réseau (plan d-q)
$[S_a S_b S_c]$	Grandeurs de Commande de l'onduleur
F_c	Fréquence de découpage (Hz)
SEH	Système d'Energie Hybride
MSAP	Moteur synchrone à aimant permanent
PPM	Point de Puissance Maximale
GPV	Générateur photovoltaïque
SC	Supercondensateur
RNA	Réseau de neurone artificiel
MPC	Modèle prédictive contrôle

Introduction Générale

Introduction générale

1. Contexte

Au cours des dernières décennies, la forte évolution mondiale de la demande en énergie constitue une des principales causes d'impacts environnementaux tels que la pollution, le dégagement à effet de serre CO₂ et le réchauffement climatique [1]. En effet, ces besoins énergétiques accentués sont majoritairement satisfaits par les sources conventionnelles d'énergies (pétrole et gaz naturel), ce qui a conduit à leur épuisement progressif. Compte tenu de cette situation et de sauvegarder les réserves d'énergies fossiles pour les générations futures et de préserver l'environnement, les chercheurs et les opérateurs dans le domaine ont commencé de s'orienter vers les sources et les méthodes de production renouvelable et écologique en exploitant les énergies propres sur la terre [2], [3], [4], [5]. Ces sources d'énergie renouvelables (SER) offrent plusieurs avantages, elles sont inépuisables et leur impact sur l'environnement est beaucoup plus faible que les sources d'énergie traditionnelles, elles permettent d'éviter la pollution produite par les énergies fossiles, la réduction des coûts des technologies, en plus de l'amélioration de l'efficacité et de la fiabilité [6] [7]. Les énergies renouvelables peuvent être générées à partir de l'énergie solaire, éolienne, océanique, hydraulique, biomasse, des ressources géothermiques, des biocarburants et de l'hydrogène dérivé de ressources renouvelables [8],[9]. Parmi les sources énergétiques renouvelables disponibles utilisées dans le cadre de la présente thèse est l'énergie solaire, où elle s'occupe une place centrale pour la production d'électricité photovoltaïque et pour le chauffage d'eau sanitaire via les chauffe-eau solaires dans deux objectifs distincts : la production d'énergie propre et la diminution de la consommation énergétique. Ce choix stratégique est motivé par l'immense potentiel en énergie solaire. Cette énergie constitue l'axe majeur du programme qui consacre au solaire thermique et au solaire photovoltaïque une part essentielle [10].

Malheureusement, jusqu'à maintenant, les puissances installées par les énergies renouvelables ne sont pas capables de concurrencer les grandes centrales actuelles à cause de leur intermittence et leur caractère fluctuant. Alors, elles souffrent d'un inconvénient majeur qui est leur intermittence. Ce caractère intermittent diminue leur efficacité énergétique lorsqu'elles sont exploitées individuellement, d'où le recours à l'utilisation de systèmes hybrides (multi-sources) combinant plusieurs sources d'énergie renouvelables et des moyens de stockage pour assurer la continuité d'approvisionnement de l'énergie [11]. Dans la littérature il existe différents types de systèmes énergétiques (systèmes énergétiques isolés, systèmes

énergétiques connectés, systèmes énergétiques mono source et systèmes énergétiques multi-sources) [1].

En général, le terme système énergétique hybride (SEH) indique les systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types des sources de manière à cumuler les avantages de chacun d'entre eux en tenant en compte des spécifications de chacun. Ces sources hybrides combinent une énergie spécifique très élevée et une puissance maximale disponible sur des durées appréciables. Aujourd'hui, l'utilisation des systèmes énergétiques hybrides (SEH) a progressé dans plusieurs secteurs industriels tels que les systèmes embarqués (automobiles, avions, bateaux, ...) aussi pour l'alimentation des cités isolées ou même liées aux réseaux [12].

2. Problématique

Les systèmes de production hybride occupent, de plus en plus, une place très importante dans la production de l'énergie électrique. Notons que la nature aléatoire des sources d'énergie renouvelable (ER) est la difficulté principale dans l'analyse et l'exploitation des SEH. Cependant, la question qui se pose ici, comment satisfaire la demande de la charge quel que soit les conditions climatiques ? Le système de stockage (batterie, SC), malgré son coût relativement élevé et sa durée de vie très limitée, représente un bon complément aux sources d'ER. Elle est utilisée pour la production d'énergie électrique dans les régions isolées, afin de réduire les fluctuations de la production causées par la nature aléatoire de ces ressources. D'où la nécessité de réduire son utilisation au minimum, dans le but d'éviter sa dégradation par des décharges profondes ou des surcharges. Une autre question qui s'ajoute comment satisfaire la demande et assurer la continuité de service lorsque le système de stockage atteint son limite inférieure prédéfinie ? Le système multi-sources peut être combiné avec d'autres éléments de secours, comme le générateur diesel. Cependant, à cause de leur inconvénients (bruyante, polluante et le coût élevé), le réseau électrique constitue un complément très adéquat afin d'assurer les besoins de la charge pendant toute l'année [13]. De ce fait les ressources d'énergies renouvelables ont rendu possible la production d'énergie distribuée et la bidirectionnalité du flux d'énergie dans les réseaux électriques, ces mêmes lignes électriques sont utilisées pour que le réseau absorbe l'énergie renouvelable produite par les clients [14].

On peut réinjecter l'énergie provenant des sources renouvelables directement sur le réseau électrique, en prévoyant, soit un dispositif de stockage (des batteries par exemple), soit un système de gestion intelligente afin de mettre en adéquation la production avec l'usage de

l'énergie. C'est dans ce contexte que se situe la problématique de cette thèse est de superviser et optimiser un système multi-sources pour satisfaire aux besoins d'une demande du système ascenseur proposé dans cette étude [15]. Cette répartition des flux peut être réalisée par un système de gestion de l'énergie (SGE) qui prend en compte les différentes contraintes d'utilisation de chaque élément du système.

3. Objectif de la recherche

Dans la présente thèse, une étude de modélisation et de commande d'un système électrique hybride permettant de faire fonctionner un ascenseur de 3 m. Ce dernier combine un générateur photovoltaïque, une batterie et un banc de SC, appuyés par le réseau électrique comme source d'appoint. La machine synchrone à aimant permanent (MSAP) est utilisée pour déplacer la cage de l'ascenseur via un onduleur de tension de deux niveaux.

L'objectif principal de ce travail consiste à proposer de gérer adéquatement le flux d'énergie entre les différentes sources et la demande de la charge alternative considérée. Pour ce faire, deux méthodes de gestion d'énergie sont suggérées, l'une est basée sur le réseau de neurone artificiel (RNA) et l'autre basé sur la séparation de fréquence. Afin d'atteindre cet objectif, nous nous sommes fixés d'autres objectifs auxiliaires :

- Approfondir nos connaissances sur ce thème de recherche d'actualité.
- Assurer la continuité d'approvisionnement en électricité avec une bonne qualité.
- Modéliser et simuler un système multi-source connecté au réseau électrique.
- Une commande rapprochée judicieuse des différents convertisseurs statiques utilisés.
- Optimiser l'énergie extraite par le GPV à travers une commande MPPT par la logique floue.
- Stabilisation de la tension du bus DC indépendamment des variations des sources et de la charge à travers un contrôleur basé sur la théorie de Lyapunov.
- Le système ascenseur est contrôlé par la commande prédictive en courant où le modèle de la machine est utilisé pour prédire le comportement des courants statoriques

Pour résoudre cette problématique et d'atteindre ces objectifs nous avons divisé cette thèse en quatre chapitres.

Dans le premier chapitre nous présenterons des généralités sur les systèmes d'énergie hybrides, nous intéresserons plus particulièrement au système hybride photovoltaïque avec le système de stockage (batterie et SC), connecté au réseau électrique. Ensuite nous passerons au

différent typologie des systèmes hybrides. A la fin de ce chapitre nous présentons un état de l'art sur les stratégies de supervision des systèmes hybrides entre autres celles basées sur des méthodes conventionnels et celles basées sur l'intelligence artificielle.

Ensuite une modélisation des différents éléments des systèmes énergétiques hybrides (source et convertisseurs statiques) est abordée au deuxième chapitre, qui permet en fait de suggérer les lois de commande appropriées, et prédire ces performances. L'ensemble des modèles est représenté sous l'environnement Matlab/Simulink.

Le troisième chapitre décrit les différentes lois de gestion et de commande appliquées au système pour un fonctionnement souple et fiable, inspirées de l'intelligence artificielle, de la théorie de Lyapounov et le contrôle prédictive.

Pour évaluer la faisabilité des techniques proposées, un ensemble de résultats de simulation sont effectués dans le quatrième chapitre, face aux variations climatiques et de la charge électrique.

Pour clôturer ce manuscrit, une conclusion générale et d'éventuelles perspectives de recherche suite à ce travail sont données.

Références

- [1] Hellel, E.K., "Fiabilité des systèmes énergétiques multi-sources"., these doctorat, Université Mouloud Mammeri, 2019.
- [2] Tegani, I., "Optimisation et contrôle d'un micro smart grid utilisant une pile à combustible, des supercondensateurs, des batteries, une éolienne et une source photovoltaïque". thèse doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2016.
- [3] Mahjoubi, C.m., "Modélisation multi-physique et gestion d'énergie d'un micro-réseau résidentiel autonome". Thèse doctorat, université Nantes. 2019
- [4] Bidi, F.K., et al. "Model Predictive Control for Micro Grid stabilisation in case of loss of units". in 2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC). 2019. IEEE.
- [5] Fabrice, K., "Développements et tests de stratégies de gestion de l'énergie à l'échelle de micro réseaux avec stockage et production d'hydrogène".thèse doctorat, Université de la Réunion, 2019.
- [6] Abderrahim, T. and B. Said. "Control and management of grid connected PV-Battery hybrid system based on three-level DCI". in 2017 6th International Conference on Systems and Control (ICSC). 2017. IEEE.
- [7] Kermadi, M., Z. Salam, and E.M. 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). 2018. IEEE.
- [8] Tabanjat, A., Modelling, control and supervision of multi-source system connected to the network with a buffer storage of electrical energy via hydrogen vector.these doctorat, 'Université de Technologie de Belfort–Montbéliard , 2015.
- [9] Tabanjat, A., et al., "Energy management hypothesis for hybrid power system of H2/WT/PV/GMT via AI techniques". International Journal of Hydrogen Energy, 2018. 43(6): p. 3527-3541.
- [10] Borni, A., "Etude et optimisation d'un multi système hybride de conversion d'énergie électrique". thèse doctorat ,université Constantine1, 2015.
- [11] MOHAMMEDI, M., "Gestion de l'énergie pour une chaîne multi-sources".thèse doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra,2016.

- [12] KHOUDIRI, S., "Commande et Optimisation d'un Système Energétique Hybride (SEH): Application à l'Énergie Renouvelable".thèse doctorat, UNIVERSITE MOHAMED KHIDER BISKRA,2018.
- [13] Abbes, D., "Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome". Thèse doctorat, Université de Poitiers, 2012.
- [14] Boussaada, Z., "Contribution à la Gestion et à la Commande des Micro-Réseaux par les Systèmes Multi Agents". thèse doctorat, université tunis,2018.
- [15] Benlahbib, B., "Supervision d'un système hybride éolienne-photovoltaïque connecté au réseau électrique".thèse doctorat, université USTHB, 2019.

Chapitre 01: Etat de l'art sur les Stratégies de Gestion D'énergie

1.1 Introduction :

Face à la croissance mondiale de la demande énergétique, aux problèmes posés par les énergies fossiles, à l'épuisement de ces dernières et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz, nous devons nécessairement développer d'autres sources d'énergie propre [1].

Les énergies renouvelables sont des formes d'énergie qui proviennent d'une source renouvelable, c'est à-dire une source inépuisable qui se renouvelle de telle sorte que l'utilisation actuelle n'ait pas d'impact sur la disponibilité future. Ces ressources renouvelables sont des sources d'énergie issues de phénomènes naturels provoqués par les astres, principalement le soleil (rayonnement) et la terre (énergie géothermique). Elles représentent une alternative intéressante pour les énergies classiques (fossiles). Les six principales sources d'énergies renouvelables sont ; l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marine et la biomasse. Le potentiel de ces sources dépend de plusieurs facteurs, tels que l'ensoleillement, l'exposition au vent, la topologie et la géométrie des terrains [2] [3] [4].

Afin de résoudre le problème des sources d'énergie renouvelables (la puissance obtenue à partir de ces sources est variable, elle est tributaire aux conditions climatiques), un couplage entre différents sources d'approvisionnement pour former un système dit système d'énergie hybride est proposé. Ces systèmes hybrides, plus ou moins complexes, nécessitent une stratégie de contrôle adaptée afin d'exploiter dans les meilleurs conditions les différentes sources et d'utiliser efficacement l'énergie [5].

Dans le présent chapitre nous allons présenter d'une manière générale une description détaillée et les principaux composants de notre système hybride constitué par des panneaux photovoltaïque avec un système de stockage (batterie et SC) raccordées au réseau électrique. Ensuite, on va mettre l'accent sur les différentes stratégies de gestion de ces systèmes multi-sources.

1.2 Définition et architectures des SHER :

Un Système d'Energie Hybride (SEH) est une installation qui associe différentes technologies de génération d'énergie électrique : sources renouvelables, sources conventionnelles, dans le but de réunir les avantages de chaque système et offrir un rendement énergétique global plus élevé. Pour les sources propres, comme le photovoltaïque et l'éolien, elles ne délivrent pas une puissance constante à cause de leurs natures aléatoires. Cependant

l'association de ces dernières avec d'autres sources permet d'obtenir une production électrique continue [6].

Par définition, un système hybride de production d'électricité est un système combinant au moins deux sources d'énergie de natures différentes incluant souvent (mais pas nécessairement) un système de stockage d'énergie en mode connecté au réseau public ou en mode hors réseau. En général, les différentes configurations ou architectures des SHER se classent en trois catégories [7]:

1.2.1 Architecture à bus CC (courant continu) :

Dans le système hybride présenté dans la figure.1.1, les sources de production d'énergie sont connectées à un lien CC à travers des convertisseurs d'électronique de puissance appropriés (CA-CC, CC-CC). Le système peut ainsi alimenter des charges à courant alternatif (50 Hz ou 60 Hz) ou être relié au réseau électrique au moyen d'une interface de puissance dédiée (CC-CA) [8]. Dans cette structure, le problème de régulation de la fréquence est négligeable; cependant, pour les systèmes de moyenne et forte puissance, la régulation de la tension du bus CC demeure particulièrement difficile [9]. Cette architecture présente en outre l'avantage de ne pas nécessiter l'étape de synchronisation lors de l'ajout d'une source.

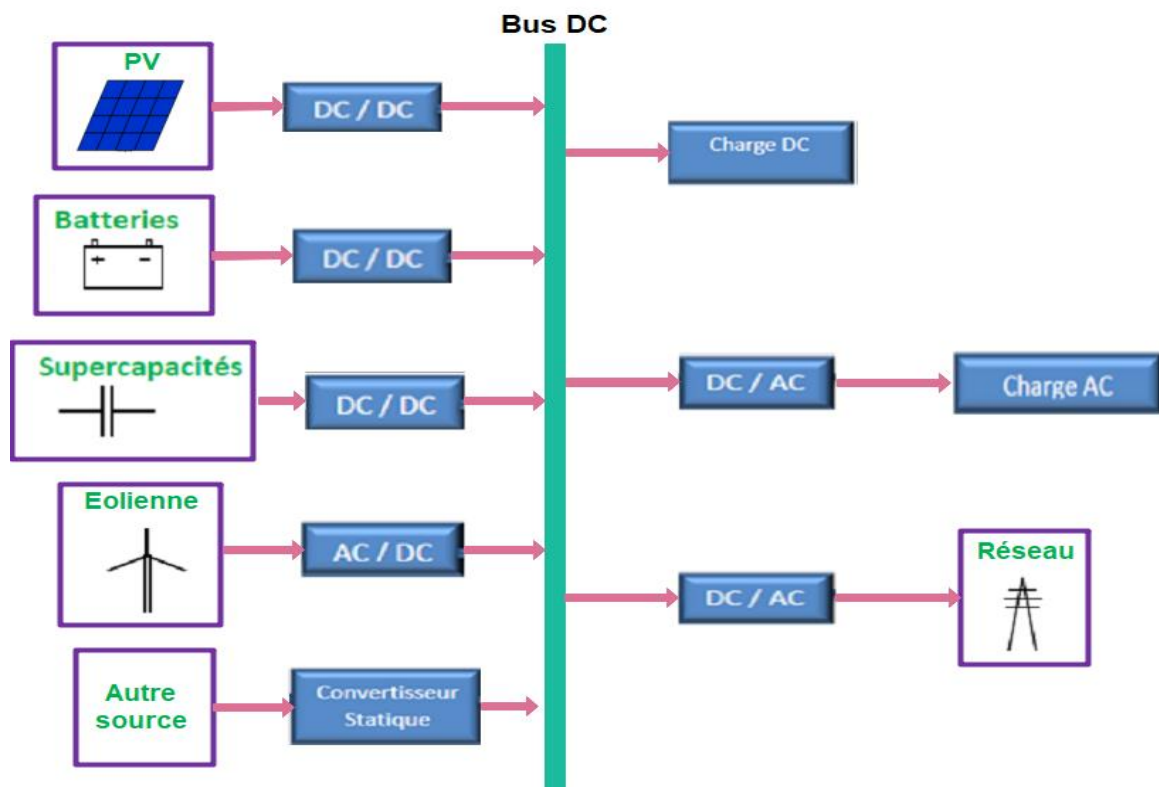


Figure.1.1. Structure à bus DC d'un système hybride.

1.2.2 Architecture à bus AC (Alternative continu):

C'est une structure utilisée pour le transport de la puissance dans les systèmes électriques [10, 11]. L'utilisation d'un bus AC est impérative dans le cas où toutes les puissances de toutes les entités de production ne sont pas collectées sur un bus DC.

Dans cette topologie, tous les composants du système hybride sont reliés à la charge alternative, comme montrée sur la figure (1.2). Cette configuration présente des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure, puisque chaque convertisseur peut être synchronisé avec son générateur de sorte qu'il puisse alimenter la charge indépendamment et simultanément avec les autres convertisseurs. Ceci offre une flexibilité pour que les sources d'énergie puissent satisfaire la demande de la charge. La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle, en synchronisant les tensions de sortie avec les tensions de charge [12]. En outre, le dimensionnement des onduleurs dits 'string' est relativement moindre, comparés au convertisseur central de la première structure.

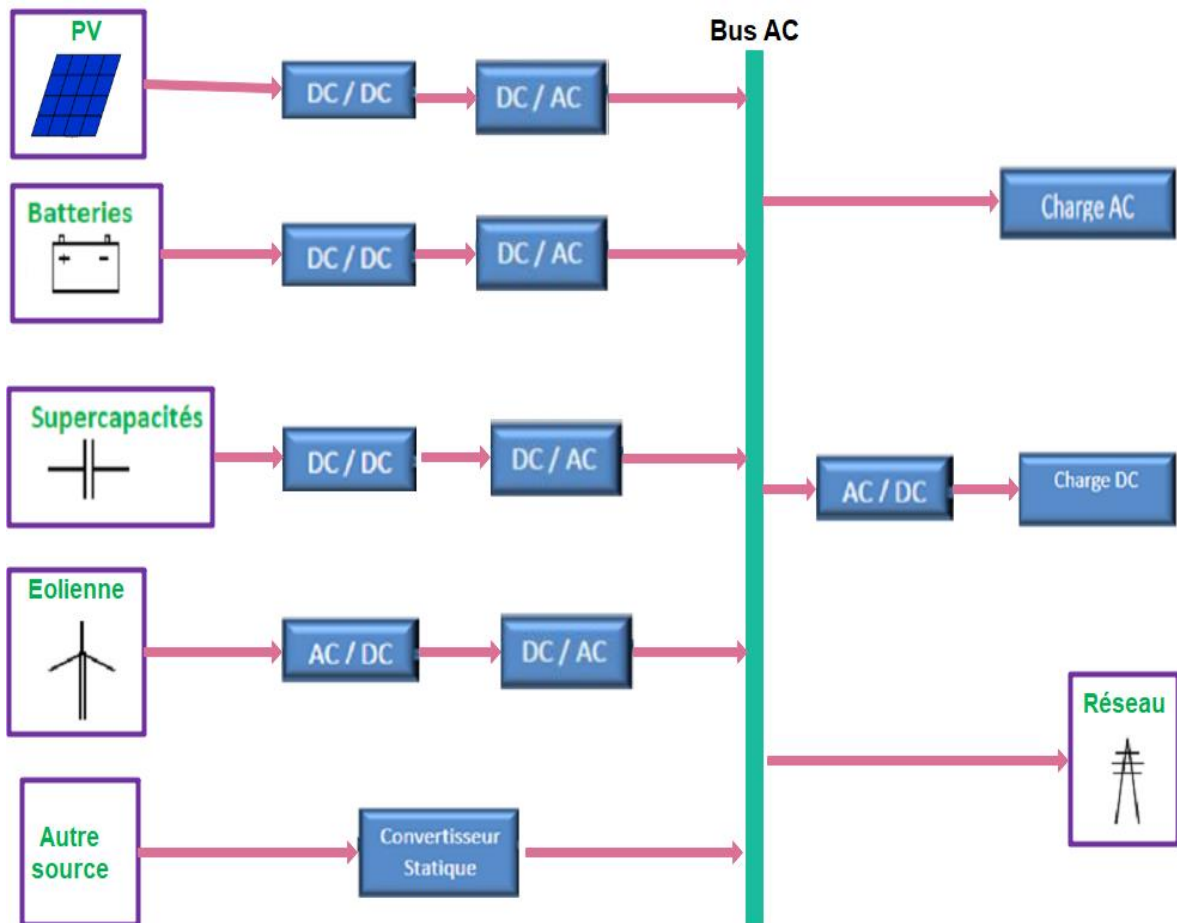


Figure.1.2. Structure à bus AC d'un système hybride.

1.2.3 Architecture à bus CC/AC (continu/alternatif) :

La figure.1.3 représente la structure à bus mixte (DC&AC) d'un système hybride [13]. Dans cette configuration, les sources d'énergie peuvent alimenter une charge alternative AC ou une charge continue DC par un convertisseur bidirectionnel qui réalise la conversion continue alternative et vice versa [14]. Cette structure permet de combiner les avantages des structures à bus CA et CC. Dans cette configuration, les sources d'énergie ou les charges électriques peuvent être directement connectées au bus avec ou sans l'interface de puissance. Par conséquent, le système permettra d'obtenir une meilleure efficacité énergétique à moindre coût. Cependant, le contrôle et la gestion de l'énergie dans la configuration hybride sont plus complexes que dans les configurations classiques CC ou CA [15].

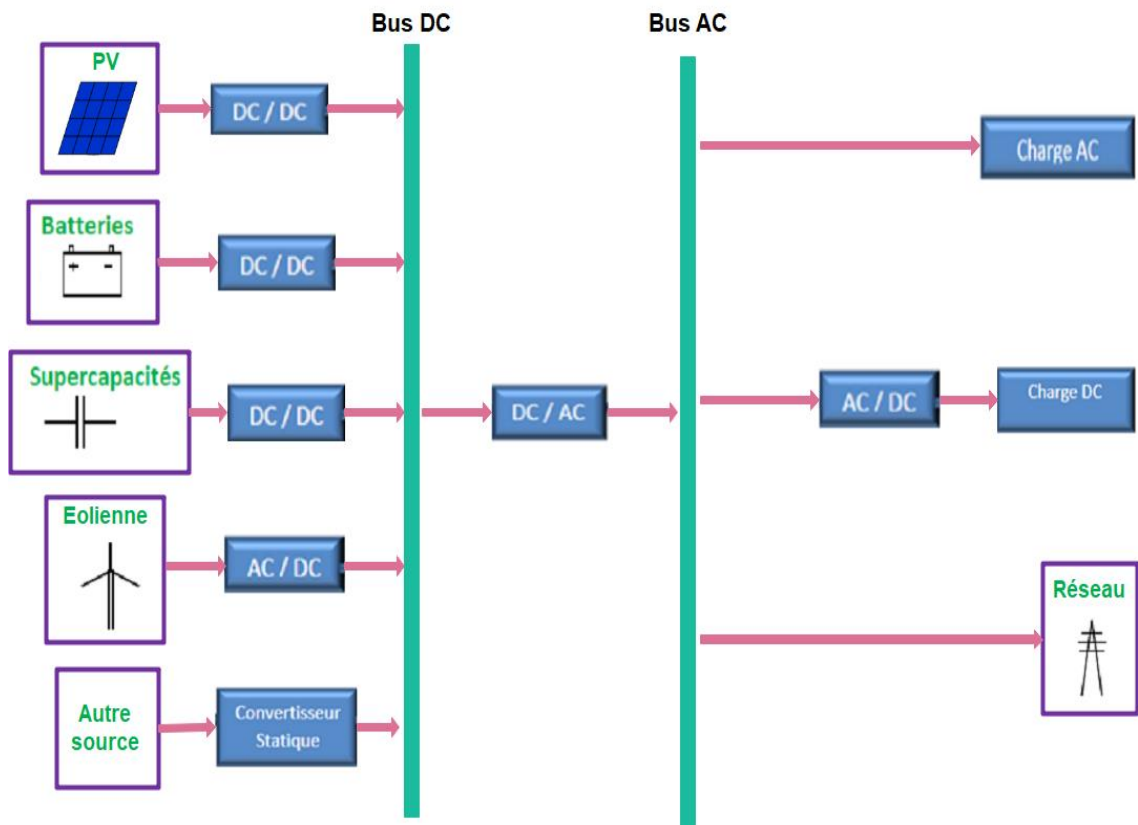


Figure.1.3. Structure à bus mixte (DC&AC) d'un système hybride.

1.3 Description des différentes sources utilisables:

Notre système d'étude est un système multi-sources à énergie renouvelable destiné à satisfaire les besoins en énergie d'un ascenseur électrique. Ce système est constitué d'une source d'énergie principale, représentée par des panneaux photovoltaïques; un système de stockage hybride constitué par un banc de supercondensateurs SC et des batteries plomb-acide, qui permettent de compenser le manque ou l'excès de production de l'énergie électrique dû à la

nature intermittente et fluctuante des ressources d'énergie renouvelable. Avant d'entamer le cœur du travail de recherche proposé dans cette thèse, une description brève des sources à puissance finie impliquées est donnée.

1.3.1 Conversion photovoltaïque :

Au cours des dernières années, la production de l'énergie photovoltaïque est développée rapidement. Les systèmes d'énergie photovoltaïque sont l'une des technologies de génération d'énergie les plus propres aujourd'hui avec un impact très faible sur l'environnement. L'énergie solaire est produite d'une conversion du rayonnement solaire en électricité par le biais de capteurs fabriqués avec des matériaux sensibles aux longueurs d'ondes visibles (nommée cellule PV). L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique statique courant tension I-V non linéaire et présente un point de puissance maximale (PPM) [16].

Une cellule élémentaire composée de matériaux semi-conducteurs est capable de convertir l'énergie de photons reçus à sa surface en une différence de potentiel, créée par une délocalisation d'électrons dans le matériau (fig. (1.4)) [17].

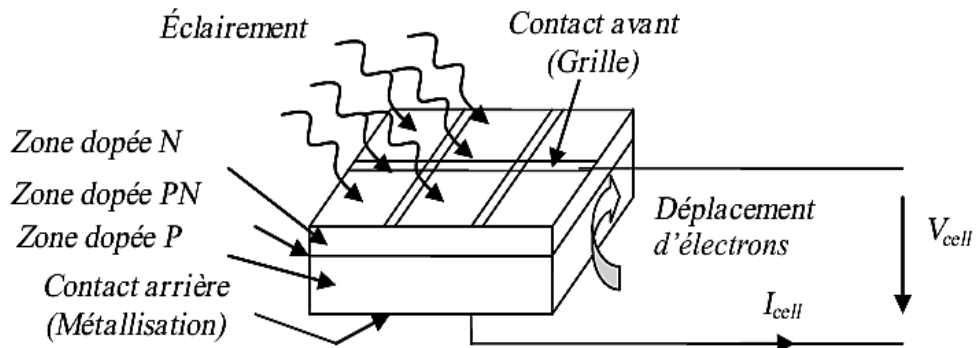


Figure.1.4. Structure d'une cellule photovoltaïque utilisant le silicium comme matériau PV.

Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de l'environs de 25% pour les cellules à base de silicium monocristallin, 14 à 18 % avec du silicium polycristallin et enfin 6 à 9% pour le silicium amorphe en films minces [18] [10, 19]. Le générateur est une combinaison en série et en parallèle des modules solaires, composés à leurs tours de 34 à 70 cellules selon la tension souhaitée.

1.3.2 Systèmes de stockage :

Les systèmes de stockage d'énergie sont des éléments essentiels dans les systèmes énergétiques et notamment ceux qui se situent dans les sites isolés [3]. Lorsque les sources d'énergies produisent plus que la demande, l'excédent d'énergie sera stocké dans les systèmes de stockage. L'énergie stockée sera exploitée lorsque les sources d'énergie sont hors service ou en état de production insuffisante. Il existe différents types de système de stockage, selon leurs natures : Source à énergie spécifique élevée (piles à combustible), moyenne (batteries), et source à puissance spécifique élevée (super condensateurs). Le stockage de l'électricité vise tout d'abord à répondre à quatre problématiques principales [20]:

- La récupération de la production d'énergie excédentaire par rapport à une demande à un instant donné.
- La fourniture d'énergie pour compenser l'insuffisance due au caractère intermittent de l'offre.
- La fourniture de l'énergie pour alimenter un pic de demande occasionnelle.
- La fourniture d'énergie en cas de défaillance du système électrique ou de mauvaise qualité du réseau local [21]. Les systèmes de stockage sont de plus en plus envisagés dans des applications telles que les véhicules hybrides [22], les réseaux de distribution, l'intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques, ...etc. L'utilisation de ces systèmes devrait offrir des possibilités en termes de gestion énergétique [23].

1.3.2.1 Batteries :

Les batteries d'accumulateurs sont les composants les plus connus et les plus utilisés pour un stockage électrochimique de faibles dimensions. Ils offrent des technologies matures et à des prix raisonnables et sont fabriqués à base d'une réaction d'oxydoréduction selon le principe de la pile afin d'emmagasiner une charge d'énergie électrique, qui peut être restituée pendant une décharge. Le rendement des batteries accumulateurs est autour de 85 % selon les types d'accumulateurs utilisés. Ces batteries sont composées de deux électrodes, l'anode et la cathode, plongées chacune dans une solution ionique et sous l'effet d'un courant de charge, une oxydation se produit au niveau des molécules de la cathode [11].

Il existe plusieurs technologies dans la fabrication des batteries se résumant à trois grandes familles [24].

1. La batterie Plomb-acide : c'est le plus ancien type de stockage électrochimique rechargeable et le moins cher.

2. La batterie Nickel-Cadmium : elle utilise deux électrodes en oxyhydroxyde de nickel et cadmium immergées dans un électrolyte alcalin.

3. La batterie Lithium : elle est couramment utilisée dans l'électronique embarquée et dans les produits de grande consommation tels que les ordinateurs, les téléphones portables et les tablettes.

Ainsi, pour une installation PV, l'unité de stockage est requise pour assurer un approvisionnement continu en énergie électrique. Parmi les nombreuses technologies de stockage, la batterie au plomb est la plus utilisée dans les installations PV. Ces batteries sont peu chères et leur technologie est maîtrisée. Elles comptent un grand nombre d'applications et permettent de fournir des courants importants. La batterie au plomb ne présente pas seulement des avantages. La densité énergétique du couple plomb/acide est assez faible [25]. Ces performances sont très dépendantes de la température. En dessous de 10°C, la puissance et la capacité sont alors fortement réduites. L'utilisation de batterie au plomb dans des pays froids nécessite un système de chauffage des batteries pour que ces dernières soient pleinement efficaces.

1.3.2.1.1 Caractéristiques électriques:

- Capacité en Ampère heure :

Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant.

-Température :

Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés. Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie [26].

- La durée de vie :

C'est le nombre de cycles charge/décharge que la batterie peut soutenir avant de perdre 20% de sa capacité nominale.

- Le taux d'autodécharge :

L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

- La tension d'utilisation :

Dans le cas de la décharge d'une batterie, la tension minimale acceptable est appelée tension seuil de décharge. La baisse au-dessous de cette tension est appelée décharge profonde, durant laquelle la batterie peut être endommagée. Dans le cadre du photovoltaïque, la tension seuil de décharge pour une batterie au plomb de 12V est de 11,7V. En ce qui concerne la recharge d'une batterie, une tension supérieure à la tension nominale doit être appliquée. Cependant, cette tension ne doit pas dépasser une certaine valeur appelée tension de charge maximale. Pour une batterie de 12V, la tension de recharge est comprise entre 12V et 14,4V [27].

1.3.2.2 Les super condensateurs

Le super condensateur est un système de stockage électrostatique. Grâce à sa structure poreuse, ce composant électrique permet de stocker des milliers de fois plus d'énergie électrique qu'un simple condensateur. À la différence des condensateurs classiques avec diélectrique, qui emploient un isolant et accumulent des charges sur deux armatures, les super condensateurs emploient un électrolyte peu visqueux qui remplit les pores des électrodes et assure la mobilité des ions ; l'isolement entre les deux électrodes se fait par l'intermédiaire du séparateur [28] [29]. Ces super condensateurs exploitent la double couche électrique qui apparaît à l'interface électrode électrolyte [30] [31]. Grâce à ce phénomène, le stockage d'énergie électrique se fait principalement sans réaction chimique. La Figure. 1.5 illustre la formation d'un double couche à l'interface électrode-électrolyte selon l'état déchargé ou chargé du super condensateur [32].

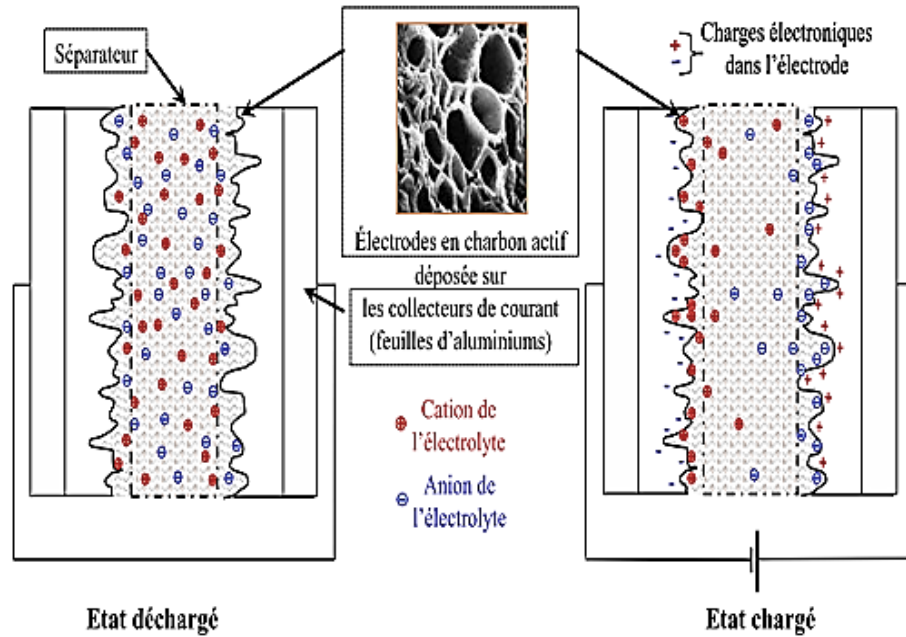


Figure.1.5.Composition d'un super condensateur.

Compte-tenu de leur puissance spécifique, les supercondensateurs sont de bons candidats dans le domaine de la traction électrique, pour l'hybridation des sources d'énergie embarquées. Ils permettent des cycles de charge et décharge à courant fort (plusieurs centaines d'ampères), ont une durée de vie très élevée (jusqu'à 1 million de cycles), un rendement énergétique très important (supérieur à 90%), et des caractéristiques relativement stables en température par rapport aux autres systèmes de stockage [32]. Actuellement, les super condensateurs sur le marché sont commercialisés sous forme d'éléments simples avec plusieurs niveaux de tension de 2,3 à 2,85 Volts suivant la technologie choisie, ou sous forme de modules composés d'une mise en série de plusieurs éléments. Dans ce contexte, on trouve de nombreux fabricants de supercondensateurs à l'échelle mondiale ; à titre d'exemple, Blue Solutions en France, NESSCAP en Corée du sud, PANASONIC au Japon et MAXWELL aux Etats-Unis. Par ailleurs, d'autres fabricants de taille modeste comme AVX, EVANS et ELTON (ESMA) proposent des supercondensateurs électrochimiques et hybrides [33] [34].

1.3.2.3 Convertisseurs :

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le DC en AC et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.

Un hacheur fait la conversion DC-DC, il est couramment utilisé pour maximiser l'énergie délivrée par les panneaux photovoltaïques grâce à un contrôle MPPT. Il est utilisé aussi pour adapter le niveau de tension du générateur PV à celui du bus DC. Les onduleurs autonomes imposent leur propre fréquence à la charge, alors que l'utilisation des onduleurs non autonome exige la présence d'une source CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles, mais sont aussi les plus chers [35].

1.3.2.4 Etude de l'entraînement d'un ascenseur :

Longtemps considéré comme un luxe, l'ascenseur est devenu de nos jours un élément indispensable de la vie quotidienne. Un ascenseur se compose d'une cabine qui se translate dans une gaine (aussi appelée trémie) généralement verticale. Cette cabine est supportée dans une structure parallélépipède appelée étrier, ou arcade, permettant le guidage et le support de la cabine. Ce dernier est réalisé par différents éléments [36]:

1. Une partie fixe : les deux guides, sont situés le long de la course de la cabine, de part et d'autre de la cabine. Ces guides ont habituellement une forme de T, bien que des guides ronds fussent utilisés.

2. Une partie mobile : les coulisseaux sont situés à chaque coin de l'étrier, et sont en appui sur les guides. Durant le déplacement de la cabine, ceux-ci glissent sur les guides.

1.3.2.4.1 Familles d'ascenseurs :

On distingue essentiellement deux types de familles d'ascenseur :

- les ascenseurs à traction à câble.
- les ascenseurs hydrauliques.

1.3.2.4.2 Les ascenseurs hydrauliques :

Les ascenseurs hydrauliques sont utilisés en général pour satisfaire des déplacements relativement courts de l'ordre de quinze à dix-huit mètres maximum. Plusieurs modèles existent sur le marché. On citera les ascenseurs hydrauliques [37] :

- à cylindre de surface
- à cylindre enterré
- télescopiques à cylindre de surface

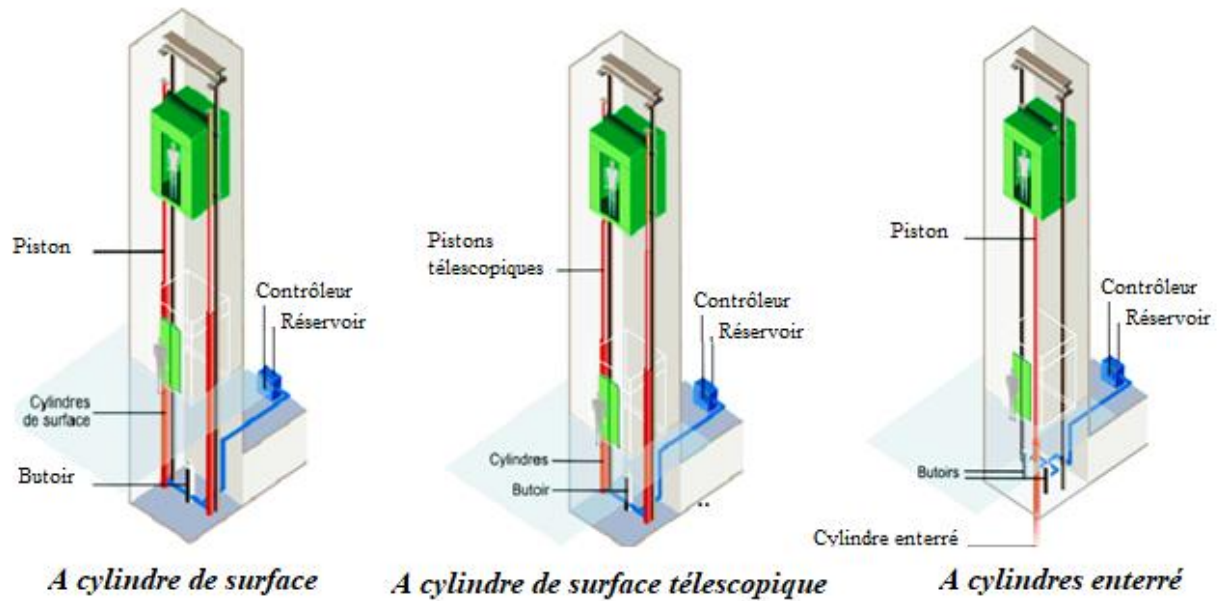


Figure.1.6. Différents ascenseurs hydrauliques.

1.3.2.4.3 Les ascenseurs à traction à câbles :

a. Description :

Les ascenseurs à traction à câbles sont les types d'ascenseurs que l'on rencontre le plus, notamment dans les bâtiments tertiaires. Ils se différencient entre eux selon le type de motorisation, et on distingue les trois types suivants [38]:

- à moteur treuil à vis sans fin.
- à moteur treuil planétaire.
- à moteur à attaque directe (couramment appelé "Gearless" ou sans treuil).

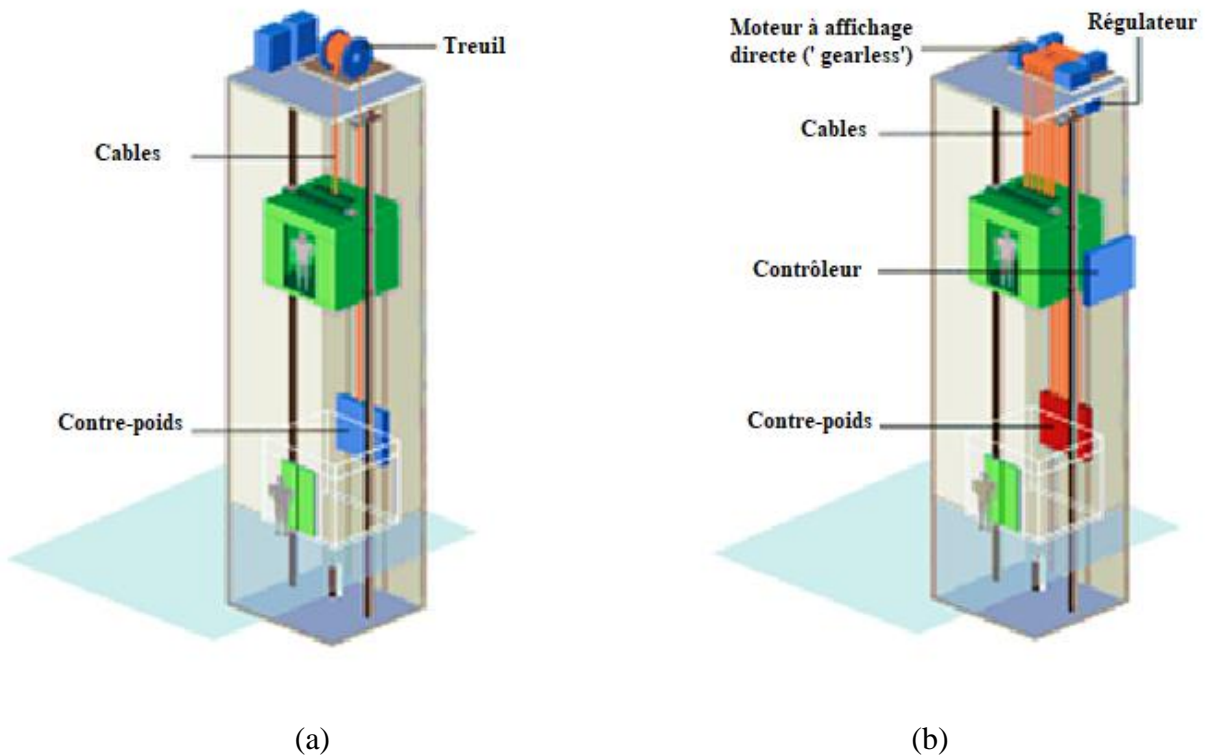


Figure.1.7. (a).Ascenseur à moteur treuil (b). Ascenseur à moteur à attaque directe.

b. Principe de fonctionnement :

La cabine est suspendue à un câble qui s'enroule sur une poulie à gorge et dont l'autre extrémité porte un contre poids. Le moteur entraîne la poulie par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse; la poulie entraîne le câble par adhérence. La cabine est équilibrée à demi- charge par le contre poids; il suffit donc d'un couple relativement faible pour mettre en mouvement la cabine. La puissance de la charge est positive pour le montée de l'ascenseur et elle est négative dans le décente [36].

Afin d'améliorer le rendement du système multi-sources, il faut assurer l'exigence de la charge sans interruption, protéger le système de stockage (l'élément clef dans les SEH) contre les surcharges et les décharges profondes. Par conséquent, prolonger sa durée de vie et optimiser au mieux la répartition de la puissance entre les différents éléments qui constituent le SEH, tout en réduisant la consommation du carburant et le coût du système. Pour satisfaire toutes ces exigences, un algorithme de gestion d'énergie du système hybride est recommandé.

1.4 Etat de l'art des stratégies de gestion d'énergie :

La gestion d'énergie définit la manière de répartir les flux de puissance entre les différents constituants d'un système hybride. Plusieurs stratégies ont été abordées dans la littérature et qui varient en fonction de la composition du système multi-sources et les objectifs visés par ce dernier. Particulièrement, ces approches ont été développés sur trois bases : soit sur des modèles mathématiques, soit sur l'expertise humaine, soit sur la base de simulations [39].

En littérature, les auteurs [40] [41] [42] [43] [44] présentent les principales stratégies de gestion de l'énergie, appliquées aux véhicules électriques, et qui peuvent être facilement adaptées au cas d'une SEH. Les stratégies de gestion de l'énergie peuvent être classées en deux grandes familles (Figure 1.8) :

- Stratégies à base de règles
- Stratégies basées sur l'optimisation

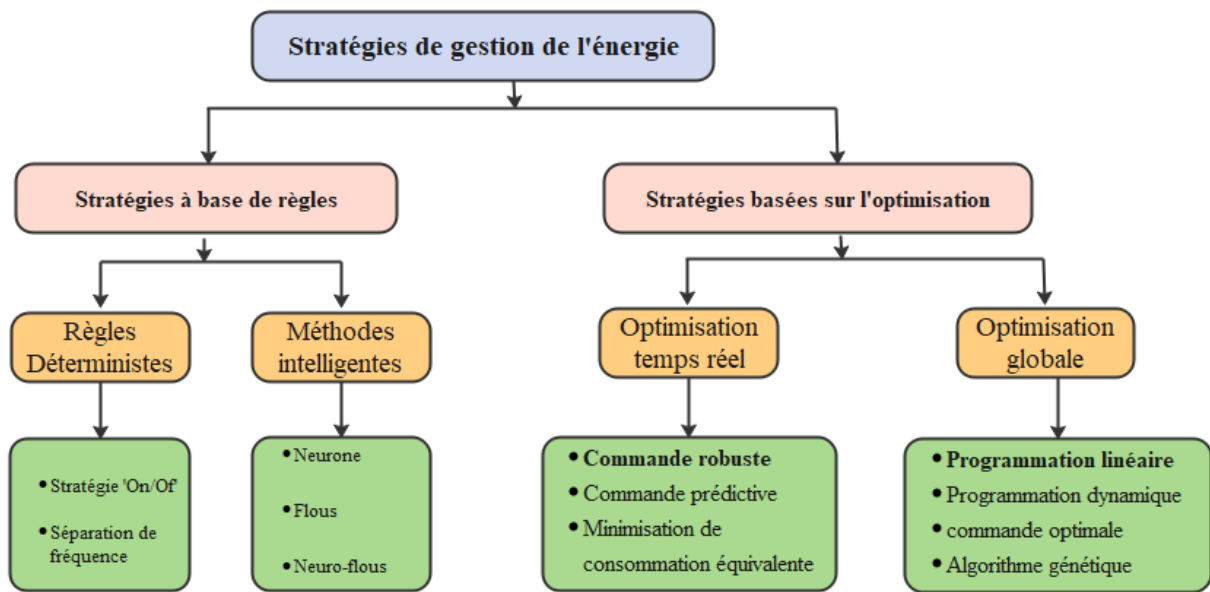


Figure.1.8.Classification des différentes stratégies de gestion de l'énergie.

1.4.1 Stratégies à base de règles :

L'aspect principal appliqué dans les approches de gestion de l'énergie à base des règles est leur efficacité en temps réel ainsi que le contrôle du flux de puissance dans l'entraînement hybride [45]. Ces stratégies peuvent être classées en stratégies à base de règles déterministes et méthode intelligente.

1.4.1.1 Les règles déterministes :

Les règles déterministes sont robustes et facilement paramétrables mais souffrent d'un manque de formalisme et de généralisation, ce qui les rend difficile à utiliser pour toutes les situations [46].

1.4.1.1.1 Stratégie « On ou Off » :

La stratégie thermostat On/Off est connue pour son efficacité, sa robustesse et son fonctionnement en temps réel. Le principe est très simple et similaire au principe du thermostat électromécanique [47]. La répartition de puissance dépend principalement de l'état de charge de la source de stockage secondaire. Il faut garder le SOC entre les deux bornes supérieure et inférieure prédéfinies, comme illustré sur la Figure 1.9 [48]. Le choix de cette fourchette est généralement fait de façon à faire fonctionner la source de stockage autour de sa meilleure performance globale. Dans ces travaux [49] [50], cette stratégie a été utilisée avec différentes configurations du système multi-source pour une application automobile.

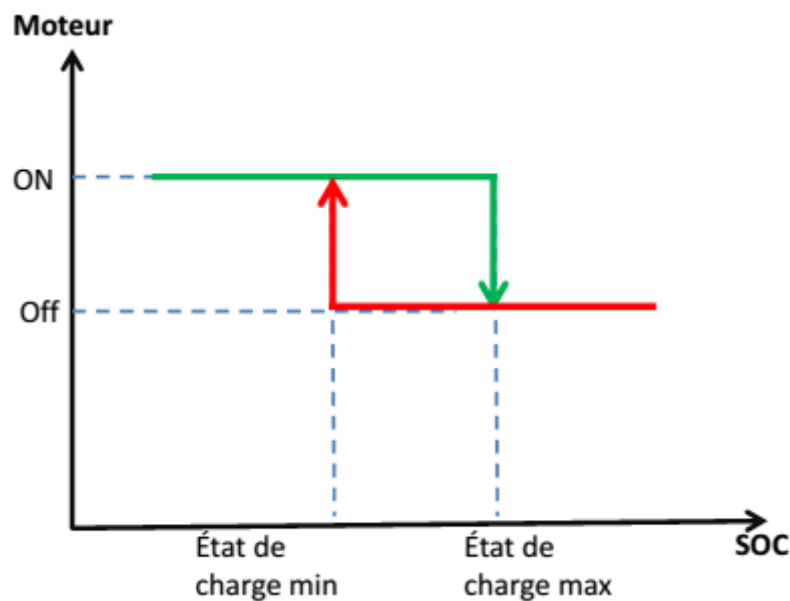


Figure.1.9.Principe de la stratégie de thermostat « On ou Off ».

En général, cette stratégie ne peut pas toujours satisfaire la demande en puissance du véhicule électrique. De plus, elle présente un risque de phénomène dit de « chattering » (permutations intempestives d'algorithmes) lorsque le système fonctionne au voisinage de deux modes de fonctionnement. Ceci engendre de fortes sollicitations de courant avant d'obtenir une convergence vers la valeur finale (état stable) [39].

1.4.1.1.2 Stratégie de séparation de fréquence :

La gestion fréquentielle d'énergie se base sur la décomposition haute/basse fréquence du profil demandé (Figure.1.10). Elle permet d'exploiter les particularités intrinsèques des sources de stockage utilisées. Ce type de partage impose aux supercondensateurs de prendre en charge les pics de puissance et affecte aux batteries les composantes basses fréquences [51].

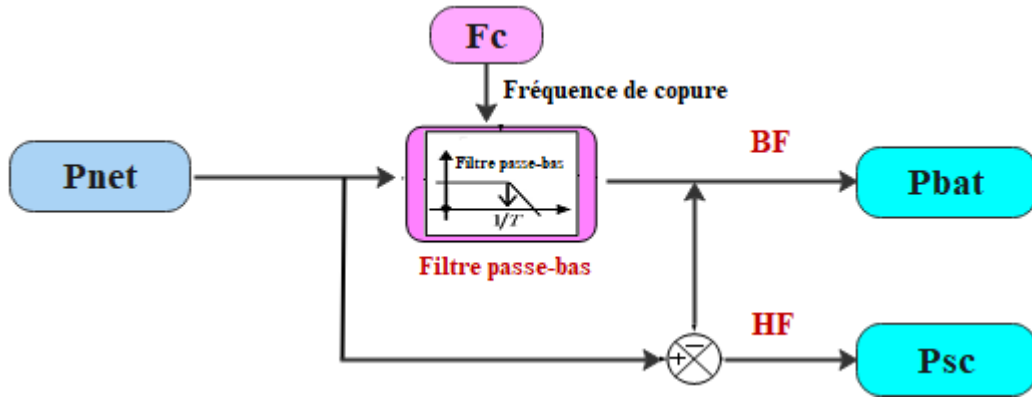


Figure.1.10.Principe de la stratégie de gestion « partage fréquentiel ».

Ceci peut être obtenu à l'aide d'un filtre passe-bas caractérisé par une fréquence de partition (F_c : autrement nommée fréquence de coupure) qui a évidemment un effet direct sur les contraintes appliquées au pack batterie. L'effet de cette fréquence impacte également le dimensionnement des supercondensateurs puisque la constante de temps du courant qui les traverse en est modifiée.

Une stratégie de gestion d'énergie basée sur le principe de la séparation fréquentielle est proposée par [52]. En fait, elle consiste à partager la puissance demandée par la charge résidentielle entre les différents composants du système, sources et/ou éléments de stockage tout en respectant les caractéristiques dynamiques, techniques et énergétiques des différents organes. Le principe de la décomposition fréquentielle est illustré sur la Figure.1.11.

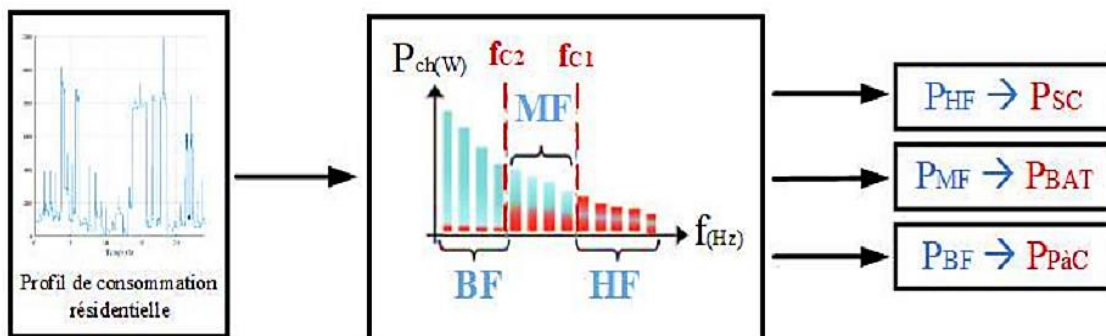


Figure.1.11.Principe de la décomposition fréquentielle de puissance.

Cependant, chaque composante de puissance sera transmise à travers un filtre passe-bas à une source ou à un élément de stockage approprié sous forme d'un courant de référence. En fait, la partie haute fréquence sera gérée par les SCs tout en respectant la variation de son état de charge SOC. Ceci est justifié par le fait que les supercondensateurs sont des éléments de stockage électrostatique rapide. Dans le but d'améliorer sa durée de vie et de minimiser la quantité d'hydrogène consommée, seule la partie basse fréquence sera gérée par la PàC vu sa dynamique lente. Aussi les auteurs dans [53] proposent une stratégie de gestion d'énergie basée sur la méthode de la séparation fréquentielle en vue de prolonger la durée de vie de la pile à combustible et par conséquent de diminuer l'investissement sur les éléments de stockage. La validation expérimentale de la méthode de séparation fréquentielle a été élaborée à travers un dispositif expérimental réalisé au laboratoire LSE-ENIT. Une autre stratégie fréquentielle adaptative développée par [54] consiste à faire fonctionner le supercondensateur dans une gamme de tension correspondant à un intervalle bien défini et sécurisé. L'idée de la résolution du problème de gestion de l'énergie par séparation en fréquences adaptatives est de maintenir la tension des supercondensateurs dans un intervalle de protection donné en remplaçant le filtre fixe présenté dans la stratégie de base par un répartiteur de fréquence adaptatif.

Et en fin [55] propose aussi dans ses travaux de recherche de nombreux dispositifs intégrant des outils qui permettent la gestion fréquentielle optimale de l'énergie selon les différents profils de mission du véhicule. L'une de ses principales contributions consiste à filtrer a priori avec un filtre de lissage numérique la puissance demandée, de façon à affecter les puissances de traction basse fréquence à la source principale (pile à combustible), et l'élément de stockage prend en charge les puissances positives haute fréquence d'une part et pour des puissances négatives, assure la possibilité de déstocker l'énergie de freinage.

1.4.1.2 Stratégies basées sur des règles prédéfinies (Intelligence artificielle):

Ces dernières années, de nombreuses études ont été menées sur la gestion de l'énergie des systèmes hybrides utilisant des techniques intelligentes telles que l'algorithme génétique le réseau de neurones artificielle (RNA), la Logique Floue (LF) et le Neuro-Floue (NF) [56], entre autres. Ces techniques ont les avantages de soutenir la modélisation imprécise du système et fournir des performances très élevées. Pour ces raisons, ce genre de techniques est adopté dans le présent travail. Les paragraphes suivants examinent certaines de ces études.

1.4.1.2.1 Les règles floues :

La logique floue, par sa capacité à reproduire le raisonnement humain semble adaptée à la répartition de puissance dans un système hybride. Cette technique ne fait pas intervenir de

relations mathématiques directes, mais utilise plutôt des inférences avec plusieurs règles définies via l'expertise acquise dans le champ d'application comme montré sur la figure.1.12. Les règles floues sont très pratiques dans le cas où la modélisation analytique du système est complexe. Les contrôleurs flous (FLC) sont les plus utilisés en raison de leur indépendance d'un modèle mathématique du système à contrôler [57].

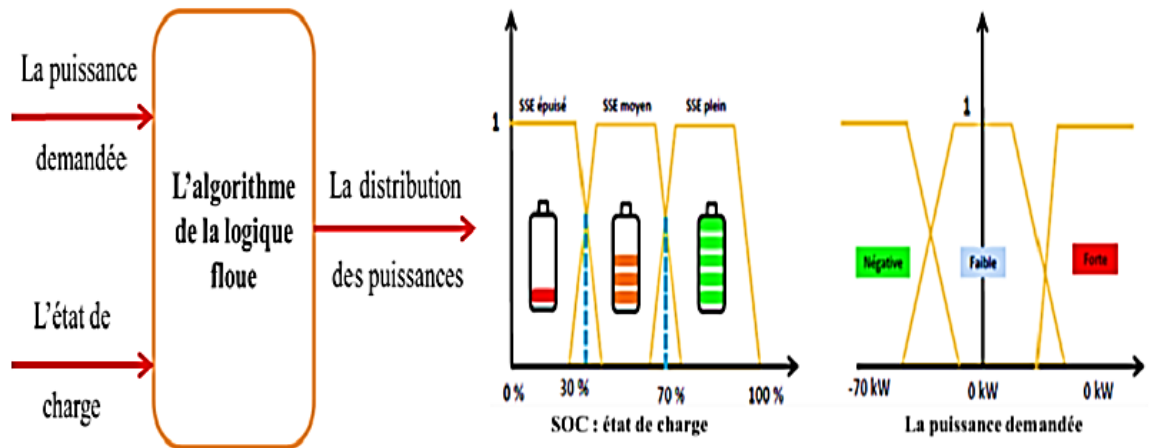


Figure.1.12.Principe de la logique floue.

Des chercheurs comme Gao, Caux, Erdinc ont appliqué l'approche de la logique floue pour des systèmes hybrides avec pile à combustible [58] [59]. Les auteurs dans [60], ont considéré que le partage de puissance basé sur le superviseur par logique floue dépend du courant de la charge et du SOC des SC. Cette stratégie de gestion ne prend pas en compte les variations de fréquence du courant de la batterie, mais cela augmente l'efficacité globale et les performances de l'ensemble du système. Afin d'optimiser l'état de fonctionnement du système de stockage d'énergie hybride dans les véhicules électriques, une nouvelle stratégie de commande par logique floue est proposée par [61]. Des autres études dans [62] proposent une stratégie de gestion basée sur la logique floue adaptative (AFEMS) pour déterminer la répartition de puissance entre la batterie et le pack des supercondensateurs. Un contrôleur par logique floue est utilisé en raison du problème de contrôle en temps réel complexe, et présente l'avantage de ne pas nécessiter la connaissance du cycle de conduite à l'avance. Les objectifs de ce contrôleur par logique floue adaptative sont de maximiser l'efficacité du système, de minimiser la variation de courant de la batterie et de minimiser la différence d'état de charge (SOC) des UC.

1.4.1.2.2 Les réseaux de Neurones artificiels :

Les modèles de réseaux neuronaux sont des modèles informatiques conçus pour émuler les capacités de traitement de l'être humain (mémorisation et raisonnement), et constituent une approche permettant d'aborder et de formuler mathématiquement des problèmes de perception, de mémorisation, d'apprentissage et de raisonnement [63]. Les réseaux de neurones présentent un modèle mathématique, ayant la capacité d'apprendre et de traiter des données en parallèle. Ils comprennent de nombreuses couches, reliées entre elles par des coefficients de poids. Le RN est presque un système adaptatif qui change sa structure en fonction d'informations externes ou internes qui circulent à travers le réseau pendant la phase d'apprentissage. Le RN est généralement définie par trois types de paramètres, comme illustré à la figure 1.13 [64]:

1. Le modèle d'interconnexion entre les différentes couches de neurones.
2. Le processus d'apprentissage pour mettre à jour les poids des interconnexions.
3. La fonction d'activation qui convertit l'entrée pondérée d'un neurone en son activation de sortie.

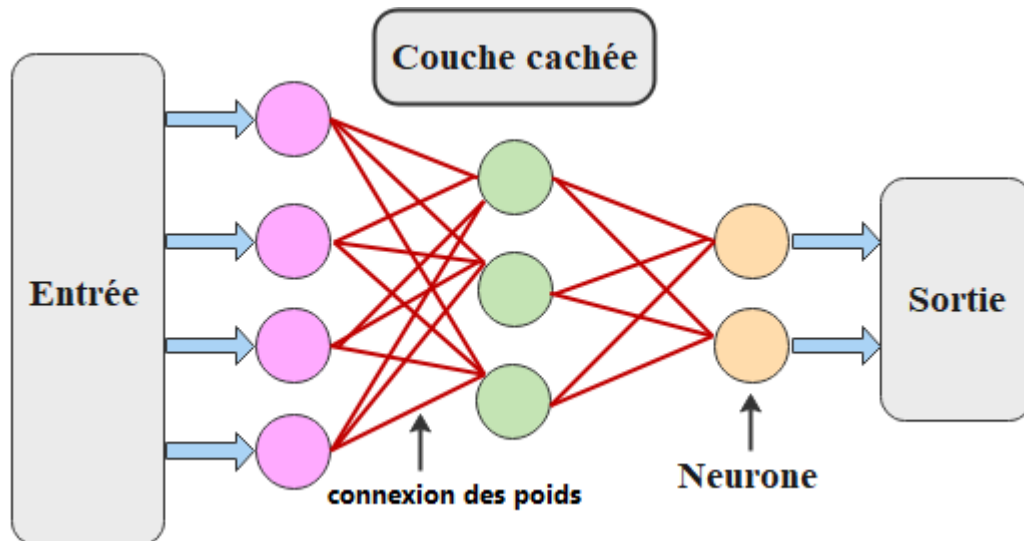


Figure.1.13.Structure générale de NN.

En général, les performances du réseau de neurone et son utilisation sont significativement affectées par la sélection des variables d'entrée et de sortie. L'algorithme a été choisi en raison de ses caractéristiques robustes et de sa capacité d'adaptation face à un très grand volume de données en temps réel. Cette approche est récente dans le domaine de l'électronique de puissance et des entraînements de moteurs. Dans ce domaine, l'application du réseau neuronal (RN) à l'identification des systèmes, au contrôle de processus, à la prédiction, au diagnostic, etc. Est

largement soulignée. Dans le domaine de l'électronique de puissance, l'application de NN a accompli de grandes améliorations[65].

Par conséquent, les NN nécessitent une phase d'apprentissage. Celle-ci s'effectue par expérience, il faut donc une importante base de données pour que le réseau soit confronté à toutes les situations possibles. Ceci est la limitation principale de la méthode [15], 66].

La théorie de RN a été utilisée dans la travaille de [67], dont les auteurs ont présenté une technique de supervision de l'énergie pour un système hybride batterie / supercapacité, en combinant les méthodologies de la programmation dynamique et (RN) pour développer une stratégie efficace de gestion de l'énergie en temps réel. La programmation dynamique (PD) est utilisée pour obtenir un flux de courant global optimal dans le système de stockage d'énergie hybride. Un contrôleur de gestion d'énergie intelligent en ligne est ensuite mis en œuvre sur la base de l'apprentissage de RN à l'aide des résultats d'optimisation par la PD. Cette combinaison de PD et NN peut approcher la stratégie de contrôle presque optimale en temps réel, et aussi Ates en [68] a fourni un contrôleur de supervision à base de réseau neuronal en utilisant la méthode *Adaptive Linear Neural Network* (ADALINE) pour définir la puissance délivrée par un système de pile à combustible dans un véhicule hybride.

Tandis que Kerdphol et al en [69] présente une nouvelle méthode pour la gestion en ligne intelligente de la puissance active et réactive d'un système de stockage d'énergie par batterie (SSEB) basée sur un réseau neuronal à fonction de base radiale (RBFNN) incorporant l'optimisation de l'essaim de particules (PSO) pour empêcher le micro-réseau de l'instabilité et de l'effondrement du système. Le BESS est contrôlé de manière centralisée par un contrôleur développé par le RBFNN proposé. PSO est utilisé pour déterminer la puissance active et réactive optimisée à chaque situation de changement de charge / génération pour surveiller l'effet de la régulation de fréquence, de tension et de puissance de référence du système. Ces données de puissance optimisées sont ensuite utilisées comme données cibles pour le processus de généralisation et d'apprentissage RBFNN. Pour permettre la mise à jour en ligne des paramètres de fonctionnement, le RBFNN proposé est implémenté dans le processus de gestion. Avec une formation RBFNN appropriée, la puissance active et réactive optimale peut être obtenue directement sans qu'il soit nécessaire d'effectuer le processus d'optimisation (PSO) à tout changement de charge / génération. Le RBFNN proposé convient à l'estimation en ligne de la puissance active et réactive du BESS et peut être utilisé pour la gestion du stockage d'énergie en temps réel en tant que contrôleur en ligne.

De plus Askarzadeh en [70] et Prokhorov en [71] ont également utilisé le même type de RN, mais combiné avec la logique floue pour avoir plus de possibilités. L'inconvénient de cette approche est d'une part la formation du processus de connaissance, qui exige une grande base de données obtenue expérimentalement et d'autre part le manque de preuve de stabilité.

1.4.1.2.3 Le système multi-agent (SMA) :

Bien qu'il n'y ait pas de définition unique pour un SAM dans la littérature, les chercheurs ont utilisé les mêmes concepts de base pour le définir. En fait, un SMA peut être défini comme étant un système constitué de plusieurs agents, qui interagissent entre eux dans un environnement. Ces agents agissent sur le système avec différents buts et motivations. Pour interagir avec succès, ils devront avoir la capacité de coopérer, se coordonner, et négocier entre eux, à peu près comme les personnes le font [72].

La hauteur dans [73] présente l'application du principe des systèmes multi-agents (SMA) pour la gestion d'énergie d'un système multi-sources d'un générateur photo voltaïque (PV), de batteries et d'une pile à combustible (PàC) et du réseau. Ensuite, la création d'un modèle de simulation du système permet de valider le principe imaginé. Pour la première fois, ces résultats montrent expérimentalement le fonctionnement d'un SMA pour la gestion d'énergie. Dans l'architecture de la fig. 1.14, chaque élément est géré séparément par un agent, et possède ainsi une certaine autonomie. Afin de coordonner les actions des différents éléments, les agents peuvent communiquer entre eux, en s'échangeant des messages. Sur ce principe, le contrôle de la tension du bus n'est pas assuré en permanence par le même élément. Un jeton virtuel, représentant le contrôle de la tension, est échangé entre les agents. Ainsi, si un élément est en défaut, l'agent associé peut alors proposer ce jeton à un autre élément, et la fiabilité du système est augmentée.

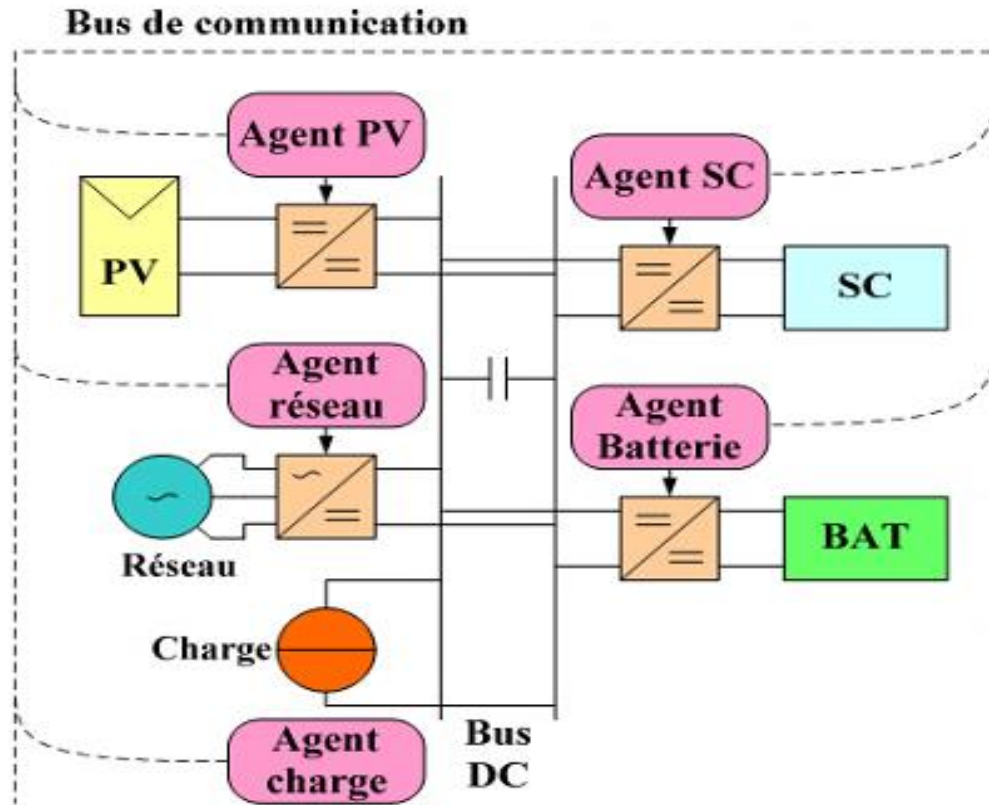


Figure.1.14. Structure d'un système hybride géré par le technique multi-agent.

La technique des systèmes multi-agents, avec son caractère distribué et adaptatif, peut être un outil intéressant pour le contrôle de chaque composant du micro réseau et pour la prise de décision en temps réel liée à la gestion des micros réseaux. L'article de [74] commence par une présentation des micros réseaux et de leurs problèmes spécifiques, et suit avec quelques concepts de base sur les systèmes multi agents. Ensuite, une revue des techniques et algorithmes proposés qui impliquent des systèmes multi-agents dans la gestion des micros réseaux sont présentée, en mettant l'accent sur la sécurité et la fiabilité des micros réseaux. La technique MA, telle que présentée dans cet article, est très prometteuse et peut être un excellent candidat pour le fonctionnement des micro-réseaux dans les travaux futurs, en particulier dans le diagnostic prédictif, qui est un enjeu qui doit être considérablement étudié et développé par les chercheurs

1.4.2 Les stratégies basées sur l'optimisation:

Les règles déterministes sont faciles à mettre en place et permettent d'assurer la propulsion du véhicule dans toutes les situations. Cependant, lorsqu'elles sont issues de l'expertise des ingénieurs, elles sont éloignées de la solution optimale. C'est pourquoi de nombreux auteurs utilisent une méthode d'optimisation hors ligne, dont les deux principales sont la DP et le PMP, pour améliorer les performances de cette méthode. Cette optimisation est faite pour un cycle

spécifique. Pour être représentative des conditions réelles d'utilisation d'un véhicule, la performance de la méthode optimisée doit alors être jugée sur un cycle inconnu [75].

Le problème d'optimisation consiste ici à déterminer les commandes qui assurent la minimisation (ou la maximisation) d'un indice de performance « $J(X)$ » tout en respectant les contraintes imposées (tant qu'elles existent).

L'avantage des stratégies basées sur l'optimisation telles que la programmation dynamique et la théorie de la commande optimale, est qu'elles permettent d'obtenir des solutions exactes au problème de gestion d'énergie dans un système hybride, en utilisant la minimisation d'un critère, tenant en compte soit l'autonomie, les pertes d'énergie, la durée de vie des stockeurs, la récupération d'énergie au freinage [55]. Néanmoins, les nombreux paramètres qui entrent en jeu, ainsi que la nécessité permanente d'adaptation à l'environnement et la connaissance a priori du cycle de puissance demandée (trajet effectué par le véhicule) empêche ces méthodes d'être directement embarquées à bord [76]. De plus, ces méthodes étant globales, il est très difficile d'en extraire des informations sur des méthodes d'optimisation généralisables à différentes situations ou configurations [77]. Ces méthodes d'optimisation ont pour objectif de trouver le contrôle optimal des flux de puissance d'un système multi-source.

1.4.2.1 La Programmation dynamique:

La programmation dynamique (PD) est une technique qui permet de résoudre un problème d'optimisation globale à travers une séquence de calculs successifs. La théorie de cette méthode est basée sur le principe d'optimalité de Bellman formulé en 1957 [78]. Pour en savoir plus sur la programmation dynamique, le livre Bertsekas [79] est la meilleure référence. C'est l'approche la plus utilisée dans la littérature pour résoudre les problèmes de gestion d'énergie pour différentes applications.

La programmation dynamique permet d'obtenir une solution globalement optimale, mais son temps de calcul élevé et la nécessité de connaître exactement le trajet rend cette méthode inutilisable en temps réel. C'est la conclusion à laquelle sont arrivés A. Brahma et al. [80] dès l'année 2000. Lin et al. [81] ont mené une étude portant sur la Programmation Dynamique Stochastique (PDS) pour s'affranchir de la dépendance au cycle dont souffre la DP. Cette méthode permet donc de résoudre le problème en temps réel. La PDS est basé sur un outil appelé "chaîne de Markov" qui permet de déterminer les conditions futures en fonction des conditions présentes uniquement. Elle est généralement utilisée sur la puissance ou la vitesse.

Dans les travaux de Y. Rifffonneau dans [82] et [83] utilise la programmation dynamique pour déterminer la gestion optimale des flux énergétiques dans un système hybride composé des panneaux PV et des batteries, connecté au réseau électrique. La fonction objective choisie dans ces recherches est le revenu : la différence entre l'énergie achetée du réseau et celle vendue au réseau. Il fait une optimisation réactive, c'est-à-dire que les données d'entrée (puissance générée par les panneaux PV, puissance consommée par les charges du réseau, puissance échangée avec le réseau et les tarifs d'achat et de vente de l'électricité) qu'il utilise la veille sont prévisionnelles et une deuxième optimisation est réalisée si les données mesurées à chaque pas de temps (le pas de discrétisation est de 10 minutes) sont différentes de celles prévues. Les variables de sortie sont les références de puissance pour la batterie et la puissance échangée avec le réseau de distribution.

1.4.2.2 Commande optimale:

La commande optimale est basée sur “ le Principe du Maximum de Pontryagin PMP ”. Cette dernière fait partie des stratégies d'optimisation hors ligne mais elle peut être adaptée à des méthodes de résolution en ligne. En effet, elle permet de déterminer la répartition optimale de puissance en temps réel dans les systèmes hybrides en maximisant ou minimisant un critère bien déterminé. Il est à noter que l'hybridation des stratégies de gestion d'énergie en combinant les stratégies basées sur les règles prédéfinies avec les stratégies d'optimisation en ligne ou hors ligne est de plus en plus utilisée dans les activités de recherche. Ceci permet d'exploiter les différents avantages offerts par chaque stratégie [52] [32].

J. Bernard et al. [84] S'intéressent à l'optimisation d'un véhicule hybride pile à combustible/batterie. L'objectif est de minimiser la consommation d'hydrogène en respectant certaines contraintes telles que les limites de puissance ou la dynamique du système. Pour cela les auteurs ont mis en place une stratégie en temps réel, proche de l'ECMS et dérivée de la solution optimale. L'idée de base de cette stratégie repose sur la variation périodique du facteur d'équivalence, en se basant sur la demande de puissance de la part du conducteur et l'estimation de l'écart par rapport à la consigne de SOC.

Afin d'obtenir une économie de carburant presque optimale pour les véhicules électriques hybrides rechargeables (PHEV) en utilisant la stratégie de consommation minimale équivalente (SCME), il est nécessaire d'ajuster dynamiquement le facteur d'équivalence (FE), identifié comme Un facteur d'équivalence peut donner de mauvaises performances ou même rendre le véhicule incapable de terminer le trajet, lorsqu'il est utilisé sur un cycle différent de celui pour lequel il a été optimisé.

Il faut normalement définir deux facteurs d'équivalence, l'un caractérisant la charge et l'autre la décharge. Contrairement aux approches basées sur des modèles largement utilisées, les auteurs dans [85] proposent une stratégie de consommation minimale équivalente basée sur les données qui détermine l'FE à l'aide d'un réseau de neurones artificiels (ANN). Premièrement, une comparaison du principe de minimum de Pontryagin (PMP) avec l' SCME est effectuée. Ensuite, un ANN est construite avec trois variables d'entrée accessibles, y compris la puissance demandée actuelle, le rapport de la distance parcourue et l'état de charge de la batterie (SOC). Le réseau neuronal est ensuite formé à l'aide de profils de vitesse réels. Les simulations sont effectuées en considérant différentes valeurs de SOC initiales. Les résultats révèlent que l' SCME basé sur les données proposées démontre une économie de carburant satisfaisante par rapport aux méthodes d'optimisation globale comme la programmation dynamique et les méthodes PMP. Le temps de calcul de la méthode proposée par rapport à la durée du voyage entier indique un grand potentiel pour le développement d'une stratégie de gestion de l'énergie consciente du temps.

1.4.2.3 Commande prédictive:

Le contrôle prédictif “ MPC Model Prédictive control ” s'appuie sur l'estimation de la future demande de la charge. En fait, cette stratégie est plutôt adaptée aux systèmes contenant plusieurs entrées sorties. En effet, si elle est utilisée dans le cadre des systèmes contenant un nombre réduit d'entrées et de sorties, les stratégies à base des règles deviennent plus efficaces en termes de temps d'exécution [86]. Comme dans [87] une étude comparative a permis de positionner la commande MPC par rapport aux stratégies à base de règles. Le résultat de cette étude confirme que la commande MPC est moins performante en termes de temps de convergence et d'optimalité de la solution que les stratégies à base de règles. Le système de gestion de l'énergie basé sur le contrôle prédictif (MPC) est un autre type de méthode 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 problèmes avec des structures complexes et pourrait affecter le temps de réponse [88].

La prédiction d'un cycle complet est fortement dépendante des paramètres environnementaux tels que le trafic ou la météo. L'idée de base est alors de séparer le trajet en pas de temps, p étant appelé l'horizon de prédiction [15]. La stratégie se décompose alors en quatre étapes :

1. Prédiction du trajet sur l'horizon de prédiction, en se basant sur l'état actuel du véhicule
2. Résolution du problème d'optimisation ce qui mène à une séquence de contrôles optimaux
3. Application de la première valeur de la séquence

4. Itération

Cette stratégie de contrôle a été utilisée dans plusieurs travaux, comme dans [89], le système de gestion de l'énergie utilisé pour réaliser un bon fonctionnement des sources d'énergie hybride est basé sur un contrôle prédictif pour un tramway alimenté par un système hybride qui se compose de FC – batterie – SC. Des simulations pour le cycle réel du tramway montrent l'adéquation du groupe motopropulseur et de la stratégie de contrôle proposés. En outre, Sneha. M dans [90] propose la stratégie de commande basée sur la prédiction de modèle dynamique pour obtenir le courant optimale de gestionnaire d'énergie. Pour optimiser les efforts de contrôle et la complexité de calcul du problème d'optimisation, la stratégie de contrôle est utilisée à deux niveaux. Le modèle de contrôle prédictif (MPC) est utilisé comme boucle de contrôle externe qui fournit des références de courant optimales et la boucle de contrôle interne qui est conçue à l'aide du contrôleur PI.

1.5 Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons présenté une description générale des différentes sources d'énergie utilisées dans le SEH étudié dans cette thèse, notamment les panneaux photovoltaïques et les éléments de stockage d'énergie (batterie et SC), en présentant d'une manière brève les principes. Ensuite, une lecture bibliographique sur les techniques de gestion d'énergie des systèmes hybrides a été brièvement donnée. En fait, la connaissance du principe de ces stratégies permet de faire un choix argumenté de la méthode utilisée dans le présent travail. Les techniques précitées permettent de gérer adéquatement le flux d'énergie du système multi-sources. Ainsi, le chapitre suivant sera consacré à la modélisation et à la simulation des composantes du SEH.

1.6. Références du chapitre 1:

- [1] Zhou, Z., "Modeling and power control of a marine current turbine system with energy storage devices", Thèse de doctorat, Université de BRETAGNE OCCIDENTALE, 2014.
- [2] Hellel, E.K. "Fiabilité des systèmes énergétiques multi-sources", Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri, 2019.
- [3] Saad, Y., "Gestion optimale des systèmes hybrides pour la production de l'énergie dans les sites isolés", Thèse de doctorat, Université de Technologie Belfort- Montbéliard, 2018.
- [4] Stoyanov, L., G. Notton, and V. Lazarov, Optimisation des systèmes multi-sources de production d'électricité à énergies renouvelables. *Revue des énergies renouvelables*, 2007. **10**(1): p. 1-18.
- [5] Tiar, M., "Gestion Optimale D'énergie d'une Chaîne de Production Electrique Renouvelable". Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [6] LAROUÏ, R. and A. BENATIALLAH, "Modélisation et simulation d'un système multi-sources Photovoltaïque-éolien-diesel dans la région d'Adrar". Thèse de doctorat, Université Ahmed Draïa- ADRAR, 2015.
- [7] Cano, M.H., et al., Experimental evaluation of a power management system for a hybrid renewable energy system with hydrogen production. *Renewable Energy*, 2017. **113**: p. 1086-1098.
- [8] Neffati, A., "Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source: décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride". Thèse de doctorat, Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, 2013.
- [9] Croci, L., "Gestion de l'énergie dans un système multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supercondensateurs". Thèse de doctorat, Université de QUEBEC, 2013.
- [10] Tegani, I., "Optimisation et contrôle d'un micro smart grid utilisant une pile à combustible, des supercondensateurs, des batteries, une éolienne et une source photovoltaïque". Thèse de doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra.
- [11] Berthold, F., "Integration of Plug-in Hybrid Electric Vehicle using Vehicle-to-home and Home-to-Vehicle Capabilities". Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort- Montbéliard, 2017.
- [12] Tan, Y., "Management of hybrid remote area power supply systems". Thèse de doctorat, Université de Wollongong, 2016.

- [13] Abbes, D., Contribution au dimensionnement et à l'optimisation des systèmes hybrides éoliens-photovoltaïques avec batteries pour l'habitat résidentiel autonome. En ligne]. Thèse Génie électrique. Poitiers: Université de Poitiers, 2012. Disponible sur Internet <http://theses.univ-poitiers.fr>, 2012.
- [14] Abbes, D., A. Martinez, and G. Champenois, Eco-design optimisation of an autonomous hybrid wind-photovoltaic system with battery storage. *IET Renewable Power Generation*, 2012. **6**(5): p. 358-371.
- [15] Joud, L.c., "Stratégie intelligente de gestion du système énergétique global d'un véhicule hybride". Thèse de doctorat, Université de Bourgogne Franche-Comté, 2018.
- [16] Tapsoba, G.R., Maximisation du transfert de l'énergie d'un champ photovoltaïque tenant compte du phénomène d'ombrage partiel: connexion réseau électrique. 2019, École de technologie supérieure.
- [17] KACEM, B., "Etude et Simulation de Connection d'une Centrale Photovoltaïque au Réseau Electrique Triphasé" Thèse de doctorat, Université Ahmed Draïa Adrar ; 2018.
- [18] Kermadi, M. and E.M. Berkouk, Artificial intelligence-based maximum power point tracking controllers for Photovoltaic systems: Comparative study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017. **69**: p. 369-386.
- [19] Kermadi, M., et al., A High-Performance Global Maximum Power Point Tracker of PV System for Rapidly Changing Partial Shading Condition. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2020
- [20] Gutiérrez-Martín, F. and L. Rodríguez-Antón, Power-to-SNG technology for energy storage at large scales. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2016. **41**(42): p. 19290-19303.
- [21] Buonomano, A., et al., A hybrid renewable system based on wind and solar energy coupled with an electrical storage: Dynamic simulation and economic assessment. *Energy*, 2018. **155**: p. 174-189.
- [22] Pascual, J., et al. Implementation and control of a residential microgrid based on renewable energy sources, hybrid storage systems and thermal controllable loads. in 2013 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. 2013. IEEE.
- [23] Zhang, H., "Gestion décentralisée de réseaux continus à forte disponibilité en aéronautique". Thèse de doctorat, Université de Lille 1, 2010.
- [24] Montaru, M., "Contribution à l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages". Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2009.

- [25] Maamir, M., "Gestion d'énergie d'un système d'entraînement électrique hybride basé sur un moteur synchrone à aimants permanents".Thèse de magistère, Université Mohamed, Khider Biskra, 2014.
- [26] Mesbahi, T., "Influence des stratégies de gestion d'une source hybride de véhicule électrique sur son dimensionnement et sa durée de vie par intégration d'un modèle multi-physique".Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lile, 2016.
- [27] Günter, N. and A. Marinopoulos, Energy storage for grid services and applications: Classification, market review, metrics, and methodology for evaluation of deployment cases.Journal of Energy Storage, 2016. **8**: p. 226-234.
- [28] Dandeville, Y., "Analyse thermique et électrochimique de supercondensateurs carbone-MnO₂ en milieu aqueux". Thèse de doctorat, Université de Nantes, 2012.
- [29] H.A Mosqueda, et al, Electrolytes for hybrid Carbon-MnO₂ electrochemical capacitors, Electrochem. Acta, volume 55, issue 25, October 2010.
- [30] Kreczanik, P., "Étude de la fiabilité et du vieillissement d'un système de stockage par supercondensateurs pour l'alimentation partielle et ponctuelle d'un trolleybus grâce à la récupération de l'énergie de freinage: approche du composant au système de stockage".
Thèse de doctorat, Université de 2011.
- [31] Hijazi, A., et al., Thermal network model of supercapacitors stack.IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011. **59**(2): p. 979-987.
- [32] Abdelhedi, R.,"Optimisation d'un système de stockage hybride de l'énergie électrique avec batterie et supercondensateurs pour véhicule électrique".Thèse de doctorat, Université de Claude Bernard Lyon 1, 2018.
- [33] Rizoug, N., "Modélisation électrique et énergétique des supercondensateurs et méthodes de caractérisation: Application au cyclage d'un module de supercondensateurs basse tension en grande puissance". Thèse de doctorat, Université des Sciences Technologies de Lile, 2006.
- [34] Rizoug, N., P. Bartholomeus, and P. Le Moigne, Modeling and characterizing supercapacitors using an online method.IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010. **57**(12): p. 3980-3990.
- [35] Borni, A., "Etude et optimisation d'un multi système hybride de conversion d'énergie électrique".Thèse de doctorat, Université Frère Mentouri - Constantine 1, 2015.
- [36] Paire, D., "Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entraînements électriques hybrides: application à un ascenseur avec récupération d'énergie". Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2010.

- [37] Bangash, M. and T. Bangash, Lifts, elevators, escalators and moving walkways/travelators. 2007: Taylor & Francis.
- [38] Kulkarni, A.B. Energy consumption analysis for geared elevator modernization: upgrade from dc ward leonard system to ac vector controlled drive. in Conference Record of the 2000 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Fifth IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy (Cat. No. 00CH37129). 2000. IEEE.
- [39] Guemri, M., 'Heuristiques optimisées et robustes de résolution du problème de gestion d'énergie pour les véhicules électriques et hybrides''. Thèse doctorat, National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2013.
- [40] Poline, M., et al., "Simultaneous optimization of sizing and energy management—Application to hybrid train". Mathematics and Computers in Simulation, 2019. **158**: p. 355-374.
- [41] Huang, Y., et al., "A review of power management strategies and component sizing methods for hybrid vehicles". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. **96**: p. 132-144.
- [42] Liu, Y., et al., "Modeling, planning, application and management of energy systems for isolated areas: A review". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. **82**: p. 460-470.
- [43] Bidi, F.K., et al. "Model Predictive Control for Micro Grid stabilisation in case of loss of units". in 2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control (CDC). 2019. IEEE.
- [44] Lawan, M., et al. "Multi-source power system based on PV-Batteries and diesel generator for Micro-grid Applications". in 2019 Fourteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER). 2019. IEEE.
- [45] MOHAMMEDI, M., Gestion de l'énergie pour une chaîne multi-sources., Thèse doctorat Université Mohamed Khider-Biskra. 2016.
- [46] Denis, N., M.R. Dubois, and A. Desrochers, "Fuzzy-based blended control for the energy management of a parallel plug-in hybrid electric vehicle". IET Intelligent Transport Systems, 2014. **9**(1): p. 30-37.
- [47] Wirasingha, S.G. and A. Emadi, "Classification and review of control strategies for plug-in hybrid electric vehicles". IEEE Transactions on vehicular technology, 2010. **60**(1): p. 111-122.

- [48] Shu-mei, C., T. De-wen, and Z. Qian-fan. "Study of hybrid energy control strategy for hybrid electric drive system in all electric combat vehicles". in 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2008. IEEE.
- [49] Yu, Z., D. Zinger, and A. Bose, "An innovative optimal power allocation strategy for fuel cell, battery and supercapacitor hybrid electric vehicle". *Journal of Power Sources*, 2011. **196**(4): p. 2351-2359.
- [50] Wu, D. and S.S. Williamson. "Status review of power control strategies for fuel cell based hybrid electric vehicles". in 2007 IEEE Canada Electrical Power Conference. 2007. IEEE.
- [51] Florescu, A., et al., "Adaptive frequency-separation-based energy management system for electric vehicles". *Journal of Power Sources*, 2015. **280**: p. 410-421.
- [52] Mahjoubi, C.m., "Modélisation multi-physique et gestion d'énergie d'un micro-réseau résidentiel autonome". Thèse doctorat, université Nantes. 2019
- [53] Slouma, S., et al., "Frequency Separation Model Based on Infinite-Impulse Response Filter Applied To Hybrid Power Generation Intended For Residential Sector". *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 2019. **9**(1): p. 118-127.
- [54] Florescu, A., et al. "Frequency-separation-based energy management control strategy of power flows within electric vehicles using ultracapacitors". in *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. 2012. IEEE.
- [55] Neffati, A., et al., "Energy management strategies for multi source systems". *Electric Power Systems Research*, 2013. **102**: p. 42-49.
- [56] Benlahbib, B., "Supervision d'un système hybride éolienne-photovoltaïque connecté au réseau électrique". thèse doctorat ,université USTHB, 2019.
- [57] Abdelhedi, R., et al. "Optimal power sharing between batteries and supercapacitors in Electric vehicles". in 2016 7th International Conference on Sciences of Electronics, Technologies of Information and Telecommunications (SETIT). 2016. IEEE.
- [58] Gao, D., Z. Jin, and Q. Lu, "Energy management strategy based on fuzzy logic for a fuel cell hybrid bus". *Journal of Power Sources*, 2008. **185**(1): p. 311-317.
- [59] Erdinc, O., et al., "Modeling and analysis of an FC/UC hybrid vehicular power system using a wavelet-fuzzy logic based load sharing and control algorithm". *International journal of hydrogen energy*, 2009. **34**(12): p. 5223-5233.
- [60] Martinez, C.M., et al., "Energy management in plug-in hybrid electric vehicles: Recent progress and a connected vehicles perspective". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2016. **66**(6): p. 4534-4549.

- [61] Shengzhe, Z., W. Kai, and X. Wen. "Fuzzy logic-based control strategy for a battery/supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles". in 2017 Chinese Automation Congress (CAC). 2017. IEEE.
- [62] Yin, H., et al., "An adaptive fuzzy logic-based energy management strategy on battery/ultracapacitor hybrid electric vehicles". IEEE Transactions on transportation electrification, 2016. **2**(3): p. 300-311.
- [63] Ibrahim, M., "Approche adaptative de réseau de neurones autorégressifs non linéaires et de transformée en ondelettes pour la gestion temps réel de l'énergie dans les véhicules" hybrides. Journées des jeunes chercheurs en génie électrique (JCGE), 2013.
- [64] Tabanjat, A., Modelling, control and supervision of multi-source system connected to the network with a buffer storage of electrical energy via hydrogen vector. these doctorat, 'Université de Technologie de Belfort–Montbéliard , 2015.
- [65] Maamir, M., et al., "Neural network power management for hybrid electric elevator application". Mathematics and Computers in Simulation, 2020. **167**: p. 155-175.
- [66] Joud, L., et al., "Smart Energy Management for Series Hybrid Electric Vehicles Based on Driver Habits Recognition and Prediction". Energies, 2020. **13**(11): p. 2954.
- [67] Chen, Z., et al., "Energy management of power-split plug-in hybrid electric vehicles based on simulated annealing and Pontryagin's minimum principle". Journal of Power Sources, 2014. **272**: p. 160-168.
- [68] Ates, Y., et al., "Energy management of an FC/UC hybrid vehicular power system using a combined neural network-wavelet transform based strategy". International journal of hydrogen energy, 2010. **35**(2): p. 774-783.
- [69] Kerdphol, T., et al., "Intelligent determination of a battery energy storage system size and location based on RBF neural networks for microgrids". International Review of Electrical Engineering (IREE), 2016. **11**(1): p. 78-87.
- [70] Askarzadeh, A. and A. Rezazadeh," Artificial neural network training using a new efficient optimization algorithm". Applied Soft Computing, 2013. **13**(2): p. 1206-1213.
- [71] Prokhorov, D.V., Toyota Prius HEV neurocontrol and diagnostics. Neural Networks, 2008. **21**(2-3): p. 458-465.
- [72] Boussaada, Z., et al., "Multi-agent systems for the dependability and safety of microgrids". International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 2016. **10**(1): p. 1-13.
- [73] Lagorce, J., " Modélisation, dimensionnement et optimisation des systèmes d'alimentation décentralisés à énergie renouvelable - application des systèmes multi-

- agents pour la gestion de l'énergie ".these doctorat , Université de Technologie de Belfort-Montbéliard 2009.
- [74] Boussaada, Z., "Contribution à la Gestion et à la Commande des Micro-Réseaux par les Systèmes Multi Agents". thèse doctorat,université tunis,2018.
- [75] Denis, N., et al., Système de Gestion D'énergie D'un Véhicule Électrique Hybride Rechargeable À Trois Roues., theèse doctorat,Université de Sherbrooke, 2014.
- [76] Mesbahi, T., et al., "Optimal energy management for a li-ion battery/supercapacitor hybrid energy storage system based on a particle swarm optimization incorporating Nelder–Mead simplex approach".IEEE Transactions on Intelligent Vehicles, 2017. **2**(2): p. 99-110.
- [77] Paul, T., et al. "Study and Influence of Standardized Driving Cycles on the Sizing of Li-Ion Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage". in 2019 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). 2019. IEEE.
- [78] Bellman, R., "Dynamic programming and Lagrange multipliers". Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 1956. **42**(10): p. 767.
- [79] Rubinov, A.M. and B.M. Glover, "Optimization and Related Topics". Vol. 47. 2013: Springer Science & Business Media.
- [80] Brahma, A., Y. Guezennec, and G. Rizzoni. "Optimal energy management in series hybrid electric vehicles". in Proceedings of the 2000 American Control Conference. ACC (IEEE Cat. No. 00CH36334). 2000. IEEE.
- [81] Zéphyr, L., "Optimisation stochastique des systèmes multi-réservoirs par l'agrégation de scénarios et la programmation dynamique approximative",these doctorat, univervité LAVAL.2015.
- [82] Riffonneau, Y., et al., "Optimal power flow management for grid connected PV systems with batteries".IEEE Transactions on sustainable energy, 2011. **2**(3): p. 309-320.
- [83] Riffonneau, Y., F. Barruel, and S. Bacha, "Problématique du stockage associé aux systèmes photovoltaïques connectés au réseau". Revue des énergies renouvelables, 2008. **11**(3): p. 407-422.
- [84] Bernard, J., et al., "Fuel efficient power management strategy for fuel cell hybrid powertrains".Control Engineering Practice, 2010. **18**(4): p. 408-417.
- [85] Xie, S., et al., "An artificial neural network-enhanced energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles". Energy, 2018. **163**: p. 837-848.
- [86] Song, Z., et al., "Energy management strategies comparison for electric vehicles with hybrid energy storage system". Applied Energy, 2014. **134**: p. 321-331.

- [87] Ramadan, H., M. Becherif, and F. Claude, "Energy management improvement of hybrid electric vehicles via combined GPS/rule-based methodology". IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2017. **14**(2): p. 586-597.
- [88] Golchoubian, P. and N.L. Azad, "Real-time nonlinear model predictive control of a battery–supercapacitor hybrid energy storage system in electric vehicles". IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2017. **66**(11): p. 9678-9688.
- [89] Torreglosa, J.P., et al., "Predictive control for the energy management of a fuel-cell–battery–supercapacitor tramway".IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013. **10**(1): p. 276-285.
- [90] Mane, S., et al. "Model predictive control of complex switched mode FC-UC hybrid structure", in 2016 Indian control conference (ICC). 2016. IEEE.

Chapitre 02 : Modélisation Des Composants Du SEH

2.1 Introduction:

Pour déterminer une stratégie de gestion adéquate, il faut connaître le comportement du système en fonction des données d'entrée. Cette connaissance passe par la modélisation du système d'entraînement. Nous allons au cours de ce chapitre modéliser les différents composants de l'ascenseur considéré, ainsi que les convertisseurs qui y sont connectés pour effectuer les simulations de notre système. Ensuite, nous allons présenter le dimensionnement pour chacun de ses éléments, ce dernier doit être mis en relation directe avec l'utilisation faite de l'ascenseur.

2.2 Description du système hybride :

L'installation hybride étudiée dans le cadre de ce travail (fig.2.1) se compose d'un générateur photovoltaïque comme source principale et un système de stockage composé des batteries et des supercondensateurs qui sont ici obligatoires pour servir de réserve tampon entre les puissances produites et demandées. Ces différentes sources sont connectées à un bus DC. Dans ce bus, les condensateurs filtrent les fluctuations de puissance provenant des convertisseurs statiques.

- Le convertisseur relié aux PV est un convertisseur élévateur (boost) qui permet d'obtenir le maximum de puissance du panneau grâce à l'utilisation d'un algorithme de commande MPPT.
- La batterie est reliée au bus à travers un convertisseur réversible en courant. Il contrôle l'intensité du courant délivré ou consommé par la batterie tout en assurant une adaptation de la tension entre la batterie et le bus DC. Pour les mêmes raisons, le convertisseur reliant les SC au bus DC est également réversible en courant.
- Un onduleur triphasé assure l'interfaçage du réseau avec le bus DC. Il est ainsi possible de prélever de l'énergie sur le réseau ou d'en injecter lorsque, par exemple, la production photovoltaïque est plus importante que la consommation de la charge.

Et enfin, un moteur synchrone à aimant permanent (MSAP) est utilisé pour déplacer la cage de l'ascenseur, via un onduleur de tension de deux niveaux.

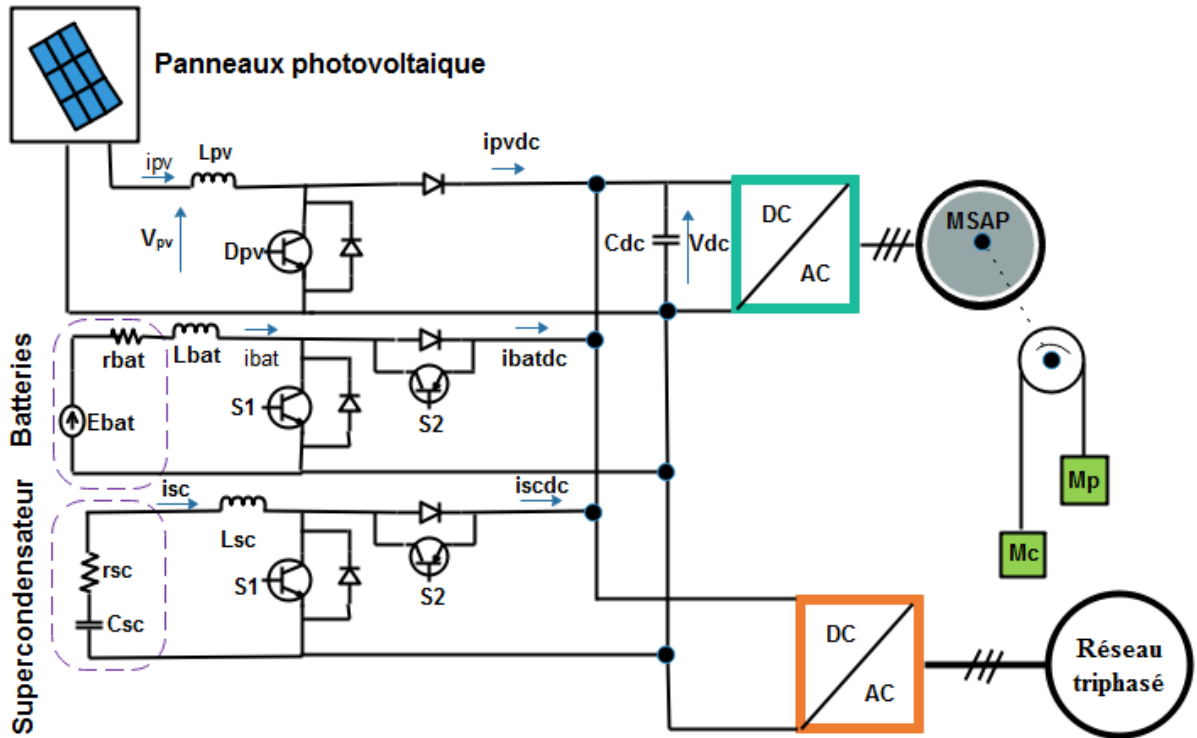


Figure.2.1.Schéma électrique détaillé du système ascenseur.

2.3 Dimensionnement des éléments du système hybride :

L'utilisation intermittente de l'ascenseur permet d'effectuer un choix de machine dont les caractéristiques en régime permanent restent légèrement inférieures aux contraintes sur le système. De plus, Le moteur choisi est une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau A.1 de l'annexe. La machine a été rebobinée afin de fonctionner avec un bus d'alimentation de 100 V. On peut noter qu'un frein électromagnétique est présent sur l'arbre afin de maintenir la charge en position lors de l'arrêt. Il permet également d'assurer le blocage de la charge en cas de dysfonctionnement. Le convertisseur choisi est un onduleur triphasé qui permet de piloter la machine. Il est constitué de trois bras de pont d'IGBT de 1200 V et 150 A. La fréquence de découpage (f_{pwm}) est de 20 kHz.

Compte-tenu de la puissance de la machine synchrone qui est de 5kw et du profil de charge, la puissance photovoltaïque installée représente environ 1/5 de la puissance maximale de la machine. Le générateur photovoltaïque possède une puissance typique totale (P_{pv}) de 990 W et une tension v_{pv} à cette puissance de 68, 8 V. En effet, l'utilisation de l'ascenseur est intermittente et sa consommation dépend de la charge.

Cette énergie sera stockée dans des batteries qui alimenteront l'ascenseur. Afin de stocker une journée de production. Quatre batteries de 12 V et d'une capacité de 200 Ah sont connectées en série afin d'obtenir une tension de 48 V. Le deuxième élément du système de stockage c'est les supercondensateurs qui constituent une source d'énergie auxiliaire qui intervient pendant les accélérations et lors du freinage de l'ascenseur, son dimensionnement est d'identifier quels sont les besoins en énergie et en puissance. Ainsi le banc de supercondensateurs utilisée dans ce travail est constitué de 4 packs et possède une capacité totale (C_{sc}) de 14,5F sous une tension nominale de 60V, soit une énergie disponible $W_{bu}=19575J$ [1].

2.3.1 Dimensionnement des convertisseurs statiques:

Le convertisseur statique relié aux supercondensateurs possède une fréquence de découpage (f_{pwm}) de 20 kHz. Cette fréquence résulte d'un compromis entre le dimensionnement des inductances et les caractéristiques des transistors de puissance. L'inductance est dimensionnée de manière à obtenir une ondulation de courant (Δi_{sc}) de 5 A (représente 3,3 % du courant maximum) [2]. Ce choix permet d'assurer une taille raisonnable pour l'inductance et les condensateurs du bus DC. Le rapport cyclique pilotant les IGBT du bras de pont est noté D_{sc} [3].

$$L_{sc} = \frac{\alpha_{sc} \cdot v_{sc}}{\Delta i_{sc} \cdot f_{PWM}} = \frac{0.4 \times 60}{5 \times 20000} \approx 249 \mu H \quad (2.1)$$

L'inductance utilisée a une valeur de 250 mH. Les simulations ont montré que les courants qui transiteront dans ce convertisseur ne dépasseront jamais les 150 A.

Le convertisseur de puissance réversible de la batterie et le convertisseur de puissance associé aux panneaux photovoltaïques sont dimensionnés de la même manière que le convertisseur bidirectionnelle relié aux supercondensateurs dont :

$$L_{bat} = \frac{\alpha_{bat} \cdot v_{bat}}{\Delta i_{bat} \cdot f_{PWM}} = \frac{0.52 \times 48}{5 \times 20000} \approx 249 \mu H \quad (2.2)$$

$$L_{pv} = \frac{\alpha_{pv} \cdot v_{pv}}{\Delta i_{scpv} \cdot f_{PWM}} = \frac{0.31 \times 68.8}{1 \times 20000} \approx 1.7 mH \quad (2.3)$$

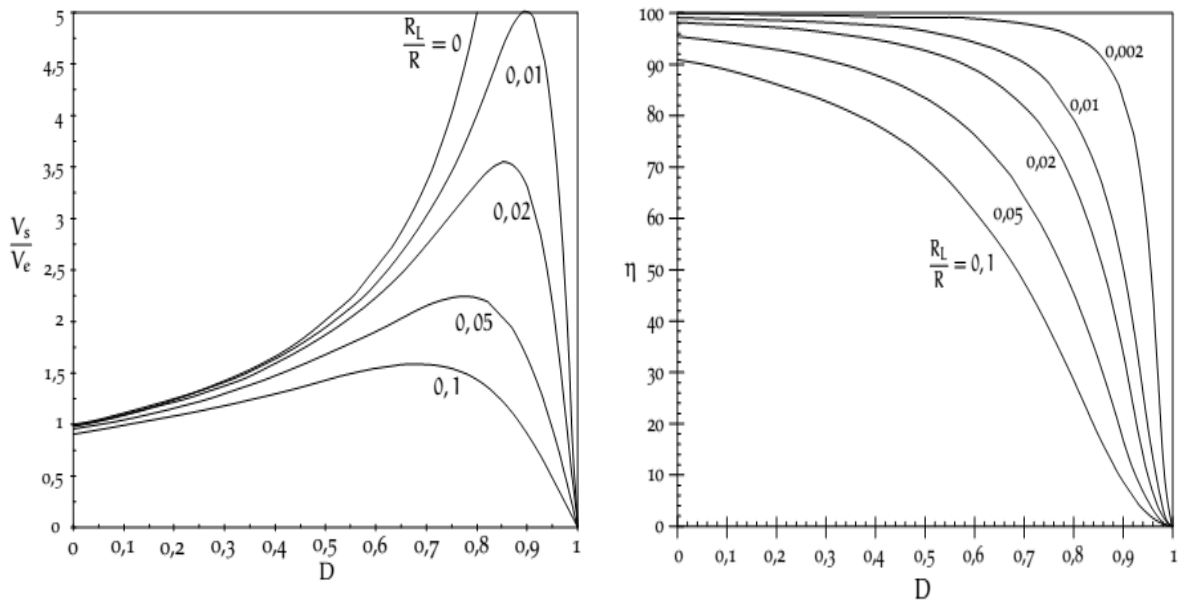
Dû à la faible tension du bus DC et au comportement élévateur d'un onduleur, la tension du réseau électrique est abaissée à l'aide d'un transformateur. L'onduleur fonctionne avec des tensions triphasées simples (v_a , v_b , v_c) d'une valeur efficace de 40 V. La valeur de l'inductance de ligne (L_g) résulte d'un compromis entre la chute de tension à la fréquence du réseau et l'ondulation du courant absorbé par l'onduleur à la fréquence de découpage. Sa valeur peut être déterminée par [48]:

$$L_g < \frac{\sqrt{\frac{V_{dc}^2}{3} - (\sqrt{2} \cdot V_a)^2}}{w \cdot i_d} \approx 5.1mH \tag{2.4}$$

2.3.2 Dimensionnement de la tension de bus continu :

Le choix de la valeur nominale de la tension du bus continu dépend du rapport de transformation des convertisseurs DC/DC. En effet, un convertisseur DC/DC sans transformateur haute fréquence accepte des rapports d’élévation de 3 à 4 pour fonctionner dans de bonnes conditions. Théoriquement ce rapport d’élévation serait infini, mais en réalité ce gain est limité par la résistance série des composants. La figure.2.2 (a) illustre l’influence de la résistance série de l’inductance sur un hacheur parallèle (boost) [4]. V_e et V_s sont respectivement les tensions d’entrée et de sortie du convertisseur ; R_L est la résistance série, R est la résistance de charge, et α le rapport cyclique. On constate donc que le rapport d’élévation est limité par R_L / R . De plus d’après la figure.2.2 (b), le rendement dépend également de la résistance série R_L et il se dégrade lorsque α est proche de 1 (seule la résistance série de l’inductance est prise en compte dans cette approche).

Donc, afin d’éviter l’utilisation d’un transformateur et d’utiliser le convertisseur dans de bonnes conditions, une faible tension du bus DC est choisie [5] . Pour le travail en cours, un rapport d’élévation de 1,47 est adopté, avec, $V_{pv}= 68 V$; $V_{dc}=100V$.



(a) Rapport d’élévation

(b) le rendement

Figure.2.2.Caractéristiques d’un convertisseur boost.

2.4 Modélisation des sources à puissances finies :

2.4.1 Modèle du générateur photovoltaïque:

Dans la littérature, différentes architectures de fabrication des cellules solaires existent, et dépendant de la matière de construction (cristallin, amorphe, ou couches minces), alors que le monocristallin produit un rendement de conversion en devance par rapport aux autres topologies et qui est actuellement aux alentours de 25%. Le panneau solaire se compose de plusieurs cellules solaires de type monocristallin, permettant la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Le circuit équivalent du modèle à une diode est illustré à la figure.2.3, et qui permet de reconstituer la caractéristique électrique avec une précision notable [6].

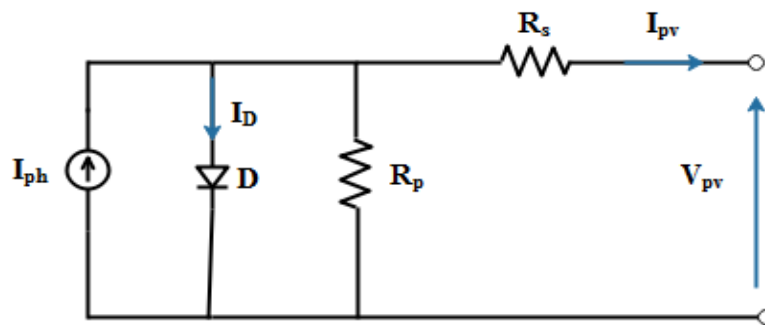


Figure.2.3.Schéma équivalent d'une cellule solaire.

Ce dernier est considéré par un générateur de courant, émulant le photo courant, une diode pour les phénomènes physiques de polarisation et deux résistances (série et shunt), servant à décrire les pertes joules et celles des contacts avant et arrière. Généralement, pour les cellules cristallines, la résistance shunt est grande et peut être considérée comme infinie, et le modèle se réduit alors à quatre paramètres (I_{cc} , I_0 , R_s , V_{th}).

La caractéristique (I-V) est modélisée par une équation non linéaire de forme implicite :

$$I_{pv} = I_{cc} - I_0 \left(e^{\frac{V_{pv} + I_{pv} \cdot R_s}{nV_{th}}} - 1 \right) \quad (2.5)$$

Pour tracer la caractéristique (I-V), il faut tenir compte de trois points de mesure, fournis par le constructeur aux conditions standards d'éclairement et de température (1000 W/m^2 , 25°C):

- Le point de court-circuit (I_{cc} , 0).
- Le point à circuit ouvert ($0, V_{oc}$).
- Le point optimum (I_{op}, V_{op}), où le module délivre sa puissance maximale.

La tension thermique V_{th} et le courant d'obscurité I_0 s'identifient par :

$$V_{th} = \frac{V_{op} + R_s I_{op} - V_{oc}}{\log(1 - \frac{I_{op}}{I_{cc}})} \quad (2.6)$$

$$I_0 = (I_{cc} - I_{op}) \exp\left[-\frac{(V_{op} + R_s I_{op})}{V_{th}}\right] \quad (2.7)$$

Chaque module se compose de plusieurs cellules, et l'assemblage de plusieurs modules solaires en série, et/ou en parallèle constitue le générateur photovoltaïque. Les paramètres du générateur sont liés à ceux du module par les relations suivantes :

$$I_{cc} = N_p \cdot I_{cc} \text{ (module).}$$

$$V_{th} = N_s \cdot V_{th} \text{ (module).}$$

$$r_s = (N_s / N_p) \cdot R_s \text{ (module).}$$

$$I_0 = N_p \cdot I_0 \text{ (module).}$$

$$V_{oc} = N_s \cdot V_{oc} \text{ (module).}$$

$$V_{op} = N_s \cdot V_{op} \text{ (module).}$$

Pour d'autres niveaux d'éclaircements et de températures, on fait recours aux lois suivantes [7]:

$$\Delta T = T - T_{ref} \quad (2.8)$$

$$\Delta I = \alpha \left(\frac{E}{E_{ref}} \right) \Delta T + \left(\frac{E}{E_{ref}} - 1 \right) I_{ccref} \quad (2.9)$$

$$\Delta V = -\beta \Delta T - r_s \Delta I \quad (2.10)$$

Donc les nouvelles valeurs des courants et de tensions sont sous la forme :

$$V = V_{ref} + \Delta V \quad (2.11)$$

$$I = I_{ref} + \Delta I \quad (2.12)$$

2.4.1.1 Caractéristique et influence de l'éclairement et de la température:

Avec une température de la jonction constante ($T_c = 25 \text{ C}^\circ$), et à différents éclaircements (fig.(2.4)), on remarque que l'accroissement du courant de court-circuit est beaucoup plus important que l'augmentation de la tension de circuit ouvert, car le courant de court-circuit (I_{cc}) est une fonction linéaire de l'éclairement et la tension du circuit ouvert (V_{oc}) est une fonction logarithmique. La puissance extraite se trouve alors augmentée avec cet accroissement de la puissance incidente.

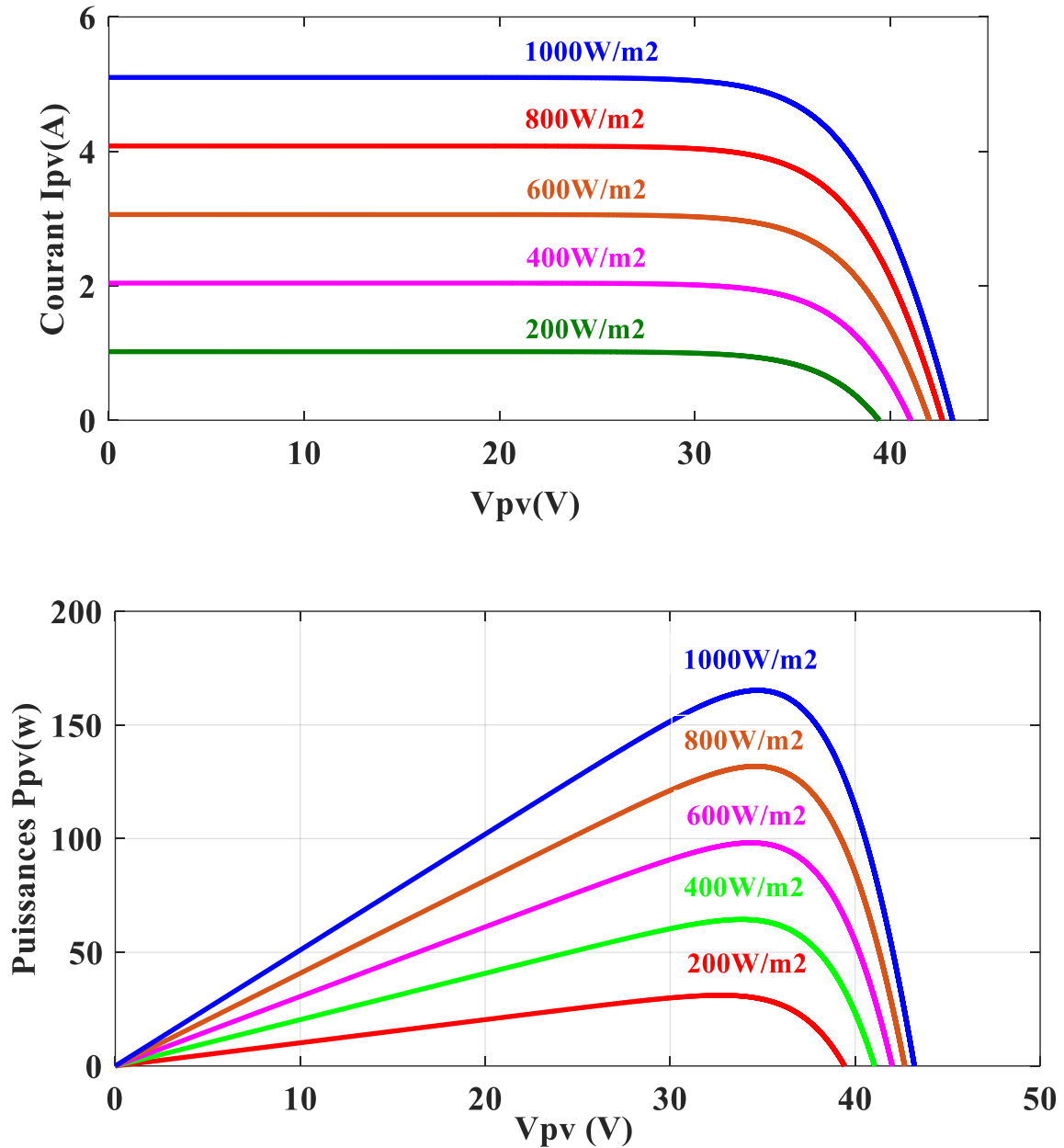


Figure.2.4.Influence de l'éclairement sur la caractéristique I(V) et P(V) à $T=25^{\circ}\text{C}$.

Puisque l'énergie du band gap décroît avec l'augmentation de la température, plus de photons ont assez d'énergie pour créer des paires électrons-trous. Par conséquent, le courant de court-circuit augmente légèrement [8]. Nous avons effectué une simulation pour un éclairement constant et des différentes températures (fig. (2.5)), et ce pour le module de 165w. Les résultats de simulation montrent que la tension diminue avec l'augmentation de la température alors que le courant augmente légèrement, cela se traduit par une baisse de puissance d'environ de $0.4\%/^{\circ}\text{C}$.

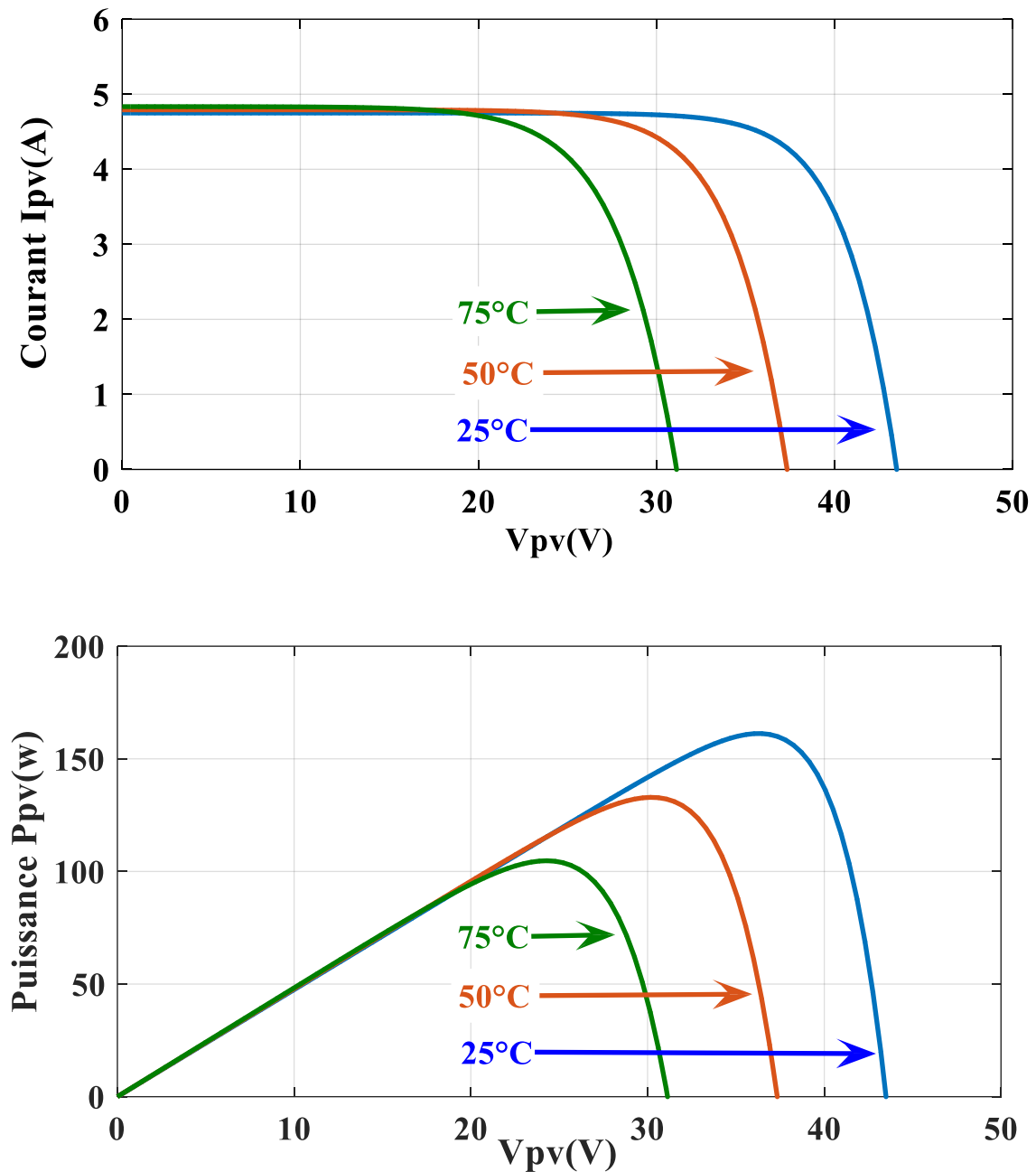


Figure.2.5. Influence de la température sur la caractéristique I(V) et P(V) à $E=1000\text{W/m}^2$

2.4.2 Modèle de la batterie:

Toute batterie est un ensemble d'éléments ou des cellules électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la restituer partiellement par la suite, grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu.

Une cellule d'une batterie est composée de deux électrodes (conducteurs électroniques) et d'un électrolyte (conducteur ionique). Les réactions chimiques sont spontanées dans la cellule et mettent en jeu deux couples d'oxydoréduction de potentiels différents [9], où le courant circule sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit raccordé à la batterie (fig. (2.6)).

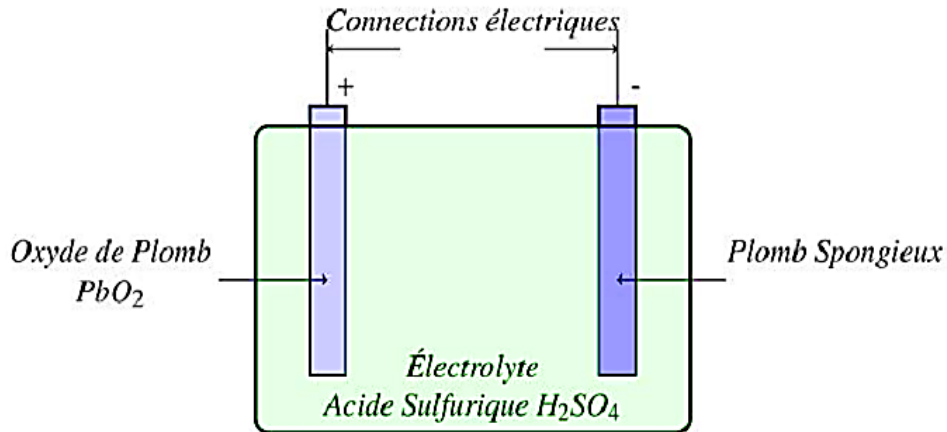


Figure.2.6. Cellule électrochimique de base.

Actuellement, la technologie la plus largement utilisée pour les applications photovoltaïques est la technologie au Plomb (Pb) [10]. C'est encore la technologie la plus compétitive et la mieux maîtrisée, pour des applications stationnaires, comme la nôtre.

Le modèle de la batterie adopté est celui permettant de prédire l'autonomie du système ascenseur, c'est-à-dire permettre à chaque instant d'estimer l'énergie restante (état de charge SOC_{bat} ou profondeur de décharge DOD) de la batterie [11]. Dans la littérature, différents modèles existent, allant du plus simple, émulant seulement les pertes joules à l'intérieur de la batterie, à celles dites de Thévenin, à une ou à plusieurs branches R-C, dites branches de polarisation. Le modèle choisi est, par conséquent, un modèle équivalent électrique (fig. (2.7)) composé d'une source de tension en série avec une résistance (résistance interne). L'efficacité de charge et de décharge sont des fonctions non linéaires du courant et de l'état de charge (SOC).

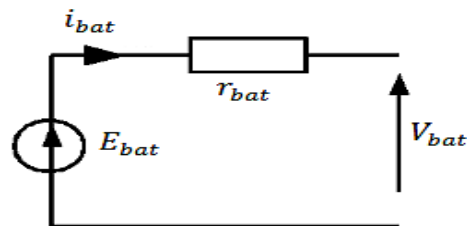


Figure.2.7. Modèle équivalent électrique simple d'une batterie.

2.4.2.1 Equation électrique de charge et décharge :

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 [12] [13]:

$$V_{bat} = E_{bat} - r_{bat} \cdot i_{bat} \quad (2.13)$$

Où la tension à vide E_{bat} est considérée proportionnelle à l'état de charge SOC_{bat} dans les limites de fonctionnement entre 30% et 100% du SOC nominale. Cette linéarité peut être déduite à partir d'une série de tests de charge-décharges à courant constant. L'équation (2.13) permet de modéliser l'équation de tension pour le cas de charge (I_{bat} négatif), et dans le cas de décharge (I_{bat} positif). La résistance r_{bat} , quand à elle, peut être déduite par différentes techniques d'identification, parmi, celle de Moindre carrées récursif (RLS) [14].

L'équation (2.14) présente un modèle valide l'équation électrique.

$$E_{bat} = n(2.15 - D0D \cdot (2.15 - 2.00)) \quad (2.14)$$

En considérant la variable DoD comme paramètre variant entre 0 et 1, selon que la batterie est chargée ou déchargée pleinement.

$$D0D = 1 - SOC_{bat} \quad (2.15)$$

2.4.2.2 Etat de charge de la batterie :

L'état de charge d'une batterie est le rapport entre la capacité actuelle de la batterie et sa capacité totale. L'état de charge est un paramètre très important pour gérer correctement la batterie [15], et éviter par conséquent sa perte.

$$SOC(t) = soc(t_0) - \frac{1}{C_N} \int_{t_1}^{t_2} i_{bat}(t) dt \quad (2.16)$$

Où, $SOC(t_0)$ est l'état de charge initial, $I_b(t)$ représente le courant traversant la batterie et C_N est la capacité nominale de la batterie exprimée en Ah (1Ah= 3600C) [16].

2.4.3 Modèle des Supercondensateurs:

Les supercondensateurs constituent une nouvelle technologie de stockage d'énergie spécifique supérieure à celle des condensateurs usuels, et de puissance spécifique supérieure à celle des accumulateurs électrochimiques. Les SCs à couche double électrique, curieusement appelées capacités électrochimiques, ont en fait un fonctionnement analogue à celui des capacités électrostatiques classiques.

Les dites sont typiquement constituées de deux électrodes métalliques séparées par un matériau diélectrique. L'énergie est stockée sous forme d'une charge électrique induite au voisinage de l'interface électrode-diélectrique, par l'application d'une différence de potentiel entre ces deux électrodes. Le rapport de la charge stockée sur la tension appliquée est connu sous le nom de capacitance, ou capacité, et est représentatif de l'aptitude du dispositif à stocker de l'énergie. Les relations de base s'écrivent, pour une capacité linéaire [17]:

$$c_1 = \frac{Q}{V_1} = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (2.17)$$

$$w = \frac{1}{2} c_1 V_1^2 \quad (2.18)$$

Ainsi, l'objectif est d'établir un modèle de connaissance du stockage de l'énergie par supercondensateurs, suffisamment précis et accessible. Le modèle équivalent d'un élément de SC est un condensateur C_{sc} en série avec une résistance (R_{sc}) [18] fig. (2.8)). Ce modèle est suffisamment précis pour prédire avec exactitude le comportement électrique des modules de la firme américaine Maxwell, couramment utilisées en applications industrielles. La résistance décrit les pertes ohmiques de la composante tandis que la capacité désigne le comportement du SC pendant la charge et la décharge [19] .

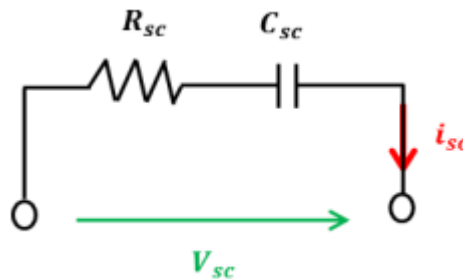


Figure.2.8.Modèle d'un Super condensateur.

Pour analyser le circuit du modèle précédent, on admet que le courant du super condensateur i_{sc} est positif pendant la phase de décharge et il est négatif pendant la phase de charge. La tension aux bornes des super condensateurs peut être présentée par :

$$v_{sc} = \frac{1}{C_{sc}} \int i_{sc}(t) dt - R_{sc} \cdot i_{sc} \quad (2.19)$$

2.4.3.1 Equation de l'état de charge :

Les SCs sont utilisés principalement pour deux missions. Il s'agit d'alimenter et/ou d'absorber des pics de puissance pendant des intervalles de temps relativement courts.

Toutefois, les SC_s étant des organes à faible densité d'énergie, ces pics peuvent potentiellement influencer considérablement l'état de charge des SC_s . En cas de surcharge notamment, cela peut les endommager et donc réduire leur durée de vie. Le contrôle du SOC_{sc} est donc une condition principale pour optimiser le rendement du système. En effet, il permet d'éviter les surcharges et/ou la décharges profonde et de maintenir la valeur moyenne du SOC_{sc} variable autour d'une valeur de référence (généralement autour de 50%). L'évolution du SOC_{sc} en fonction des variations des pics de puissance impose donc sa régulation [20].

L'état de charge des supercondensateurs, SOC_{sc} est exprimé par (eq.2.20) en fonction de l'énergie stockée W_{sc} et l'énergie maximale qui peut être fournie W_{scmax} .

$$SOC_{sc} = SOC_{ini} - \frac{W_{sc}}{W_{scmax}} \quad (2.20)$$

Avec :

SOC_{ini} est l'état de charge initial

W_{scmax} est l'énergie maximale qui peut être extraite d'une SC qui est écrite comme suit [21]:

$$W_{scmax} = \frac{1}{2} C_{sc} \cdot V_{scmax}^2 \quad (2.21)$$

En pratique, et pour pouvoir garantir une marge de fonctionnement des modules lors des freinages par récupération, la tension V_{scmin} est généralement choisie proche de 50% de V_{scmax} .

Il est avantageux de garder le SOC_{sc} entre les limites minimale et maximale, SOC_{scmin} , SOC_{scmax} respectivement, afin de préserver la durée de vie des modules SC_s .

2.4.4 Modèle de la MSAP avec l'Ascenseur :

La modélisation est une méthode mathématique utilisée pour prédire le comportement en monde réel. L'élaboration du modèle mathématique des machines est une étape nécessaire en vue de la commande et de la simulation de leurs différents régimes de fonctionnement. L'établissement des équations du modèle repose sur les hypothèses habituelles suivantes :

- Les circuits magnétiques ne sont pas saturés, ce qui permet d'exprimer le flux comme fonction linéaire des courants.
- Les pertes par courants de Foucault et par hystérésis sont négligées.
- La distribution de la force magnétomotrice créée par les enroulements au stator est sinusoïdale.

- Les résistances ne varient pas avec la température.
- Il n'existe pas d'enroulement amortisseur au rotor.
- Le système de tension est équilibré (composante homopolaire nulle) [22].

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 [23]:

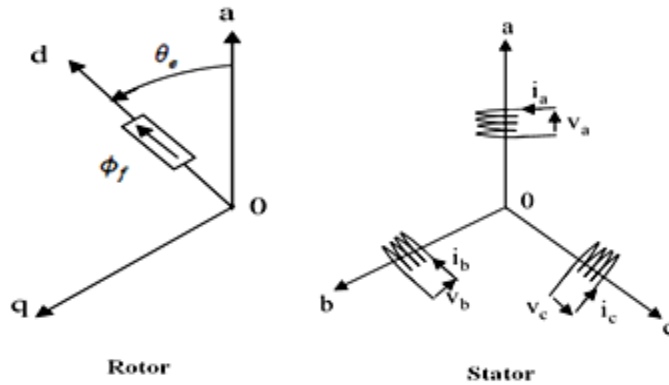


Figure.2.9.Schéma de la machine synchrone.

2.4.4.1 Equations de tensions et de flux:

Les tensions, flux et courants statorique triphasés, sont écrits avec les notations vectorielles suivantes $[V_s]$, $[\Phi_s]$ et $[I_s]$ respectivement [24].

L'équation de tension dans le référentiel du stator s'écrit [25]:

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \tag{2.22}$$

Avec :

$$[V_s] = [V_{as} \ V_{bs} \ V_{cs}]^T, [I_s] = [I_{as} \ I_{bs} \ I_{cs}]^T, [\Phi_s] = [\Phi_{as} \ \Phi_{bs} \ \Phi_{cs}]^T \tag{2.23}$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \tag{2.24}$$

R_s : Résistance des enroulements statoriques.

Les flux statoriques et rotoriques ont pour expression :

$$[\Phi_s] = [L_{ss}] \cdot [I_s] + [\Phi_f] \quad (2.25)$$

$$ET [\Phi_f] = \Phi_{sf} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) \\ \cos\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Où :

Φ_{sf} : Valeur crête (constante) du flux crée par l'aimant permanent à travers les enroulements statoriques.

θ_e : Position absolue du rotor en degré électrique

$[L_{ss}]$: Étant la matrice des inductances statoriques.

Dans la machine à pôles saillants, la matrice des inductances propre statorique $[L_{ss}]$ est fonction de la position. Elle contient deux termes : $[L_{s0}]$ qui est constant, et $[L_{s2}(\theta_e)]$ qui est en fonction de l'angle θ_e [26].

$$[L_{ss}] = [L_{s0}] + [L_{s2}] \quad (2.27)$$

Le terme $[L_{s0}]$ à pour expression :

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Le terme $[L_{s2}]$ s'écrit, dans le cadre de la théorie du premier harmonique

$$[L_{s2}] = L_{s2} \begin{bmatrix} \cos(2\theta_e) & \cos\left(2\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right)\right) & \cos\left(2\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right)\right) \\ \cos\left(2\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right)\right) & \cos\left(2\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right)\right) & \cos(2\theta_e) \\ \cos\left(2\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right)\right) & \cos(2\theta_e) & \cos\left(2\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right)\right) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

Les inductances propre et mutuelle L_{s0}, M_{s0}, L_{s2} sont des constantes

En introduisant (2.25) dans (2.22) on aura :

$$[V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} ([L_{s2}] \cdot [I_s] + [\Phi_f]) \quad (2.30)$$

2.4.4.2 Equations de la machine dans les axes d-q :

Vu la dépendance des flux statoriques $[\Phi_s]$ de l'angle θ_e , la résolution des équations électriques (2.30) s'avèrent très difficile. Pour remédier à ce problème, on fait recours au modèle biphasé (équations (2.31)) dans les axes réunis d-q, via la théorie de Park [27]. Pour ce type de machines, uniquement le bobinage statorique subit cette transformation, alors que le rotor est par construction ordonné sur l'axe q.

Les équations électriques dans le repère de Park [28]:

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

Les flux s'écrivent :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_{ds} i_{ds} + \Phi_f \\ \Phi_{qs} = L_s i_{qs} \end{cases} \quad (2.32)$$

En introduisant (2.32) dans (2.31) on aura Le modèle électrique du MSAP sous la forme suivante:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s i_{ds} + L_{ds} \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_e L_{qs} i_{qs} \\ V_{qs} = R_s i_{qs} + L_{qs} \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_e L_{ds} i_{ds} + \omega_e \Phi_f \end{cases} \quad (2.33)$$

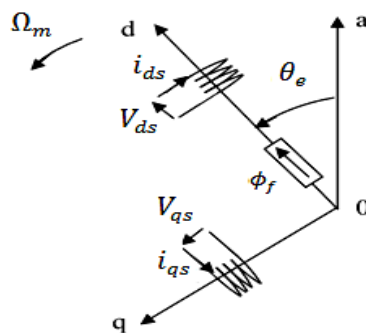


Figure.2.10.Schéma de la machine synchrone dans le référentiel (d,q).

2.4.4.3 Equation mécanique :

L'équation mécanique développée [29] pour la machine est donnée par la relation conventionnelle suivante [LAH-09] :

$$C_e - C_r - f\Omega_m = J \frac{d\Omega_m}{dt} \tag{2.34}$$

Le couple électromagnétique C_e 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. Il est exprimé par :

$$C_e = P[(L_{ds} - L_{qs})i_{ds}i_{qs}] + \phi_f I_{qs} \tag{2.35}$$

Le premier terme est appelé le couple reluquant, et qui présent uniquement dans le cas des machines à pôles saillants, alors que le deuxième terme est dit couple synchrone, comme interaction entre le flux des aimants et le flux tournant statorique.

Le couple résistant est calculé d'après le schéma du système ascenseur qui mesure 3m de hauteur et 1m de côtés. Il est constitué d'une cage (de masse M_c) et d'un contrepoids (de masse M_p) (fig. (2.11)). La transmission s'effectue grâce à une chaîne fixée sur la cage et le contrepoids, la liaison entre l'arbre moteur et la chaîne est réalisée via une roue dentée.

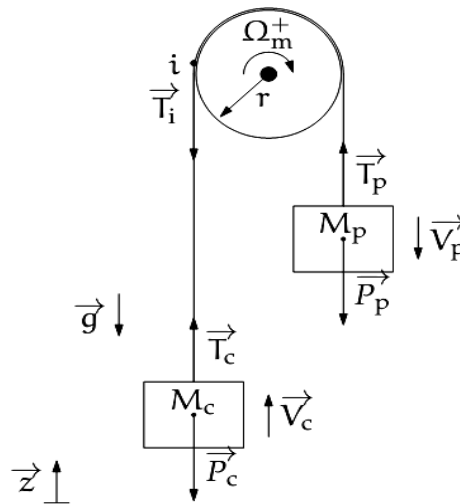


Figure.2.11. Schéma simplifié du système de masses de l'ascenseur

Dans ce qui suit, on négligera la masse de la chaîne, les frottements de la transmission ainsi que l'inertie du pignon [1].

➤ *Bilan des forces sur la charge :*

Le bilan des forces sur la charge s'écrit :

$$\vec{T}_c + \vec{P}_c = M_c \frac{d\vec{V}_c}{dt} \quad (2.36)$$

Où la force de la charge T_c s'exprime par :

$$\vec{T}_c = M_c \frac{d\vec{V}_c}{dt} - M_c \vec{g} \quad (2.37)$$

Il vient alors :

$$T_c \vec{z} = M_c \frac{dV_c}{dt} \vec{z} + M_c g \vec{z} \quad (2.38)$$

$$T_c \vec{z} = M_c \left(\frac{dV_c}{dt} + g \right) \vec{z} \quad (2.39)$$

➤ *bilan des forces sur le contrepoids*

Le bilan des forces sur le contrepoids est le suivant :

$$\vec{T}_p + \vec{P}_p = M_p \frac{d\vec{V}_p}{dt} \quad (2.40)$$

Il vient donc :

$$\vec{T}_p = M_p \frac{d\vec{V}_p}{dt} - M_p \vec{g} \quad (2.41)$$

Or d'après la figure (2.12), la relation vectorielle entre les deux vitesses linéaires du poids et du contrepoids se met sous :

$$\vec{V}_p = -\vec{V}_c \quad (2.42)$$

Il en résulte :

$$\vec{T}_p = -M_p \frac{d\vec{V}_c}{dt} - M_p \vec{g} \quad (2.43)$$

$$T_p \vec{z} = -M_p \frac{dV_c}{dt} \vec{z} + M_p g \vec{z} \quad (2.44)$$

$$T_p \vec{z} = M_p \left(g - \frac{dV_c}{dt} \right) \vec{z} \quad (2.45)$$

➤ *Bilan des forces sur le pignon*

Le bilan des forces sur le pignon reportées au point i s'exprime par:

$$\vec{T}_i = \vec{T}_p - \vec{T}_c \quad (2.46)$$

$$-T_i \vec{z} = (T_p - T_c) \vec{z} \quad (2.47)$$

$$T_i \vec{z} = (T_c - T_p) \vec{z} \quad (2.48)$$

On en déduit donc le couple résistant dû aux masses :

$$C_r = (T_c - T_p) r = \left[M_c \left(\frac{dv_c}{dt} + g \right) - M_p \left(g - \frac{dv_c}{dt} \right) \right] \cdot r \quad (2.49)$$

Où :

$$C_r = (M_c - M_p)gr + (M_c + M_p) \frac{dv_c}{dt} r \quad (2.50)$$

Et :

$$V_c = \Omega_m \cdot r \quad (2.51)$$

Dou finalement, l'équation (2.52) exprime le couple résistant du système ascenseur:

$$C_r = (M_c - M_p)gr + (M_c + M_p)r^2 \frac{d\Omega_m}{dt} \quad (2.52)$$

Dans cette expression, on distingue bien la masse à lever qui vaut $(M_c - M_p)$ et l'inertie $(M_c + M_p)r^2$ qui s'oppose à la variation de vitesse.

2.4.5 Modèles des convertisseurs statiques :

Dans beaucoup de cas, nous avons intérêt à transformer le système original en un système continu qui représente macroscopiquement au mieux les comportements dynamiques et statiques du circuit. A cet effet, le comportement moyen est tout à fait adapté. Le modèle dit « moyen » associé trouve un vaste champ d'applications que ce soit en commande, en simulation ou encore en analyse des modes [30]. Le modèle moyen permet de répondre à trois exigences essentielles:

- Une simplicité de mise en œuvre et d'utilisation.
- Une précision suffisante dans son domaine de validité.

- La possibilité d'utilisation en boucle fermée : possibilité éventuelle de passer en fonction de transfert. Pour toutes ces raisons, le modèle moyen des convertisseurs statiques est adopté. Il est à noter ici que la déduction des modèles moyens est obtenue en considérant les éléments de stockage passifs (L, C) dans le circuit.

2.4.5.1 Modèle moyen du convertisseur survolteur du GPV :

Dans le schéma (2.12) est illustré le synoptique de l'hacheur survolteur pour la déduction du modèle d'état moyen [4]. Le transistor étant fermé de 0 à αT et ouvert de αT à T , avec:

- α_{pv} est le rapport cyclique.
- T est la période de découpage.
- R est la résistance d'entrée vue du côté PV.

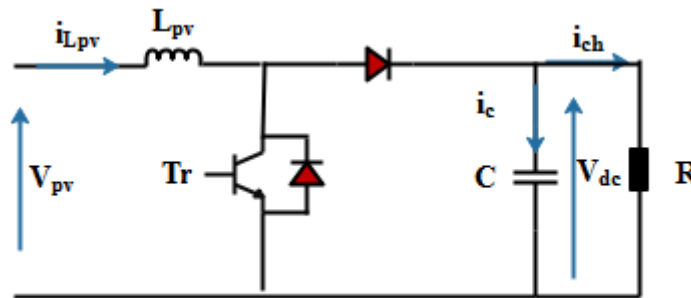


Figure.2.12.Le schéma de principe d'un hacheur survolteur.

Dans de tels systèmes, l'ordre d'équations d'états est égal au nombre des éléments de stockage (dans le cas présent $n=2$) [31].

On applique la loi de Kirchhoff pour chaque maille du circuit; le modèle du convertisseur de puissance est donné par:

Séquences de fonctionnement et équations d'état:

- Première séquence de conduction [0 - αT]:

Le transistor est en position "on" et la diode en position "off", et le schéma de principe devient:

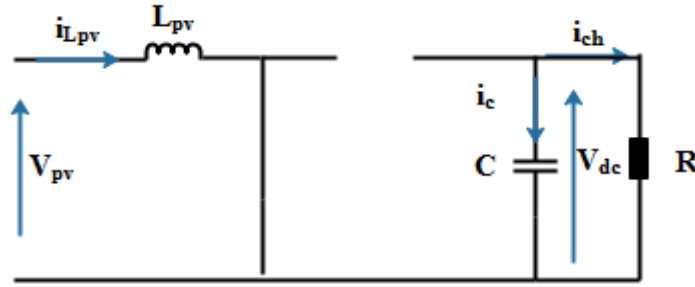


Figure.2.13.Schéma de principe de la première séquence de conduction

Les équations dynamiques des éléments de stockage (bobine, condensateur) s'écrivent [32]:

$$\begin{cases} V_L = L_{pv} \frac{di_{Lpv}}{dt} = V_{pv} \\ \frac{cdv_{dc}}{dt} = i_c = -i_{ch} = -\frac{V_{dc}}{R \cdot C} \end{cases} \quad (2.53)$$

- Deuxième séquence de conduction: [αT - T]

Le transistor est en position " off " et la diode est en position "ON", et le schéma de principe devient:

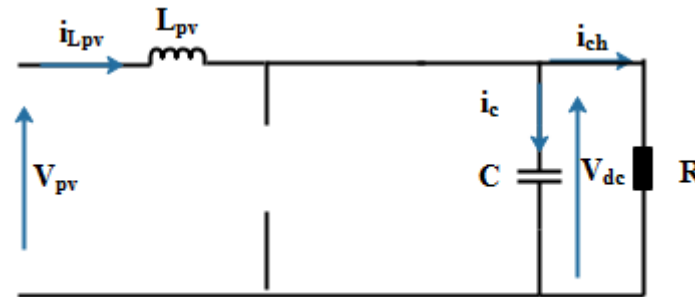


Figure.2.14.Le schéma de principe de la deuxième séquence de conduction.

Les équations des deux mailles fournissent :

$$\begin{cases} V_L = L_{pv} \frac{di_{Lpv}}{dt} = V_{pv} - V_{dc} \\ \frac{cdcV_{dc}}{dt} = i_{Lpv} - \frac{V_{dc}}{R} \end{cases} \quad (2.54)$$

Le modèle moyen du convertisseur peut être s'écrit comme une addition des équations (2.53) et (2.54), et pondérés par le rapport cyclique α_{pv} .

$$\begin{cases} \frac{di_{Lpv}}{dt} = -\frac{1-\alpha_{pv}}{L_{pv}}V_{dc} + \frac{1}{L_{pv}}V_{pv} \\ \frac{dV_{dc}}{dt} = \frac{1-\alpha_{pv}}{c}i_{Lpv} - \frac{1}{Rc}V_{dc} \end{cases} \quad (2.55)$$

Lorsque le convertisseur fonctionne en régime permanent, la valeur moyenne de V_L et i_c devient nulle; en conséquence, les équations suivantes sont obtenues:

$$\begin{cases} -(1-\alpha)V_{dc} + V_{pv} = 0 \\ (1-\alpha)i_{Lpv} - i_{ch} = 0 \end{cases} \quad (2.56)$$

Alors que V_{dc} , V_{pv} , i_{Lpv} et i_{ch} sont respectivement les valeurs moyennes pendant une période de commutation de $V_{dc}(t)$, $V_{pv}(t)$, $i_{Lpv}(t)$ et $i_{ch}(t)$.

2.4.5.2 Modèle moyen du convertisseur bidirectionnel :

Dans le cas du hacheur utilisé pour adapter la tension aux bornes du générateur PV, le transfert d'énergie s'effectue dans un seul sens de la source (générateur PV) vers le bus continu. Dans le cas de l' hacheur utilisé pour la charge/décharge des batteries, le courant électrique doit être réversible. Ainsi, pour réaliser le transfert d'énergie dans les deux sens, un hacheur survolteur et un hacheur dévolteur ont été associés comme l'indique la Figure (2.15) [33].

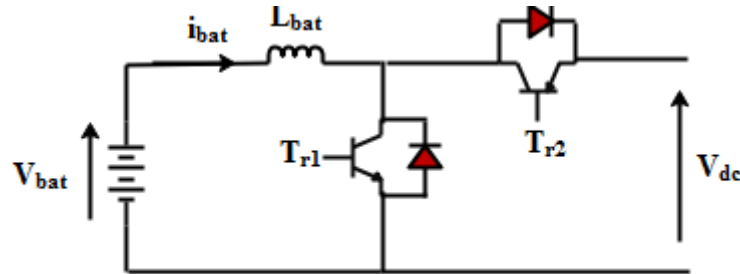


Figure.2.15. Convertisseur associé aux batteries.

- Séquences de fonctionnement et équations d'état:

De même, le modèle moyen du convertisseur réversible en courant de la batterie est adopté. Ce dernier permettra de tester les algorithmes de commande dans des modèles continus du système global. On distingue les deux phases de commutation des IGBT, représentés par un fil lorsqu'ils sont fermés et l'absence de connexion lorsqu'ils sont ouverts. Ainsi, la période de découpage (T_{pwm}) est scindée en deux [34].

- Première séquence de conduction $t \in [0; \alpha_{bat} \cdot T_{PWM}]$:

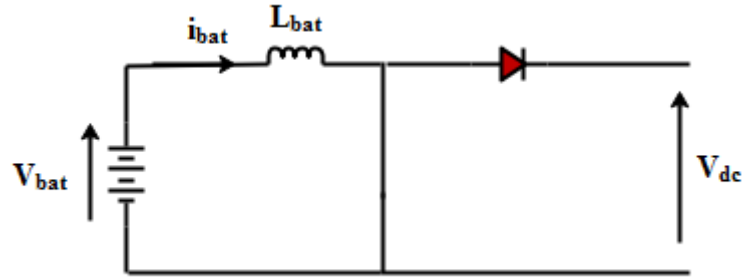


Figure.2.16. Le schéma de principe de la première séquence de conduction.

L'équation dynamique du courant de la bobine s'écrit :

$$V_{bat} = L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt} \tag{2.57}$$

- Deuxième séquence de conduction $t \in [\alpha_{bat} \cdot T_{PWM}; T_{PWM}]$:

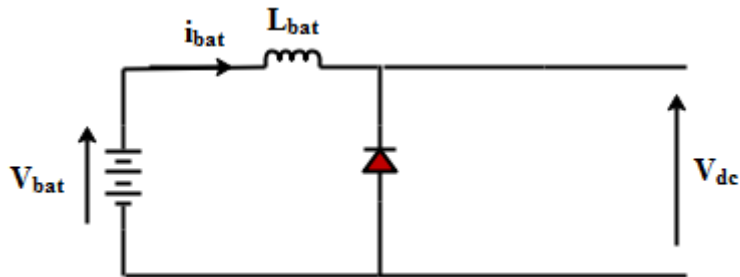


Figure.2.17. Le schéma de principe de la deuxième séquence de conduction.

La relation dynamique reliant la tension de la batterie et le bus est donnée par [35]:

$$V_{bat} = L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt} + V_{dc} \tag{2.58}$$

La moyenne temporelle de ces deux équations donne ainsi un modèle moyen de ce convertisseur :

$$L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt} = V_{bat} - (1 - \alpha_{bat})V_{dc} \tag{2.61}$$

Le modèle de l'équation (2.61) reproduit le comportement de la batterie en cas de charge ($i_{bat} < 0$) et de décharge ($i_{bat} > 0$).

Remarque : Le convertisseur bidirectionnel du supercondensateur est modélisé de façon analogue à celui de la batterie :

$$L_{sc} \frac{di_{sc}}{dt} = V_{sc} - (1 - \alpha_{sc})V_{dc} \quad (2.62)$$

2.4.5.3 Modèle de l'onduleur de tension :

Le schéma de principe de l'onduleur de tension triphasé monté en pont, alimentant le stator de la MSAP est donné par la figure (2.18). Il est constitué de trois bras de commutation à IGBT, où chaque bras est composé de deux cellules comportant chacune : Une diode et IGBT montés en tête bêche. Tous les éléments sont considérés comme des interrupteurs idéaux [26].

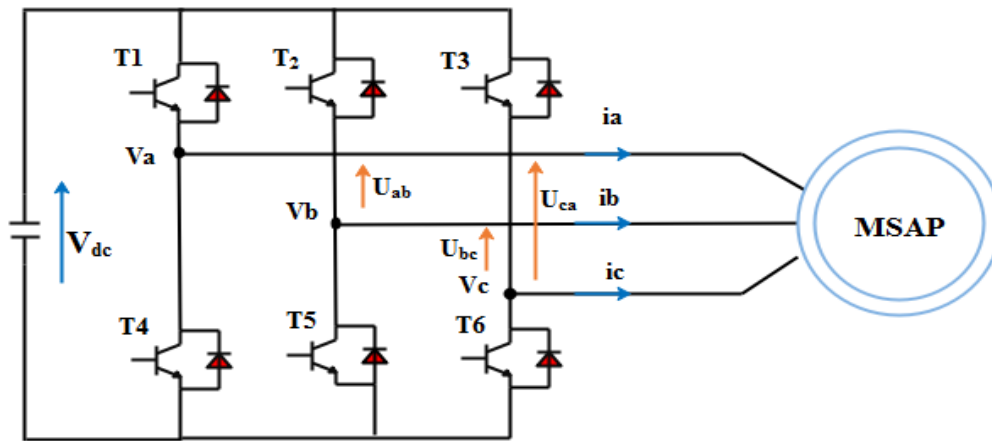


Figure.2.18. Structure d'un onduleur de tension à deux niveaux.

La sortie de l'onduleur dépendant de la tension de source continue et des états des commutateurs. La commande des deux commutateurs sur le même bras est complémentaire : La conduction de l'un d'eux implique le blocage de l'autre [24].

L'état de chacun des commutateurs est défini par les signaux de commande (S_a , S_b et S_c) comme suit :

$$S_a = \begin{cases} 1 & \text{si } T_1 \text{ fermé et } T_4 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } T_1 \text{ ouvert et } T_4 \text{ fermé} \end{cases} \quad (2.63)$$

$$S_b = \begin{cases} 1 & \text{si } T_2 \text{ fermé et } T_5 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } T_2 \text{ ouvert et } T_5 \text{ fermé} \end{cases} \quad (2.64)$$

$$S_c = \begin{cases} 1 & \text{si } T_3 \text{ fermé et } T_6 \text{ ouvert} \\ 0 & \text{si } T_3 \text{ ouvert et } T_6 \text{ fermé} \end{cases} \quad (2.65)$$

Les tensions de lignes délivrées par l'onduleur sont :

$$U_{ab} = V_a - V_b = V_{dc}(S_a - S_b) \quad (2.66)$$

$$U_{bc} = V_b - V_c = V_{dc}(S_b - S_c) \quad (2.67)$$

$$U_{ca} = V_c - V_a = V_{dc}(S_c - S_a) \quad (2.68)$$

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

$$V_a = \frac{V_{dc}}{3}(2S_a - S_b - S_c) \quad (2.69)$$

$$V_b = \frac{V_{dc}}{3}(2S_b - S_a - S_c) \quad (2.70)$$

$$V_c = \frac{V_{dc}}{3}(2S_c - S_a - S_b) \quad (2.71)$$

En conclusion, l'équation matricielle (2.72) lie les tensions simples de sorties aux séquences de conduction des interrupteurs, comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3}V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (2.72)$$

2.4.5.4 Réseau et convertisseur associé :

Dans le présent travail, l'onduleur coté réseau est un l'onduleur de tension triphasé. C'est en fait un convertisseur réversible, commandé en MLI et fonctionnant en redresseur/onduleur. La connexion du convertisseur de puissance au point de raccordement commun se fait principalement par l'intermédiaire d'un filtre R - L comme le montre la figure 2.19 [32]:

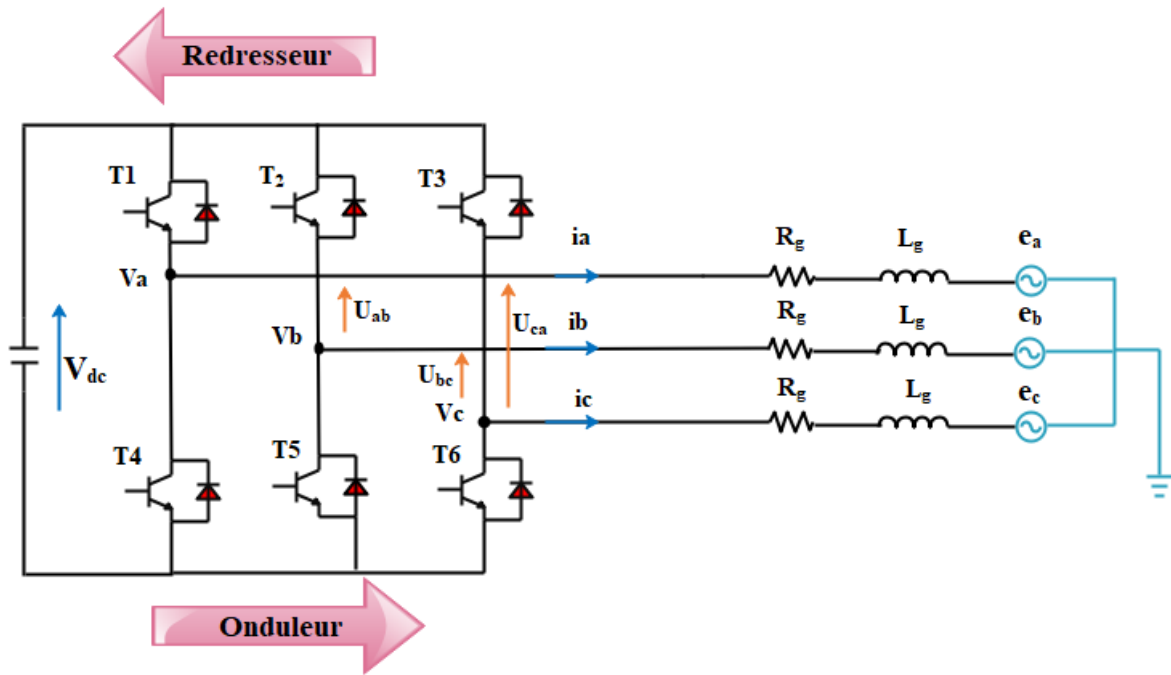


Figure.2.19. Structure de l'onduleur de tension à deux niveaux coté réseau.

Les équations de tension dans la figure 2.19 peuvent être écrites en utilisant la loi de Kirchhoff [36] comme suite.

$$L_g \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_g & 0 & 0 \\ 0 & -R_g & 0 \\ 0 & 0 & -R_g \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a - V_a \\ e_b - V_b \\ e_c - V_c \end{bmatrix} \quad (2.73)$$

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

$$L_g \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_g & L_g \cdot \omega \\ -L_g \cdot \omega & -R_g \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d - V_d \\ e_q - V_q \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

2.4.6 Modélisation du bus continu :

Généralement dans la modélisation, le bus continu est considéré comme un condensateur. Une fois tous les modèles élémentaires sont décrits, nous avons effectué le couplage des sources selon la configuration à bus continu. La puissance fournie par chaque source est centralisée sur le bus à courant continu comme le montre la figure (2.20) [37]. Cette manière de collecte des énergies permet d'éviter le problème de synchronisation, rencontrée dans le cas du bus alternatif.

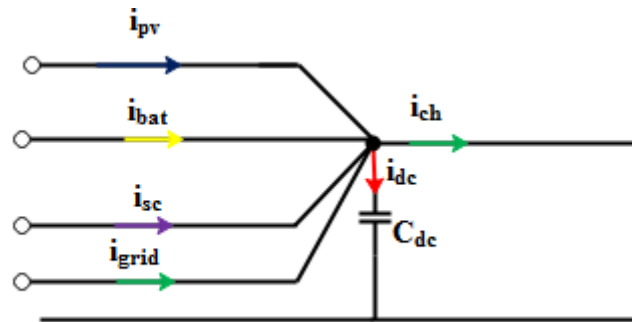


Figure.2.20.Modèle du bus continu

Le courant dans le bus continu est donné par :

$$i_{dc} = C \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (2.75)$$

$$i_{dc} = i_{pv} + i_{bat} + i_{sc} + i_{grid} - i_{ch} \quad (2.76)$$

2.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la structure de l'architecture étudiée et la modélisation des différents composants de l'ascenseur électrique hybride considéré, à citer : le module photovoltaïque, le système de stockage et le réseau électrique, ainsi que les convertisseurs statiques introduits. Le dimensionnement des éléments clés de l'ascenseur a été mené. 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 du groupe : moteur-ascenseur.

2.6. Références du chapitre 2:

- [1] Paire, D., "Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entraînements électriques hybrides: application à un ascenseur avec récupération d'énergie" these doctorat , Université de Technologie de Belfort-Montbéliard. 2010.
- [2] Crebier, J.-C., B. Revol, and J.-P. Ferrieux, "Boost-chopper-derived PFC rectifiers: Interest and reality". IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005. **52**(1): p. 36-45.
- [3] Viet, D.B., et al. "New high power—high ratio non isolated DC-DC boost converter for fuel cell applications". in 2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference. 2006. IEEE.
- [4] Tiar, M., Gestion Optimale D'énergie d'une Chaîne de Production Electrique Renouvelable.thèse doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [5] Erickson, R.W. and D. Maksimovic, "Fundamentals of power electronics". 2007: Springer Science & Business Media.
- [6] Kermadi, M., et al., "An effective hybrid maximum power point tracker of photovoltaic arrays for complex partial shading conditions". IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018. **66**(9): p. 6990-7000.
- [7] Tiar, M., et al., "Optimal energy control of a PV-fuel cell hybrid system".International Journal of Hydrogen Energy, 2017. **42**(2): p. 1456-1465.
- [8] M.ARROUF "Optimisation de l'ensemble onduleur, moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque", thèse doctorats université de Constantine,2007
- [9] Mohammedi, M., et al. "Fuzzy logic and passivity based control applied to hybrid DC power source using fuel cell and battery". in 2015 4th International Conference on Systems and Control (ICSC). 2015. IEEE.
- [10] Abadlia, I., T. Bahi, and H. Bouzeria, "Energy management strategy based on fuzzy logic for compound RES/ESS used in stand-alone application". International Journal of Hydrogen Energy, 2016. **41**(38): p. 16705-16717.
- [11] Paire, D., et al. "A real-time sharing reference voltage for hybrid generation power system". in 2010 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. 2010. IEEE.
- [12] Yahya, A.O.M., A.O. Mahmoud, and I. Youm, "Modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV/Eolien/Diesel)".Revue des énergies renouvelables, 2007. **10**(2): p. 205-214.
- [13] Meskani, A. and A. Haddi," Modeling and Simulation of an Intelligent Hybrid Energy Source based on Solar Energy and Battery". Energy Procedia, 2019. **162**: p. 97-106.

- [14] Mehdi, S., et al. "Implementation of a real-time energy management consisting of a battery and a supercapacitor". in 2017 5th International Conference on Electrical Engineering-Boumerdes (ICEE-B). 2017. IEEE.
- [15] Sadoun, R., "Intérêt d'une Source d'Énergie Electrique Hybride pour véhicule électrique urbain–dimensionnement et tests de cyclage".thèse doctorat , Ecole centrale de LILLE ,2020.
- [16] Glavin, M. and W. Hurley, "Optimisation of a photovoltaic battery ultracapacitor hybrid energy storage system". Solar energy, 2012. **86**(10): p. 3009-3020.
- [17] Thounthong, P., et al., "Energy management of fuel cell/solar cell/supercapacitor hybrid power source".Journal of power sources, 2011. **196**(1): p. 313-324.
- [18] Maker, H., "Optimisation et gestion d'énergie pour un système hybride: association Pile à Combustible et Supercondensateurs".thèse doctorat , l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard 2008,
- [19] Ayad, M., et al., "Passivity-based control applied to DC hybrid power source using fuel cell and supercapacitors".Energy Conversion and Management, 2010. **51**(7): p. 1468-1475.
- [20] Mahjoubi, C.m., "Modélisation multi-physique et gestion d'énergie d'un micro-réseau résidentiel autonome". Thèse doctorat, université Nantes. 2019
- [21] Bao, J., et al. "An Online Parameter Identification for Ultracapacitor Model by Using Recursive Least Square with Multi-forgetting Factor". in 2018 13th World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA). 2018. IEEE.
- [22] Noureddine, C., "Etude de la Robustesse des Contrôleurs Flous d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents avec Pilotage Vectoriel". Mémoire de Magister de l'Université de HADJ L AK H DAR-BATNA, 2011.
- [23] Zhang, X., L. Zhang, and Y. Zhang, "Model predictive current control for PMSM drives with parameter robustness improvement".IEEE Transactions on Power Electronics, 2018. **34**(2): p. 1645-1657.
- [24] Hayette, M., "Commande DTC Prédictive D'une Machine Synchrone à Aimants Permanents"thèse doctorat.Université Mohamed Khider, Biskra, 2016.
- [25] AISSOU, R., et al., "Nonlinear Predictive Control of a Permanent Magnet Synchronous Generator Used in Wind Energy System", in Journal of Electrical Engineering. 2014.
- [26] KENDOUCI, K., Contribution à la commande sans capteur mécanique d'une machine synchrone à aimants permanents. 2012, USTO.

- [27] Kerid, R., H. Bourouina, and R. Yahiaoui, "Parameter identification of PMSM using EKF with temperature variation tracking in automotive application". *Periodicals of Engineering and Natural Sciences* ISSN 2303-4521 Vol.6, No.2, November 2018, pp. 109~119 .
- [28] Kakosimos, P. and H. Abu-Rub, "Predictive speed control with short prediction horizon for permanent magnet synchronous motor drives". *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2017. **33**(3): p. 2740-2750.
- [29] Attou, A., A. Massoum, and A. Meroufel, "Comparison Between Two Different Speed Controls Of The Permanent Magnets Synchronous Machine" *International Conference on Electromechanical Engineering (ICEE'2012) Skikda, Algeria, 20-22 November 2012.*
- [30] Maamir, M., et al., "Neural network power management for hybrid electric elevator application". *Mathematics and Computers in Simulation*, 2020. **167**: p. 155-175.
- [31] Ouchen, S., et al., "Fuzzy-predictive direct power control implementation of a grid connected photovoltaic system, associated with an active power filter". *Energy Conversion and Management*, 2016. **122**: p. 515-525.
- [32] Ouchen, S., "contribution a la commande directe de puissance dediee au filtrage actif, associe a une source photovoltaïque". *thèse doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.*
- [33] Jyothi, V.M. and T.V. Muni, "An optimal energy management system for pv/battery standalone system". *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2016. **6**(6): p. 2538.
- [34] Mohammedi, M., et al., "Fuzzy logic and passivity-based controller applied to electric vehicle using fuel cell and supercapacitors hybrid source". *Energy Procedia*, 2014. **50**: p. 619-626.
- [35] Becherif, M., et al. "Design and sizing of a stand-alone recharging point for battery electrical vehicles using photovoltaic energy". in *2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. 2011. IEEE.
- [36] Azzouz, T., "Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA. *thèse doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2015.*
- [37] Belila, A., et al., "On energy management control of a PV-Diesel-ESS based microgrid in a stand-alone context". *Energies*, 2018. **11**(8): p. 2164.

Chapitre 03: Description Des Approches de Commande D'un SEH

3.1 Introduction :

Le système de conversion électromécanique étudié dans cette thèse est un système hybride, constitué des panneaux photovoltaïques, comme source principale, des batteries, des supercondensateurs, et du réseau, comme sources d'appoint, et destiné à déplacer la cage de l'ascenseur via une machine synchrone à aimants permanents (entraînement direct). Deux aspects principaux sont souvent abordés lorsqu'il est question de gestion d'énergie. Il s'agit de :

✓La stratégie de répartition des flux d'énergie mise en jeu par les différentes sources du système pour l'alimentation de la charge.

✓Le contrôle de la qualité de l'énergie produite afin de garantir par exemple la stabilité de la tension et de la fréquence au point d'interconnexion des sources d'énergie et de respecter leurs plages de valeurs admissibles (respecter les dynamiques des sources impliquées).

Dans ce même concept, le présent chapitre expose les deux stratégies de répartition des flux d'énergie du système l'une est basée sur la séparation fréquentielle et l'autre basé sur le réseau de neurone. Le principal objectif de la gestion des flux énergétiques consiste à trouver la puissance de réglage fournie par le sous-système (batterie, supercapacité et réseau électrique) à partir de la puissance demandée par la charge et la puissance disponible fournie par le générateur photovoltaïque. Le système de stockage envisagé (batterie, supercapacité) devrait assurer à fournir le manque, et à récupérer l'énergie électrique renvoyée par la charge en phase de restitution (amélioration de l'efficacité énergétique), et par conséquent l'introduction du réseau comme source d'appoint permet de prélever de l'énergie sur le réseau lors d'un manque noté, une fois la puissance crête des sources à puissance finie est atteinte; et d'en injecter le surplus.

3.2 Description du gestionnaire d'énergie :

L'idée principale derrière cette recherche est de concevoir le gestionnaire d'énergie capable de fournir à la charge l'énergie demandée et ayant la capacité de stocker l'énergie excédentaire selon un certain nombre de modes de fonctionnement qui seront présentés par la suite. Dans le présent travail, deux gestionnaires d'énergies sont proposés : un superviseur est basé sur la séparation fréquentielle, et l'autre basé sur le Réseau de neurone artificielle.

La figure 3.1 illustre le schéma global de notre SEH avec le système de supervision. Afin d'atteindre les objectifs de ce travail, le système de supervision peut être réalisé selon quatre parties ou étapes:

Etape 01 : elle concerne le contrôle de la tension du bus continu.

Etape 02 : cette étape concerne les techniques de gestion d'énergie entre les différents composants du SEH.

Etape 03 : elle concerne la commande MPPT du GPV.

Etape 04 : elle concerne la commande des éléments suivants :

- Contrôle des hacheurs réversible en courant situés entre le système de stockage (batterie et de SC) et le bus DC.
- Contrôle de l'onduleur de l'MSAP et de l'onduleur réversible coté réseau.

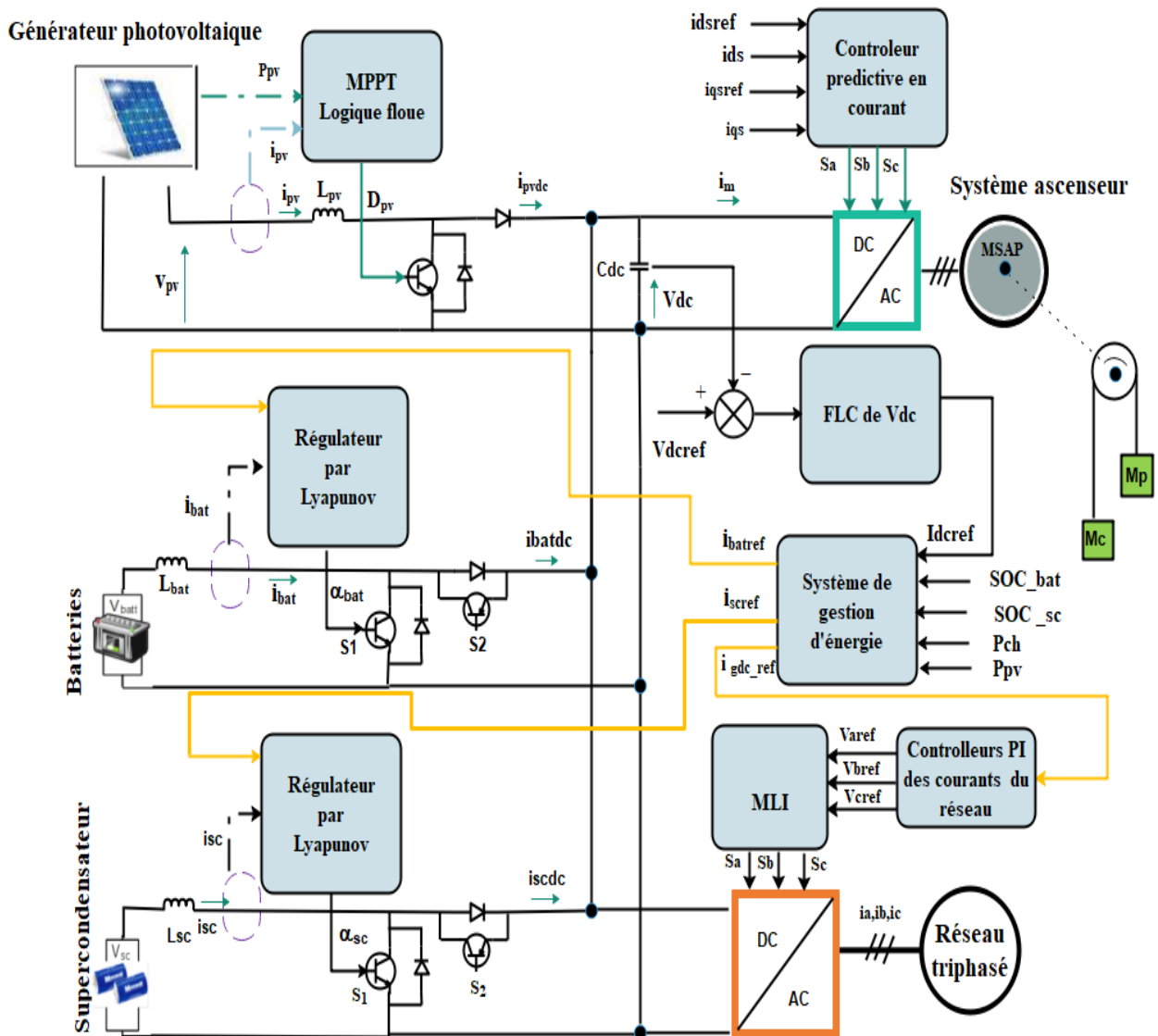


Figure.3.1. Schéma synoptique de l'installation hybride.

3.2.1 Contrôleur robuste du bus continu :

Les différentes sources d'énergie du système ascenseur sont connectées à un bus commun via les différents convertisseurs. Ce bus est appelé DC bus (Direct Current Bus ou Bus à Courant Continu). La régulation de la tension de ce bus continu peut être satisfaite par action sur la source principale (le panneau photovoltaïque), auxiliaire comme les batteries et les SC ou sur le réseau, comme en contrôlant la puissance fournie ou absorbée par chaque source à travers la régulation de ces courants en gardant une tension du bus continu constante comme le montre la figure 3.2.

Il est à noter ici que la collecte des différentes puissances fournies sur un même bus continu de tension bien régulée, permettra d'envoyer ces puissances vers la charge, sans avoir le souci d'assurer une synchronisation, comme il est le cas du bus alternatif. Comme on peut le constater, un niveau haut de contrôle (système de gestion) fournira selon les différents scénarios (modes de fonctionnement) les puissances de référence de chaque source, issue d'une régulation adéquate de la tension du bus, alors que le niveau bas est dédié à la commande rapprochée de chaque source et son convertisseur statique associé [1]

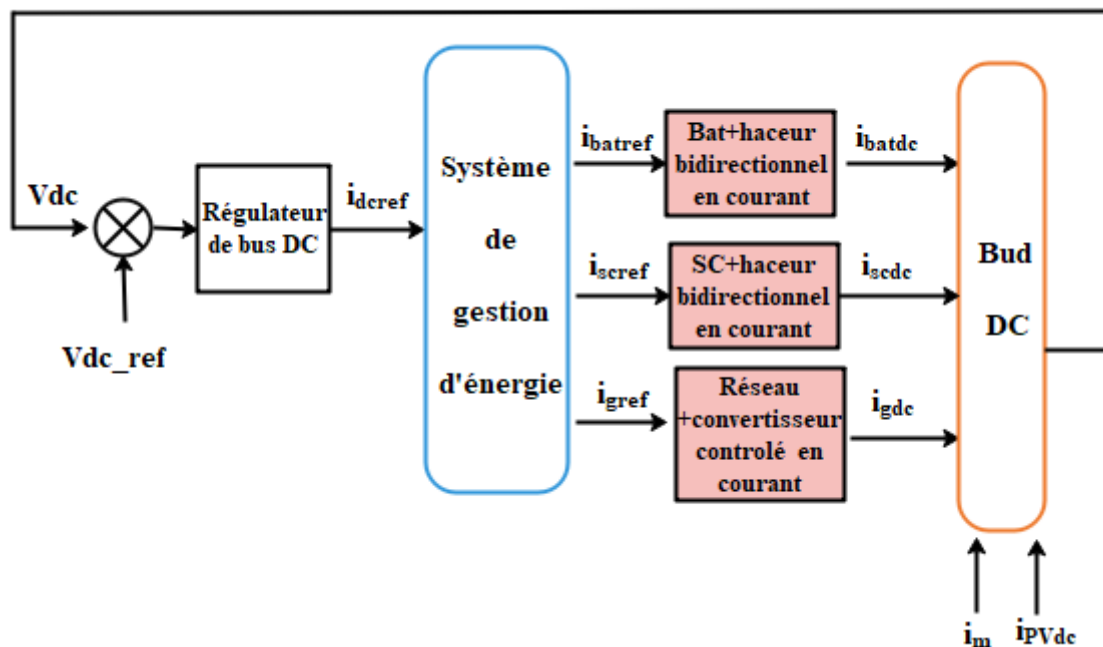


Figure.3.2.Synoptique du contrôle et de gestion d'énergie.

Le comportement du bus DC peut être modélisé par l'équation (3.1)

$$i_c = C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} = i_{sc_{dc}} + i_{bat_{dc}} + i_{pv_{dc}} + i_{gdc} - i_m \quad (3.1)$$

i_m désigne le courant du moteur coté continu.

$i_{sc_{dc}}, i_{bat_{dc}}, i_{pv_{dc}}$ désignent les courants des différentes sources, en aval des différents convertisseurs statiques associés. Par conséquent, une régulation adéquate par logique floue de la tension du bus continu autour de sa référence ($V_{dc_{ref}}=100V$) génère le courant dit 'd'appoint' délivré par le système 'super capacité, batterie et réseau' s'identifie par :

$$I_{dc_{ref}} = i_c + i_{pv_{dc}} - i_m \quad (3.2)$$

La conception du contrôleur FLC passe via les quatre étapes classiques : fuzzification, bases de règles, inférence floue et défuzzification [2], comme illustré sur la figure.3.3.

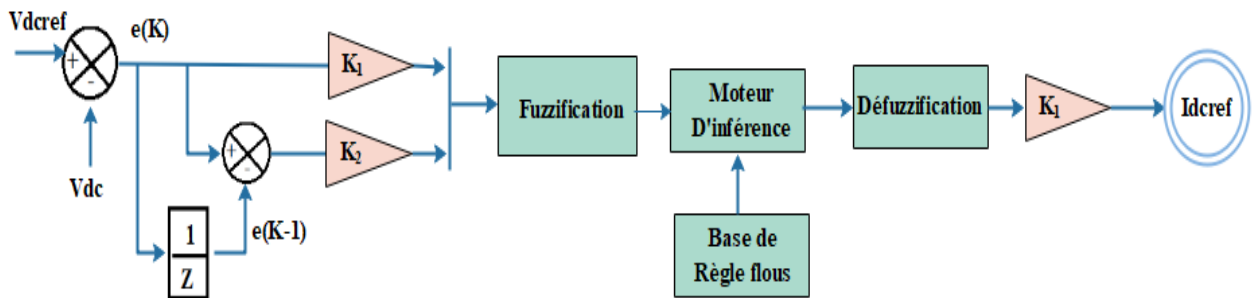


Figure.3. 3.Régulation du bus continu par le FLC.

Où l'erreur de tension $e(k)$ et sa variation $\Delta e(k)$ sont choisies comme entrées du régulateur flou. Dans cette configuration, l'erreur de poursuite e et sa dérivée Δe , obtenues à deux périodes d'échantillonnage (k) et $(k-1)$ sont considérés comme des entrées [3] :

$$e = V_{dcref} - V_{dc} \quad (3.3)$$

$$\Delta e = e(k) - e(k - 1) \quad (3.4)$$

Les gains de normalisations $K1, K2$ permettent de transformer les entrées réelles en quantités floues, alors que $K3$ effectue l'opération inverse pour la sortie. Pour obtenir de bonnes performances (précision et temps de réponse), lors des changements notables de la perturbation ($I_{pv_{dc}}, I_m$), vingt-cinq règles floues, dressées sur le tableau.3.1 sont choisies.

de \ e	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	NB	NB	NS	NS	ZO
NS	NB	NS	NS	ZO	PS
ZO	NS	ZO	ZO	PS	PS
PS	NS	PS	PS	PS	PB
PB	ZO	PS	PS	PB	PB

Tableau.3.1. Table des règles de décision floues.

En outre, pour éviter des calculs durs, des fonctions d'appartenance triangulaires sont choisies pour les entrées et la sortie comme représentées sur la figure.3.4 [4].

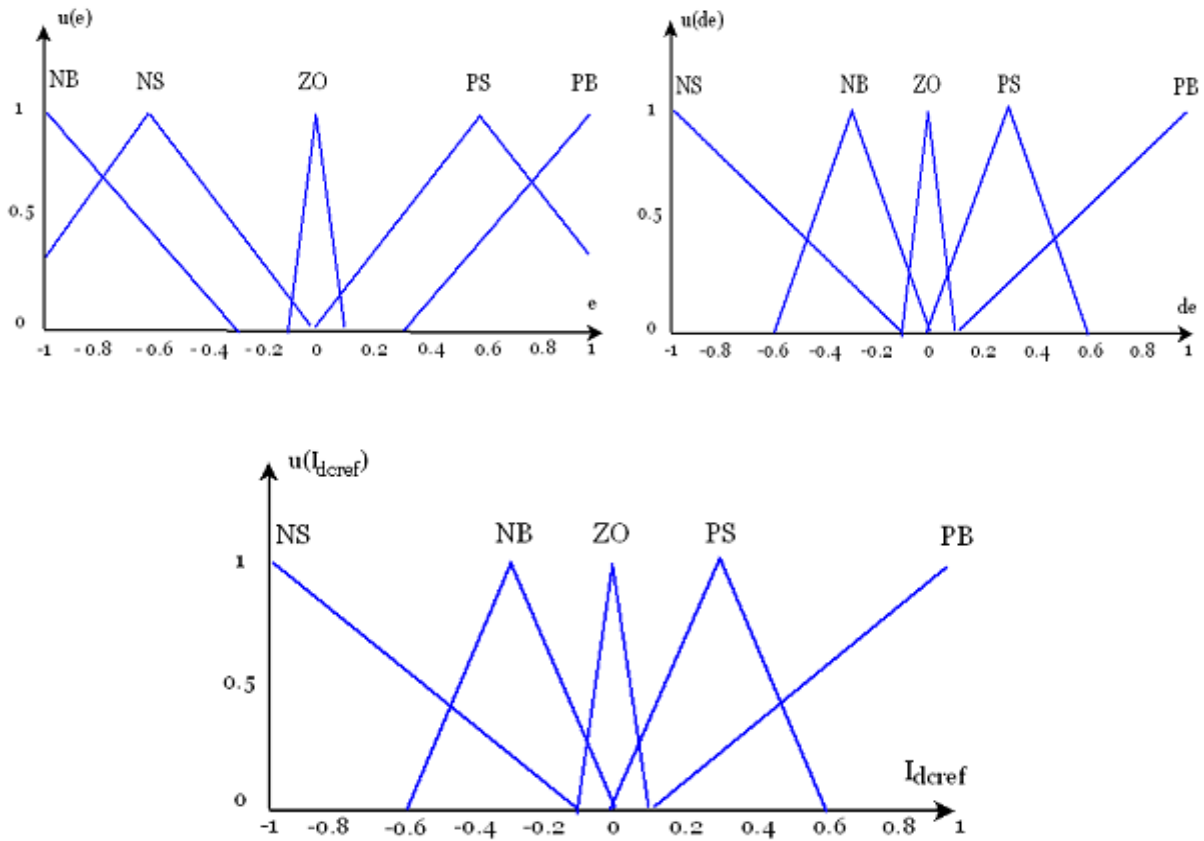


Figure.3.4. Fonctions d'appartenance des entrées et de la sortie.

L'étape d'inférence floue est réalisée par la méthode de Mamdani, alors que la défuzzification utilise le centre de gravité comme technique pour calculer la sortie i_{dref} du contrôleur flou comme suit:

$$i_{dcref} = \frac{\sum_{i=1}^{25} i_{dcref_i} \cdot \mu(i_{dcref_i})}{\sum_{i=1}^{25} \mu(i_{dcref_i})} \quad (3.5)$$

3.2.2 Description des Modes de fonctionnement du SGE :

On peut définir, pour gérer les échanges énergétiques entre les différents sources quatre modes possibles de fonctionnement, où chaque mode de fonctionnement est défini en fonction des états de charge des systèmes de stockage (la batterie et le SC) et de la puissance nette (P_{net}), identifiée comme la différence entre la puissance de générateur photovoltaïque (P_{pv}) et la puissance de la charge (P_{charge}), quantifiée au sein du bus continu.

$$P_{net} = P_{pv} - P_{ch} \quad (3.6)$$

Durant toute la période de simulation, le générateur photovoltaïque est commandé en MPPT en utilisant la logique floue (FLC) qui permet à ce dernier de générer toute sa puissance maximale quand il est en service. L'état de charge des batteries et des supercondensateurs détermineront les modes de fonctionnement du gestionnaire d'énergie qui se présentent comme suit:

1) (Mode1) : Mode de décharge de la batterie.

Dans ce mode, La différence de la puissance est inférieure à zéro ($P_{net} < 0$), cela indique que l'énergie produite par le générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour faire alimenter la charge. Dans ce cas, la batterie intervient pour fournir l'énergie nécessaire afin de couvrir la demande de la charge jusqu'à sa limite inférieure SOC_min, et les SCs produit l'énergie manquante demandée par la charge qui fournit immédiatement le courant transitoire nécessaire en montée de l'ascenseur.

2) (Mode2): Mode de demande de réseau.

Dans ce mode P_{net} peut être positive ou négative. Le système de gestion d'énergie déconnecte la batterie pour éviter qu'elle ne s'endommage puisque l'état de charge de la batterie (SOCb) diminue en dessous de 30%. Dans ce cas, le réseau électrique public est utilisé comme source de secours pour compenser la puissance requise par la charge, cela signifie que P_{net} est négative.

En descente de l'ascenseur, les SCs absorbent le surplus d'énergie du moteur, c'est le cas où P_{net} est positive. C'est une phase dit de récupération d'énergie.

3) (Mode3) : Mode de charge de la batterie.

Dans ce mode la puissance générée par la source principale (GPV) est supérieure à la demande de la charge et il y a suffisamment d'énergie pour alimenter la charge et de stocker l'énergie excédentaire dans la batterie jusqu'à ce que son état charge atteigne son maximum (95%), cela indique que P_{net} est positive. Il est à noter que dans le monté de l'ascenseur la puissance nette devient négative et dans ce point le SC couvre la demande de la charge.

En descente de la cage d'un niveau à un niveau plus inférieur, les SC absorbent le surplus de l'énergie du moteur, et le système ré-fonctionne au régime de récupération d'énergie.

4) (Mode4) : Mode d'injecté au réseau

Dans ce mode de fonctionnement, la puissance nette est positive et un excès de puissance est alors remarqué, le SGE déconnecte la batterie du système et injecte le surplus de puissance au réseau via une commande MLI du convertisseur DC/AC réversible coté réseau.

3.2.3. Gestionnaire de l'énergie basée sur la séparation fréquentielle :

A partir de la classification des différents éléments dans le domaine fréquentiel, une stratégie de gestion d'énergie basée sur le principe de la séparation fréquentielle est proposée. Il s'agit d'une répartition de la puissance entre les différents composants du système, sources et/ou éléments de stockage tout en respectant les caractéristiques dynamiques, techniques et énergétiques des différents organes [5]. Vu sous l'angle fréquentiel, les SCs peuvent aisément assurer les composantes de puissance de haute fréquence (HF), contrairement la batterie est généralement limitée à la génération des basses fréquences (BF) compte tenu de leur dynamique relativement lente.

D'après la figure (3.5) le filtre passe bas de fréquence de coupure f_c , est alimenté par le courant $I_{dc_{ref}}$ généré à la régulation de la tension du bus continu. Il génère la composante basse fréquence qui va être prise en compte par les batteries ($I_{bat_{ref}}$) comme suit [5]:

$$I_{BF}(s) = I_{bat_{ref}}(s) = \frac{2\pi f_c}{2\pi f_c + s} I_{dc_{ref}}(s) \quad (3.7)$$

La différence entre le courant $I_{dc_{ref}}$ et la composante basse fréquence permet de déterminer le courant haute fréquence ($I_{sc_{ref}}'$), qui est destinée aux supercondensateurs.

$$I_{sc_{ref}}' = I_{dc_{ref}} - I_{bat_{ref}}' \quad (3.8)$$

Le courant de réseau coté continu est exprimé comme suit :

$$I_{g_{ref}} = I_{dc_{ref}} - (I_{bat_{ref}}' + I_{sc_{ref}}') \quad (3.9)$$

On suppose que τ est le temps de réponse du courant de la batterie. Souvent, la constante de temps t du filtre est fixée à 3τ afin d'éviter le vieillissement rapide de la batterie [6]. Pour une mesure de sécurité, le filtre passe-bas du SGE permet d'obtenir une consigne de courant de la batterie avec une constante de temps d'une seconde. Par conséquent, la fréquence de coupure considérée sera de 1 Hz. Il est à noter que la fréquence f_C est maintenue fixe pour toute la durée de simulation.

Vu les caractéristiques des batteries et des supercondensateurs, leurs états de charge doivent être pris en considération dans l'élaboration des références de ces courants. Un commutateur, piloté par une fonction de l'état de charge et du courant de référence $I_{dc_{ref}}$, permet de désactiver les batteries ou les supercondensateurs en affectant 0 respectivement à $I_{bat_{ref}}$ ou $I_{sc_{ref}}$. Le comportement de ces commutateurs est résumé par l'équation (3.10) pour les batteries et par l'équation (3.11) pour les supercondensateurs. Lorsque l'état de charge des éléments de stockage est en dessous de 30%, une charge progressive est effectuée automatiquement [7]. Il est à noter que ce même filtre permet de piloter le fonctionnement de la batterie en statique et les supercapacités en dynamique.

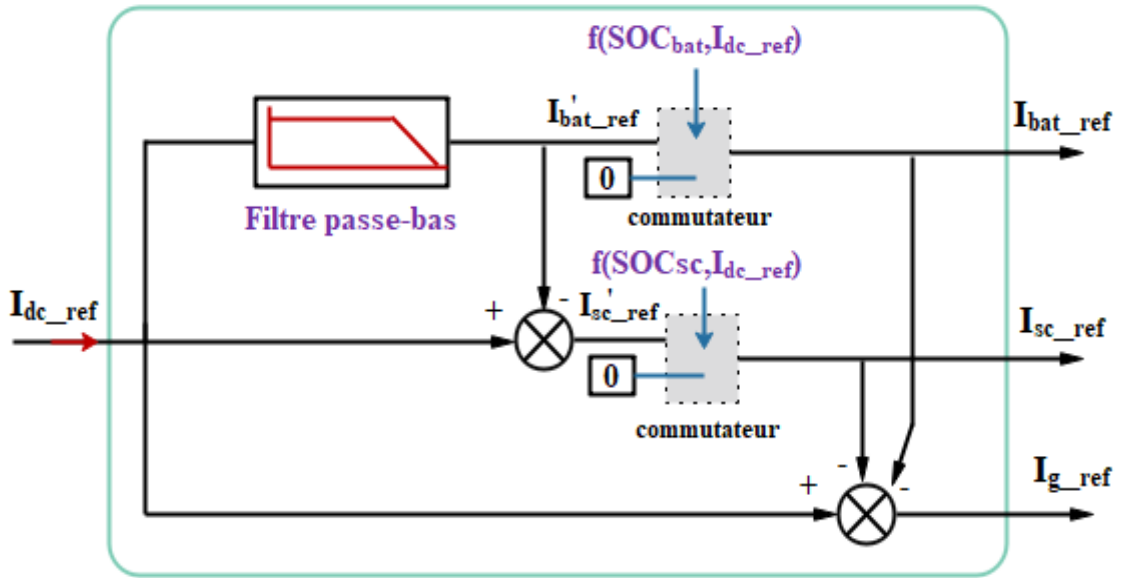


Figure.3.5. Système de Gestion d'Énergie (SGE) par la technique de séparation de fréquence.

$$I_{batref} \begin{cases} 0, \text{ if } \begin{cases} I_{dcref} < 0 \text{ and } SOC_{bat} > 95\%, \\ I_{dcref} > 0 \text{ and } SOC_{bat} < 30\% \end{cases} \\ I_{batref}, \text{ if } \begin{cases} I_{dcref} < 0 \text{ and } SOC_{bat} < 95\%, \\ I_{dcref} > 0 \text{ and } SOC_{bat} > 30\%, \end{cases} \end{cases} \quad (3.10)$$

$$I_{scref} \begin{cases} 0, \text{ if } \begin{cases} I_{dcref} < 0 \text{ and } SOC_{sc} > 95\%, \\ I_{dcref} > 0 \text{ and } SOC_{sc} < 30\% \end{cases} \\ I_{scref}, \text{ if } \begin{cases} I_{dcref} < 0 \text{ and } SOC_{sc} < 95\%, \\ I_{dcref} > 0 \text{ and } SOC_{sc} > 30\%, \end{cases} \end{cases} \quad (3.11)$$

Dans ce qui suite, un gestionnaire d'énergie basé sur le réseau de neurone artificielle (RNA) de type **Perceptron Multicouches (MLP)** est proposé, entraîné hors ligne via la technique précédente (la méthode de séparation de fréquence). En utilisant ce processus d'apprentissage les poids de connexions du RNA sont ajustés, de sorte que le réseau de neurones produit une sortie plus proche des valeurs cibles. Pour que le RNA réussisse à réaliser le processus d'apprentissage, il est nécessaire de modéliser l'environnement dans lequel le RNA opère, c'est-à-dire qu'il faut savoir le type d'informations à fournir au réseau (les entrées et la sortie désirée). De plus, il faut comprendre comment le réseau ajuste les poids des connexions, c'est-à-dire quelles sont les règles d'apprentissage qui gouvernent cet ajustement ?

3.2.4. Gestion de l'énergie basée sur le réseau de neurone :

Le concept de réseaux de neurones artificiels (RNA) est associé à un système de traitement du signal et à des informations constituées d'un grand nombre de processeurs simples, appelés neurones ou cellules, qui émulent les systèmes nerveux biologiques dans des programmes ou des circuits numériques. Le but, d'un point de vue global, est d'exécuter des calculs complexes et de trouver, par apprentissage, une relation non linéaire entre des données numériques et des paramètres [8]. Dans ce qui suit quelque concepts de base associés au RNA utilisé dans la simulation sont présentés.

3.2.4.1 Neurone formel :

Le comportement des neurones du système nerveux a été repris pour la création du concept mathématique de « neurones formels ». Ces neurones reçoivent les informations produites par d'autres nœuds à travers les connexions d'entrée. Chaque neurone (j) effectue en premier temps une somme pondérée des N valeurs en entrée. Les poids affectés aux entrées d'un neurone sont stockés dans une matrice W, où la valeur W_{ij} représente le poids de la connexion d'entrée x_i du neurone j, tel qu'illustré par la figure 3.6. À cette somme est ajoutée la valeur de seuil b_j qui représente la sortie d'un neurone « biais ». Le modèle mathématique d'un neurone dans la $i^{ième}$ couche est donné par [9]:

$$Y_j = f(\sum_1^n W_{ij} \cdot x_i + b_j) \tag{3.12}$$

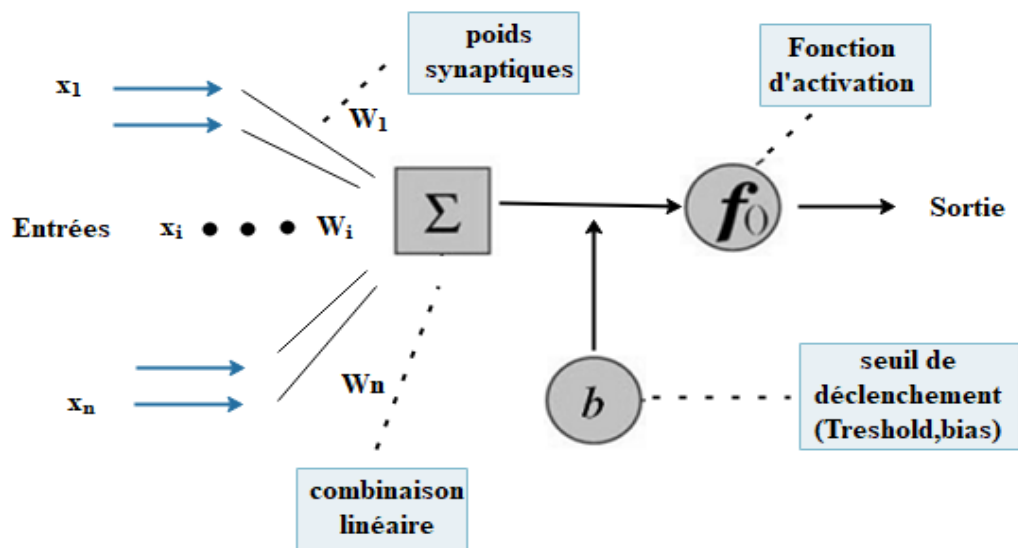


Figure.3.6.Structure générale du neurone formel.

Où : f désigne la fonction d'activation, ou d'état f , permet au neurone d'être activé ou non, en fonction de son potentiel d'entrée. Elle est exprimée par la fonction sigmoïde, la fonction tangente hyperbolique et les fonctions gaussiennes sont les plus utilisées. La fonction tangente hyperbolique qui produit des valeurs positives et négatives semble être plus rapide que les fonctions qui ne produisent que des valeurs positives comme la fonction sigmoïde, à cause des meilleures conditions numériques. Le choix de la fonction d'activation est lié à la nature du problème à traiter. Les fonctions à seuils par exemple sont utilisées pour reproduire les fonctions logiques et les fonctions radiales sont plutôt efficaces pour la classification. Quelques exemples de fonctions d'activation sont présentés dans la Figure 3.7 [10].

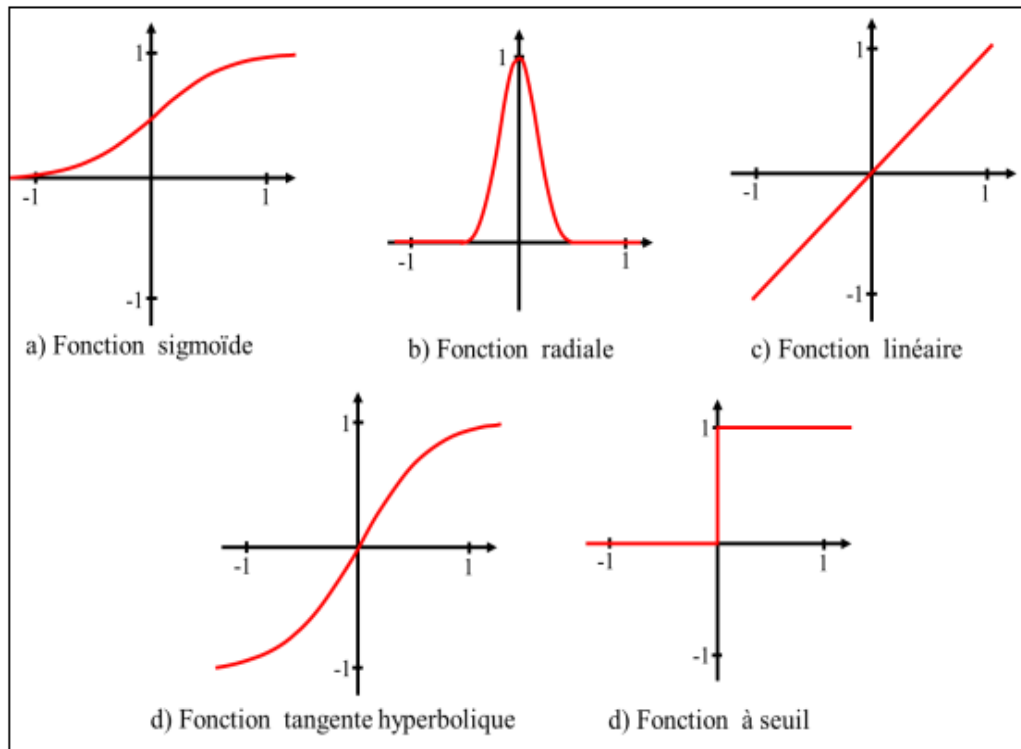


Figure.3.7.Exemples de fonctions d'activation.

Le réseau de neurone artificiel est défini par sa topologie, qui représente le type de connexion existant entre les divers neurones du réseau, par la fonction d'activation qui le caractérise et par les méthodes d'apprentissage utilisées pour trouver une relation non linéaire optimale par approximation entre les variables d'entrées et de sorties [11].

3.2.4.2 Perceptron Multicouches (MLP) :

Les Perceptrons Multicouches (Multilayer Perceptron ou MLP), sont des réseaux de neurones non bouclés dont les nœuds sont organisés en trois niveaux ou plus appelés « couches ». Les couches voisines sont complètement connectées, c'est-à-dire, les nœuds forment un graphe orienté acyclique dans lequel l'information circule dans un seul sens, c'est-à-dire, de l'entrée vers la sortie. Un MLP est constitué de trois types de couche, une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées, et une couche de sortie : Nous distinguons les unités de la première couche (entrée), de la dernière couche (sortie) et des couches intermédiaires (cachées)[12].

- La couche d'entrée est la première couche du réseau. Les activations de cette couche réceptionnent l'information fournie par les vecteurs d'entrée de chaque instance. Cette couche ne comporte donc pas de connexions en entrée venant d'autres nœuds. Elle est par contre complètement connectée à la première couche cachée.
- La deuxième est dite couche cachée (ou couche intermédiaire), elle constitue le cœur du réseau de neurones, ses fonctions d'activation sont du type sigmoïde. Le nombre de couches cachées est défini d'une manière heuristique. Il est évitable d'avoir des couches cachées moins larges (en nombre de neurones) que la couche d'entrée, de manière à ne pas compresser ni perdre d'informations [13].
- La troisième couche est la couche de sortie, sa fonction d'activation est du type linéaire bornée.. La sélection d'une couche est déterminée par l'architecture du réseau et la méthode d'apprentissage [14], les activations des neurones de la couche de sortie représentent les valeurs du vecteur de sortie du MLP.

La structure du RNA de type MLP de notre application est représentée sur la (figure 3.8) à 4 nœuds d'entrée, 20 nœuds cachés et 3 nœuds de sortie. Les entrées sont: la puissance de GPV (PPV), la demande de puissance (P_{ch}), l'état de charge de la batterie (SOC_b) et l'état de charge de supercondensateur (SOC_{sc}). Concernant le changement de ces entrées, le RNA fournit la puissance de référence des éléments de stockage, respectivement P_{bat} et P_{sc} et la puissance de référence du réseau P_{res_ref} , pour couvrir la demande de la charge à chaque mode de fonctionnement.

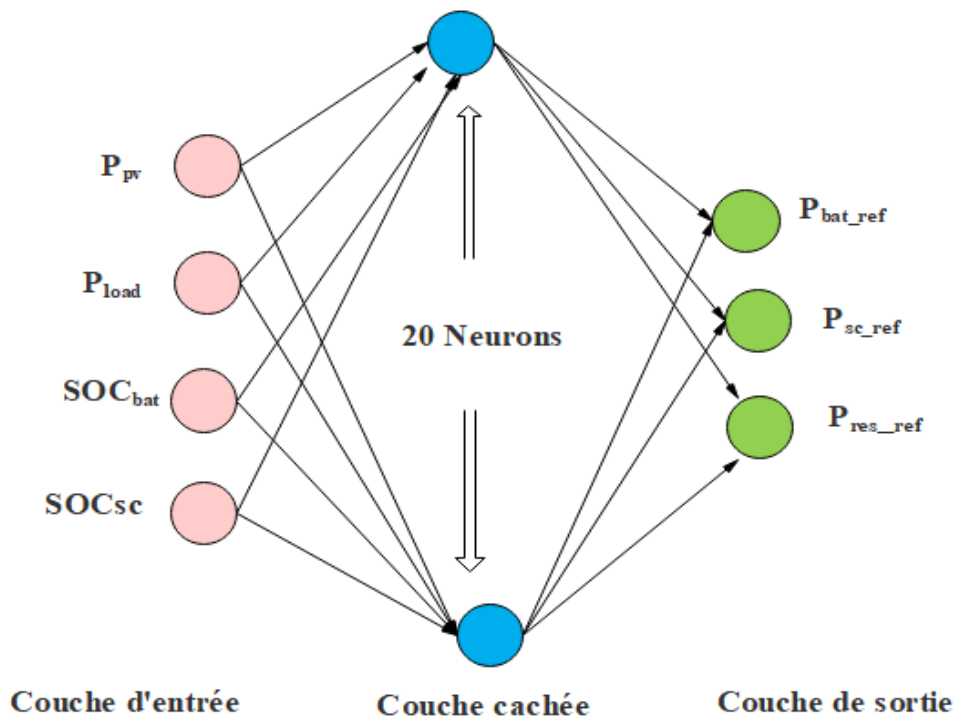


Figure.3.8. Réseau de neurones de type perceptron à 20 couche cachée.

3.2.4.3 Apprentissage du RNA Multicouches (MLP) :

Des procédures d'apprentissage sont utilisées pour déterminer les paramètres du réseau pour qu'il se comporte correctement face à des entrées données. Selon le degré de supervision utilisé à l'apprentissage, les RN se classent en trois catégories :

- **Apprentissage non supervisé:** l'ajustement des paramètres repose sur des critères internes au réseau; aucune information de référence n'est disponible.
- **Apprentissage semi-supervisé :** ou apprentissage par renforcement: l'utilisateur ne possède que des indications imprécises sur le comportement final désiré (correct/incorrect).
- **Apprentissage supervisé:** les paramètres du réseau sont ajustés via un comportement de référence précis. Cependant ce sont les réseaux à apprentissage supervisé qui sont utilisés dans notre simulation.

La phase d'apprentissage des MLP consiste à adapter les poids des connexions en fonction des erreurs de prédiction constatées à chaque classification d'une nouvelle instance. La rétro propagation du gradient (backpropagation) est la méthode la plus utilisée pour l'adaptation des poids. Cet algorithme permet de

déterminer le gradient de l'erreur pour chaque neurone du réseau en partant de la dernière couche et en arrivant jusqu'à la première couche cachée. L'objectif de la rétro propagation du gradient est d'ajuster les poids des connexions dans le but de minimiser l'erreur quadratique qui représente l'écart entre la sortie attendue (la référence) et la sortie produite par le réseau (hypothèse) correspondant à un vecteur d'entrée donné. N représente la taille des vecteurs en sortie.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (ref_i - hyp_i)^2 \quad (3.13)$$

3.3 Commande rapprochée des convertisseurs statiques :

3.3.1 Commande côté source photovoltaïque (PV) :

Dans ce travail, Le générateur photovoltaïque est dimensionnée selon la puissance de la charge. A cet effet, et pour permettre un rendement d'utilisation adéquat, une extraction de sa puissance maximale s'impose. Pour ce faire, un algorithme MPPT qui utilise la théorie de la logique floue [15] est utilisée pour remédier au problème d'oscillation de la méthode perturbation et observation (P&O). Le contrôleur flou proposé optimise l'amplitude du rapport cyclique du hacheur boost pour minimiser les oscillations et pour avoir une réponse rapide.

La commande par la logique floue a le même but qu'une commande réalisée en automatique classique. Elle en diffère cependant sur les points suivants [16].

- La connaissance mathématique du fonctionnement du processus n'est pas nécessaire.
- La maîtrise du système à régler avec un comportement complexe (fortement non linéaire et difficile à modéliser).
- L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non linéaire).
- Piloter un processus en utilisant les connaissances et l'expérience d'un opérateur humain qualifié « expert » ; les connaissances de l'expert sont schématisées à l'aide d'un ensemble de règles de conduite basées sur un vocabulaire symbolique.
- Le régulateur flou ne traite pas une relation mathématique bien définie (algorithme de réglage), mais utilise des inférences avec plusieurs règles, se basant sur des variables linguistiques.

3.3.1.1 Configuration interne d'un régulateur par logique floue :

La figure (3.9) montre la structure de base du contrôleur flou MPPT, Généralement, il contient trois éléments principaux: La fuzzification, l'inférence et enfin la défuzzification [17], [18].

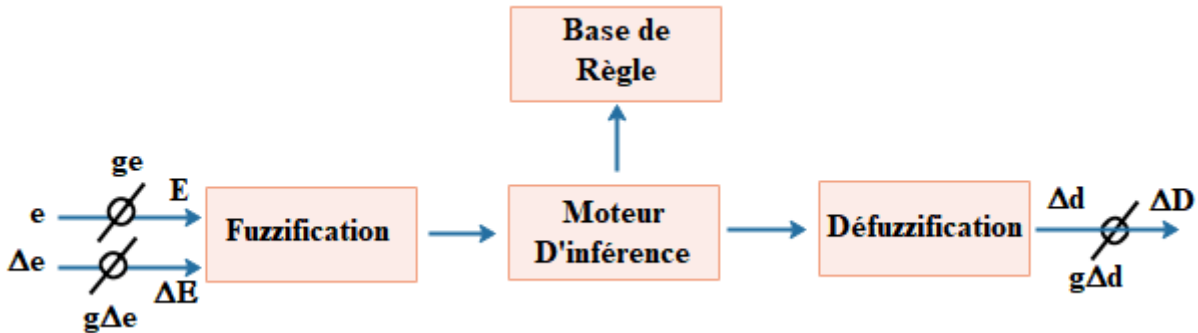


Figure.3.9. Structure de base du contrôleur flou.

1) Fuzzification

Cette étape contient la méthode de conversion d'entrées numériques en variables linguistiques [19]. Les variables d'entrée à un contrôleur flou MPPT sont l'erreur e et la dérivée de l'erreur Δe . On peut exprimer respectivement e et Δe par [18]:

$$e = \frac{\partial P_{PV}}{\partial V_{PV}} = \frac{P_{PV}(t) - P_{PV}(t-1)}{V_{PV}(t) - V_{PV}(t-1)} \tag{3.14}$$

$$\Delta e = e(t) - e(t - 1) \tag{3.15}$$

Avec $P_{PV}(t)$ et $V_{PV}(t)$, $P_{PV}(t - 1)$ et $V_{PV}(t - 1)$ désignent respectivement la puissance et la tension instantanée du générateur PV captées à deux périodes d'échantillonnage. La valeur du gradient $e(t)$ montre, si le point de fonctionnement pour la charge utilisée à l'instant t se situe du côté gauche ou du côté droit du point de puissance maximale sur la caractéristique P-V. La valeur $\Delta e(t)$ exprime le sens de déplacement de ce point. Les deux entrées sont normalisées au moyen de gains de normalisation, (ge) pour l'erreur et ($g\Delta e$) pour la dérivée de l'erreur. Un gain de dénormalisation, ($g\Delta d$) est affecté sur la sortie. Pour la mise en œuvre de notre MPPT, une règle de 7×7 , type Mamdani est utilisée. C'est la fameuse règle couramment utilisée pour l'asservissement des systèmes dynamiques [20] .

La figure (3.10) donne les fonctions d'appartenance choisies pour les variables de l'entrée et de la sortie.

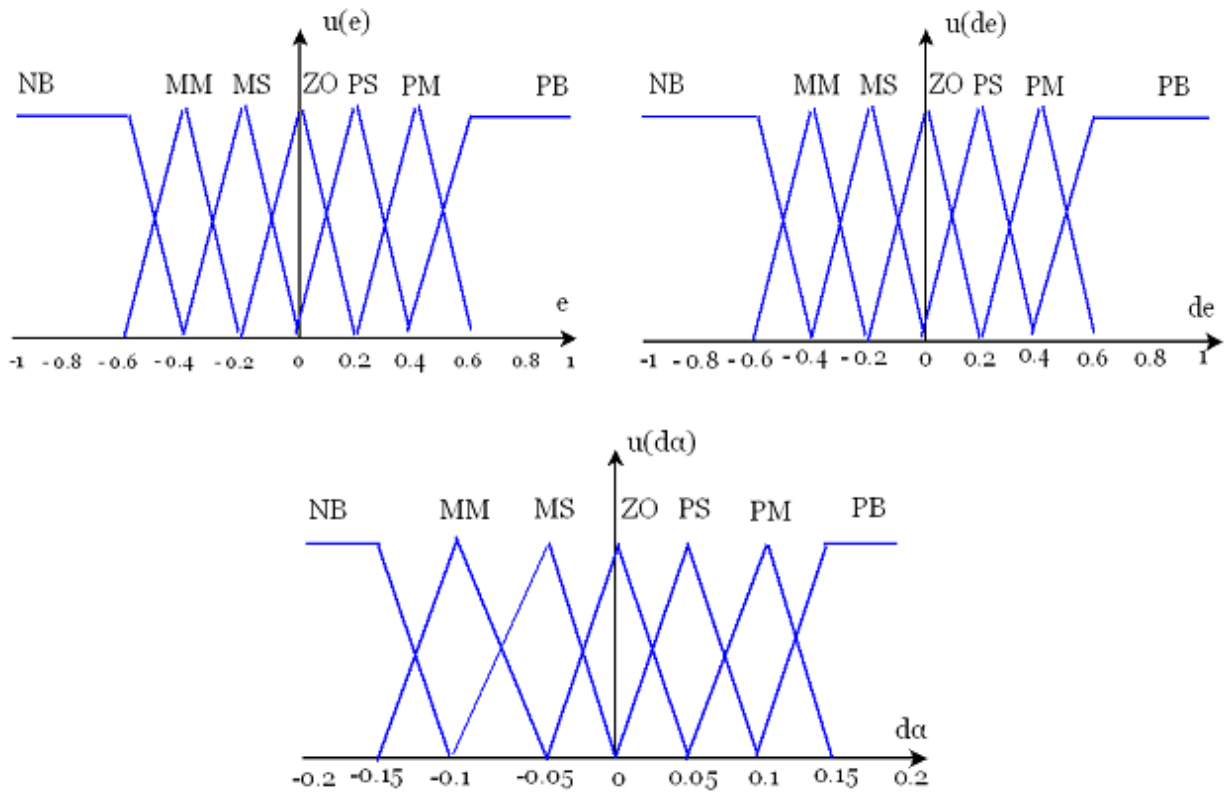


Figure.3.10. Les fonctions d'appartenance pour les variables d'entrées et de sortie.

2) Méthode d'inférence

La matrice des règles que nous utilisons est représentée sur le tableau (3.2), alors que la variable d'erreur (e) est transformée en termes de variable linguistique à l'aide de cinq sous-ensembles flous qui sont désignés précédemment. Nous avons choisi dans cette étude la méthode de Mamdani comme une méthode d'inférence floue. Elle consiste à utiliser l'opérateur "MIN" pour le "ET", et l'opérateur "MAX" pour le "OU" [21].

de \ e	MB	MM	MS	ZO	PS	PM	PB
MB	MB	MB	MB	MB	MM	MS	ZO
MM	MB	MB	MB	NM	MS	ZO	PS
MS	MB	MB	MM	MS	ZO	PS	PM
ZO	MB	MM	MS	ZO	PS	PM	PB
PS	MM	MS	ZO	PS	PM	PB	PB
PM	MS	ZO	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Tableau. (3.2).Base de règles floues

3) Défuzzification

A cette étape, il est nécessaire de passer du «domaine flou» vers le «domaine réel», c'est la défuzzification. Cette étape peut être envisagée avec différentes méthodes, mais la plus populaire est appelée méthode de« centre de gravité ». Le centre de gravité de la fonction d'appartenance Δd est calculé simplement pour obtenir les valeurs réelles ; elle est donnée par [22]:

$$\Delta D = (\sum_{k=1}^m \mu(D_i) * D_i) / (\sum_{k=1}^n D_i) \tag{3.16}$$

Avec $\mu(D_i)$, le degré d'activation de la $i^{i\text{ème}}$ règle.

3.3.2 Commande de la batterie :

L'hacheur réversible en courant est contrôlé à l'aide d'un correcteur basé sur la théorie de Lyapounov, dont le SGE génère le courant de référence $I_{bat_{ref}}$ comme illustre la figure (3.11). En fait, la régulation en courant de la batterie permet de verrouiller les deux interrupteurs du convertisseur bidirectionnel.

On définit l'erreur du courant de la batterie comme suit [23]:

$$e = i_{bat} - I_{bat_{ref}} \tag{3.17}$$

La dérivée de l'erreur est alors :

$$\dot{e} = \dot{i}_{bat} - \dot{I}_{bat_{ref}} \tag{3.18}$$

On choisit une fonction de Lyapunov quadratique [24]:

$$V = \frac{1}{2}e^2 \quad (3.19)$$

Une condition suffisante de stabilité est d'assurer la dérivée de V définie négative :

$$\dot{V} = -\dot{e}e \quad (3.20)$$

Choisissons une dérivée de V de forme exponentielle :

$$\dot{V} = -K_3 e^2 \quad (3.21)$$

D'où, on aura:

$$\dot{e} = -K_3 e \quad (3.22)$$

On choisit une constante positive K_3 pour assurer la négativité de V, et faire converger l'erreur vers zéro. Dans cette condition, on détermine la commande (la tension aux bornes de la bobine V_L) à partir de l'équation dynamique de la bobine de l'hacheur [24]:

$$V_L = L_{bat} \frac{di_{bat}}{dt} \quad (3.23)$$

En substituant l'expression de i_{bat} de l'équation (3.18) dans l'équation (3.23), on aura :

$$V_L = L_{bat}(\dot{e} + I_{bat_ref}) \quad (3.24)$$

En remplaçant l'équation (3.22) dans (3.24), on obtient :

$$V_L = L_{bat}(-K_3 \cdot e + I_{bat_ref}) \quad (3.25)$$

Par conséquent, la tension à l'entrée de l'interrupteur V_e se déduit par :

$$V_e = V_{bat} - V_L \quad (3.26)$$

Et le rapport cyclique α_{bat} se met sous :

$$\alpha_{bat} = 1 - \frac{V_e}{V_{dc}} \quad (3.27)$$

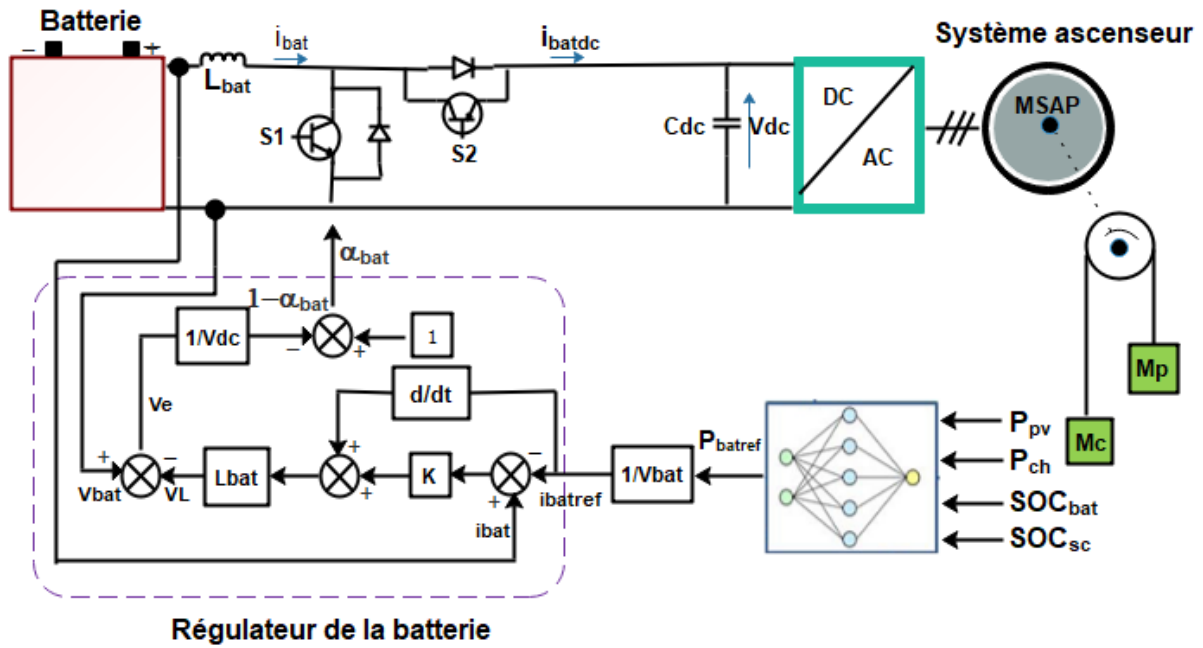


Figure.3.11.Schéma de commande de la batterie.

3.3.3. Commande des Supercondensateurs :

Le convertisseur statique associé aux supercondensateurs est contrôlé en courant de façon similaire que le convertisseur de la batterie (figure 3.12). L'utilisation des supercondensateurs (charge ou décharge) est contrôlée par la référence $I_{sc_{ref}}$ générée par le SGE. Il est à noter que les supercondensateurs et les batteries fonctionnent en complémentarité. Cette commande est effectuée de façon analogue que la commande des batteries.

Et le rapport cyclique α_{sc} se met sous :

$$\alpha_{sc} = 1 - \frac{V_e}{V_{dc}} \tag{3.28}$$

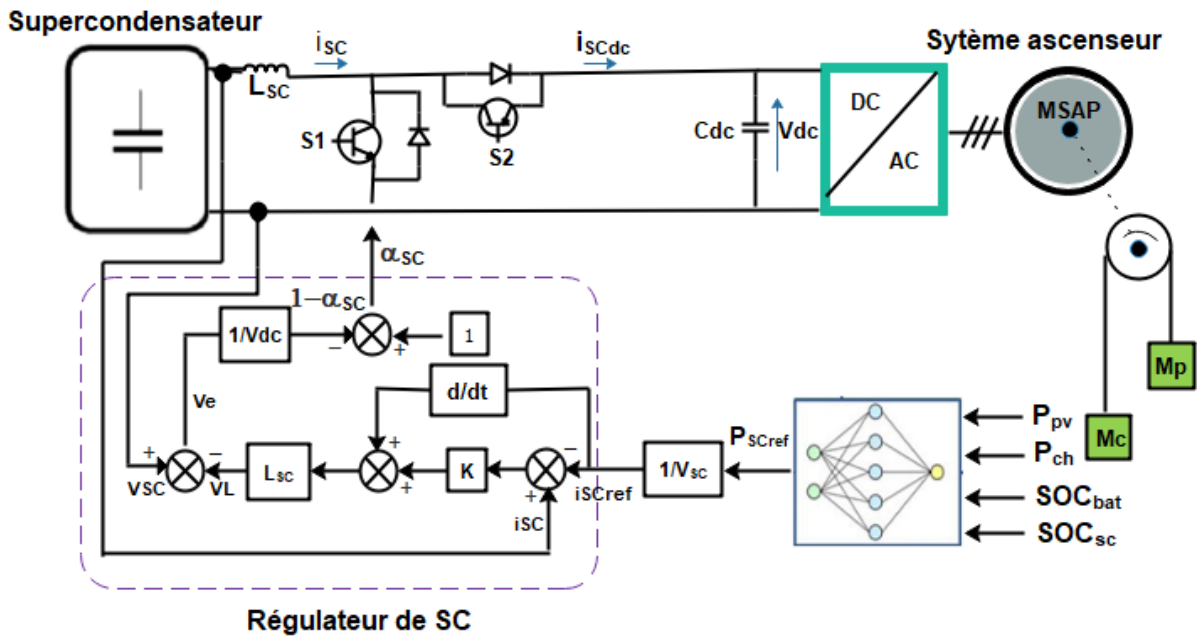


Figure.3.12.Schéma de commande de la supercapacité.

3.3.4 Commande prédictive de la partie de traction (Moteur MSAP) :

Pour la partie traction, une commande vectorielle en position du moteur MSAP comprenant un contrôle prédictif MPC des courants statoriques est suggérée. La commande prédictive MPC (Model Predictive Control en anglais) est une stratégie de commande, couramment utilisée comme commande rapprochée des convertisseurs statiques. Vue sa simplicité d'implémentation, elle est employée dans de nombreux applications industrielles afin de répondre aux problèmes de régulation des systèmes soumis aux contraintes la méthodologie concernant l'approche MPC peut s'illustrer sur le schéma représenté dans la figure (3.13)[25].

Cette stratégie de commande se base sur la connaissance à priori du procédé par l'intermédiaire d'un modèle, qui assure la prédiction de l'évolution des sorties en futur. Cette prédiction est ensuite comparée à la sortie désirée sur un horizon fini, appelé horizon de prédiction N_p . Le calculateur détermine alors la séquence de commandes optimales permettant de minimiser l'écart entre la sortie prédite et la référence. À l'instant d'échantillonnage suivant, l'horizon de prédiction glisse d'un pas et le problème d'optimisation est répété et ainsi de suite. C'est pourquoi cette stratégie de commande est appelée commande à horizon glissant ou commande à horizon fuyant [26].

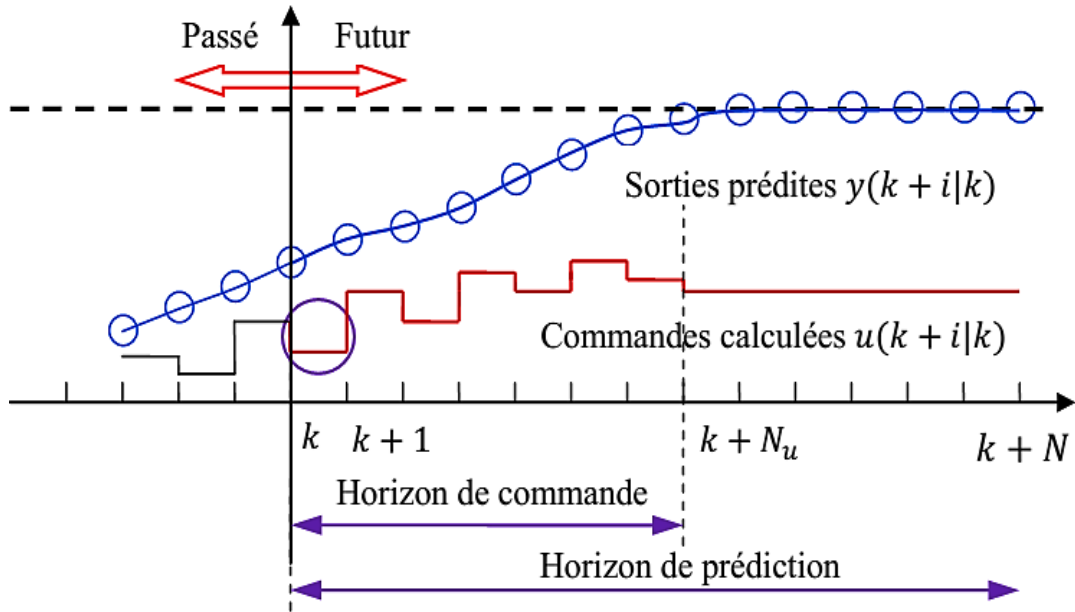


Figure.3.13. Schéma du principe de l'horizon fuyant.

3.3.4.1 Eléments de la commande prédictive :

Les éléments de base de la commande prédictive (Fig (3.14)) sont :

- Un modèle pour réaliser les prédictions.
- Une fonction objectif pour calculer la stratégie optimale de commande [27].

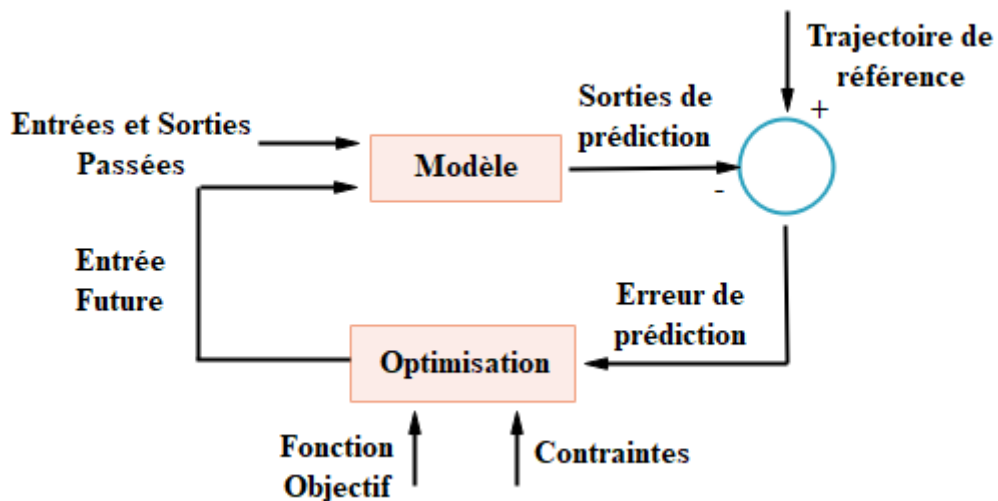


Figure.3.14. Le schéma fonctionnel de la structure de base des algorithmes MPC.

3.3.4.2 Modèle au temps discret :

En utilisant l'approximation d'Euler pour les dérivées du courant statorique i_{ds} et i_{qs} du MSAP pour un référentiel lié au champ tournant pour un temps d'échantillonnage T_s [28], soit :

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{i(k+1)-i(k)}{T_s} \quad (3.29)$$

A partir de l'eq (2.29) les expressions des courants de stator prédits dans le référentiel d-q sont :

$$i_{ds}^p(k+1) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_s}\right) i_{ds}(k) + T_s \cdot \omega_r \cdot i_{qs}(k) + \frac{T_s}{L_s} v_{ds} \quad (3.30)$$

$$i_{qs}^p(k+1) = \left(1 - \frac{R_s T_s}{L_s}\right) i_{qs}(k) - T_s \cdot \omega_r \cdot i_{ds}(k) - \varphi_m \omega_r T_s + \frac{T_s}{L_s} v_{qs} \quad (3.31)$$

3.3.4.3 Schéma de contrôle

Le schéma de contrôle pour la commande vectorielle de l'MSAP utilisant le contrôle prédictif des courants est montré dans la Figure 3.15. Ici, la boucle de position assurant l'asservissement de la hauteur de la cage à l'aide d'un correcteur proportionnel dérivé (PD). Le gain K_z transforme la position angulaire θ_r en position linéaire z_c . Le correcteur de vitesse en cascade détermine le courant de référence (i_{qs_ref}) nécessaire au contrôle de vitesse de la cage de l'ascenseur, alors que le courant i_{ds_ref} est maintenu égal à zéro ; pour assurer un découplage entre le contrôle du couple et du flux.

Un contrôleur prédictif de courant est utilisé pour asservir les courants i_{ds} et i_{qs} . Dans le schéma prédictif, le modèle à temps discret de la machine est utilisé pour prédire les composants de courant statorique ($i_{ds}^p(k+1)$, $i_{qs}^p(k+1)$), et ce pour les sept vecteurs de tension générés par l'onduleur [29].

Ensuite on teste chacune de ces prédictions suivant un critère quadratique (fonction objective) comme le montre l'eq (3.32), ce critère évalue la distance entre le point de courant prédit et le point de courant de référence dans le repère d-q et [28], [30].

$$g = (i_{ds}^p(k+1))^2 + \left(i_{qs_ref} - i_{qs}^p(k+1)\right)^2 \quad (3.32)$$

Le vecteur de tension qui minimise la fonction coût g est sélectionnée et appliqué pendant tout l'intervalle d'échantillonnage.

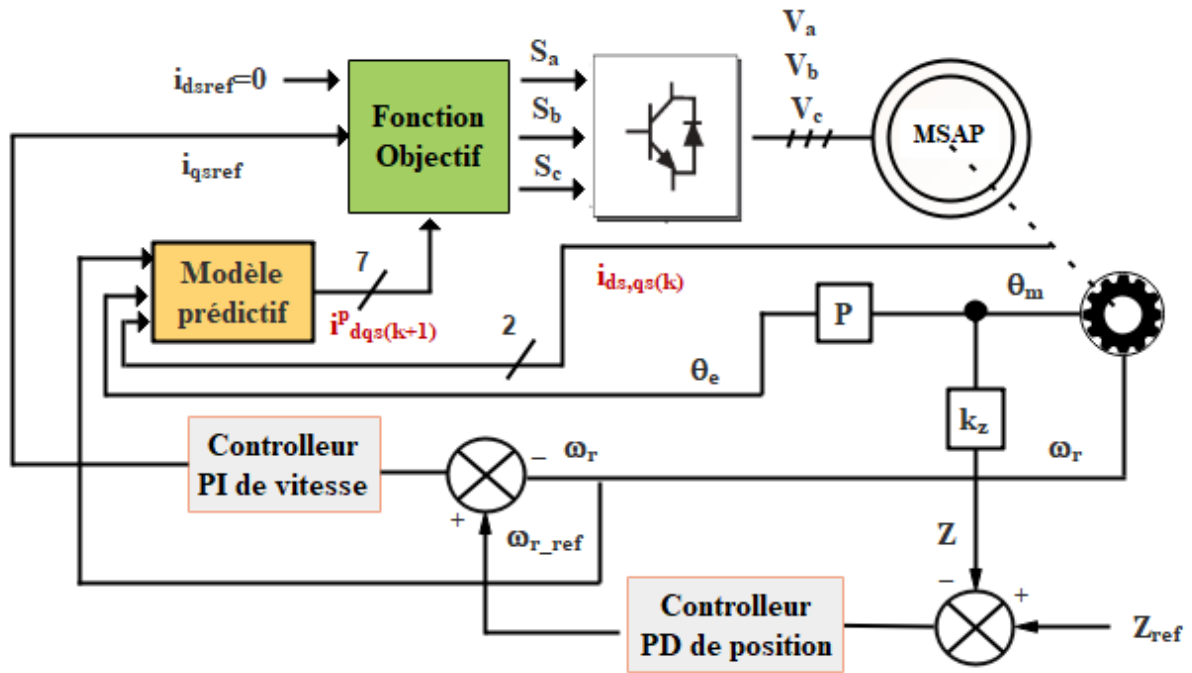


Figure.3.15. Commande vectorielle prédictive en Position du moteur MSAP.

3.3.4.4 Synthèse des différents régulateurs :

- **Correcteur de Position**

La position angulaire de la cage est donnée par :

$$\theta_m = \omega_r \cdot t \tag{3.33}$$

La transformation de la position angulaire θ_m en position linéaire z_c donne l'équation suivante [31]:

$$Z = \theta_m \cdot r \tag{3.34}$$

Donc :

$$Z = \omega_r \cdot r \cdot t \tag{3.35}$$

Avec:

$$\frac{Z}{\omega_r} = \frac{r}{p} \tag{3.36}$$

Le schéma fonctionnel du contrôle de position est donné par:

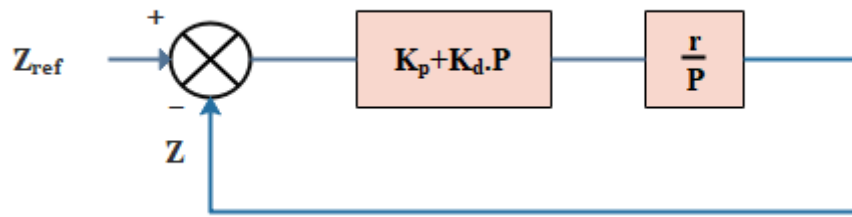


Figure.3.16.Régulateur de position.

Comme la fonction de transfert contient un intégrateur, seul un correcteur PD permettra l'accélération du système en dynamique.

La fonction de transfert en boucle ouverte est :

$$FTBO = (K_p + K_d \cdot p) \cdot \frac{r}{p} \quad (3.37)$$

La fonction de transfert en boucle fermée se détermine par :

$$FTBF = \frac{(K_p + K_d \cdot p) \cdot r}{p + (K_p + K_d \cdot p) \cdot r} \quad (3.38)$$

L'équation caractéristique se réduit alors à un système du premier ordre:

$$p + (K_p + K_d \cdot p) \cdot r = 0 \Rightarrow 1 + \frac{1 + K_d \cdot r}{K_p \cdot r} \cdot p = 1 + \tau p \quad (3.39)$$

On déduit l'équation suivante :

$$K_p = \frac{1 + K_d \cdot r}{\tau \cdot r} \quad (3.40)$$

On choisissant une constante de temps en boucle fermée $\tau = 0.01$ s, les paramètres du régulateur PD sont alors : $K_p = 491.0811$ et $K_d = 10.5$.

- **3.3.4.5 Correcteur de vitesse :**

Pour la régulation de vitesse, un correcteur de type PI est choisi. Le schéma simplifié incorporant l'équation de mouvement est donné par la figure suivante [32]:

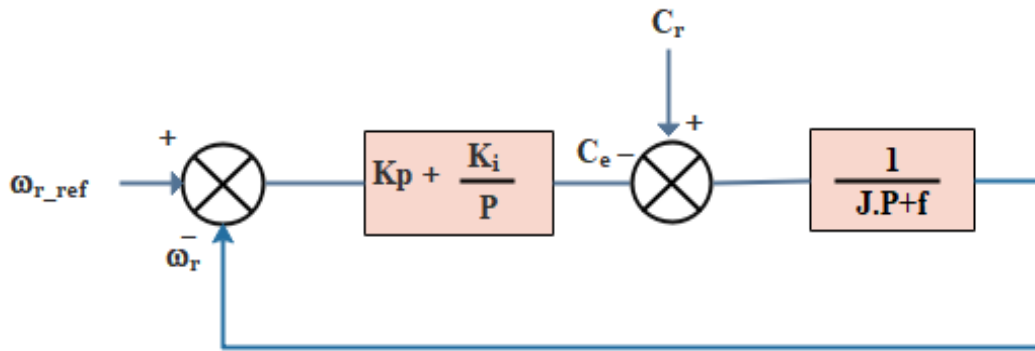


Figure.3.17.Régulation de la vitesse.

Pour la déduction des paramètres du contrôleur, la boucle de vitesse doit avoir une dynamique plus rapide que la boucle de position. La fonction de transfert de la vitesse en boucle ouverte est donnée par ($C_r=0$) :

$$FTBO_{\omega} = \frac{K_p}{s} \left(s + \frac{K_i}{K_p} \right) \cdot \frac{1}{J \cdot s + f} \tag{3.41}$$

La fonction de transfert en boucle fermé se met sous :

$$FTBF_{\omega} = \frac{K_p \left(s + \frac{K_i}{K_p} \right)}{J s^2 + (f + K_p) s + K_i} \tag{3.42}$$

La $FTBF_{\omega}$ possède une dynamique de 2^{ème} ordre. Par identification à la forme canonique du 2^{ème} ordre, l'équation caractéristique peut être représentée comme suit :

$$FTBF = \frac{1}{w_0} s^2 + \left(\frac{2\xi}{\omega_0} \right) s + 1 \tag{3.43}$$

Par identification de (3.42) et (3.43), alors :

$$\frac{J}{K_i} = \frac{1}{w_0^2} \tag{3.44}$$

$$\frac{f + K_p}{K_i} = \frac{2\xi}{w_0} \tag{3.45}$$

Avec :

ξ : Coefficient d'amortissement.

Pour un choix du coefficient d'amortissement ξ et w_0 , on déduit les valeurs de K_i et K_p , ainsi :

$$K_i = J\omega_0^2 \qquad K_p = \frac{2\xi K_i}{\omega_0} - f$$

En choisissant $\xi = 0.7$, on trouve $K_p=0.773$, $K_i=173.5$

3.3.5 Stratégie de contrôle de l'onduleur côté réseau :

L'onduleur coté réseau permet d'assurer l'alimentation du système ascenseur lorsque les batteries, les supercondensateurs ou les panneaux solaires ne sont pas en mesure de le faire. Si les états de charge des éléments de stockage sont maximums et que les modules PV produisent de l'électricité, le surplus sera absorbé par le réseau. On privilégie autant que possible la récupération d'énergie et l'utilisation des sources renouvelables. Le contrôle du convertisseur statique s'effectue en courant comme le décrit la figure (3.18)

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 de l'onduleur données par (2.73) devient [33].

$$e_{gd} = L_g \frac{di_{gd}}{dt} + R_g i_{gd} + L_g \cdot \omega_g \cdot i_{gq} + V_d \tag{3.46}$$

$$e_{gq} = L_g \frac{di_{gq}}{dt} + R_g i_{gq} - L_g \cdot \omega_g \cdot i_{gd} + V_q = 0 \tag{3.47}$$

On constate un couplage entre les axes d et q que nous chercherons à compenser. L'axe d est confondu avec le vecteur tension e_g , la composante e_{gq} est donc nulle (orientation de la tension sur l'axe d).

D'après les équations (3.46) et (3.47), on déduit les tensions qui devront être générées par l'onduleur. Elles permettent de découpler les termes associés aux axes d et q [34].

$$V_d = e_{gd} - L_g \cdot \omega_g \cdot i_{gq} + \Delta u_d \tag{3.48}$$

$$V_q = L_g \cdot \omega_g \cdot i_{gd} + \Delta u_d \tag{3.49}$$

Les sorties des correcteurs PI des axes d et q sont respectivement les signaux Δu_d et Δu_q , leurs expressions sont données par les équations (3.48) et (3.49). On cherche à annuler l'erreur entre les consignes et les valeurs des courants. Les gains K_p et K_i sont respectivement les gains proportionnel et intégral des correcteurs [31].

$$\Delta u_d = K_p (i_{gdref} - i_{resd}) + K_i \int (i_{gdref} - i_{resd}) dt \tag{3.50}$$

$$\Delta u_q = K_p (i_{gqref} - i_{gq}) + K_i \int (i_{gqref} - i_{gq}) dt \tag{3.51}$$

La figure (3.17) illustre la structure de contrôle de l'onduleur réseau établie d'après les équations précédentes.

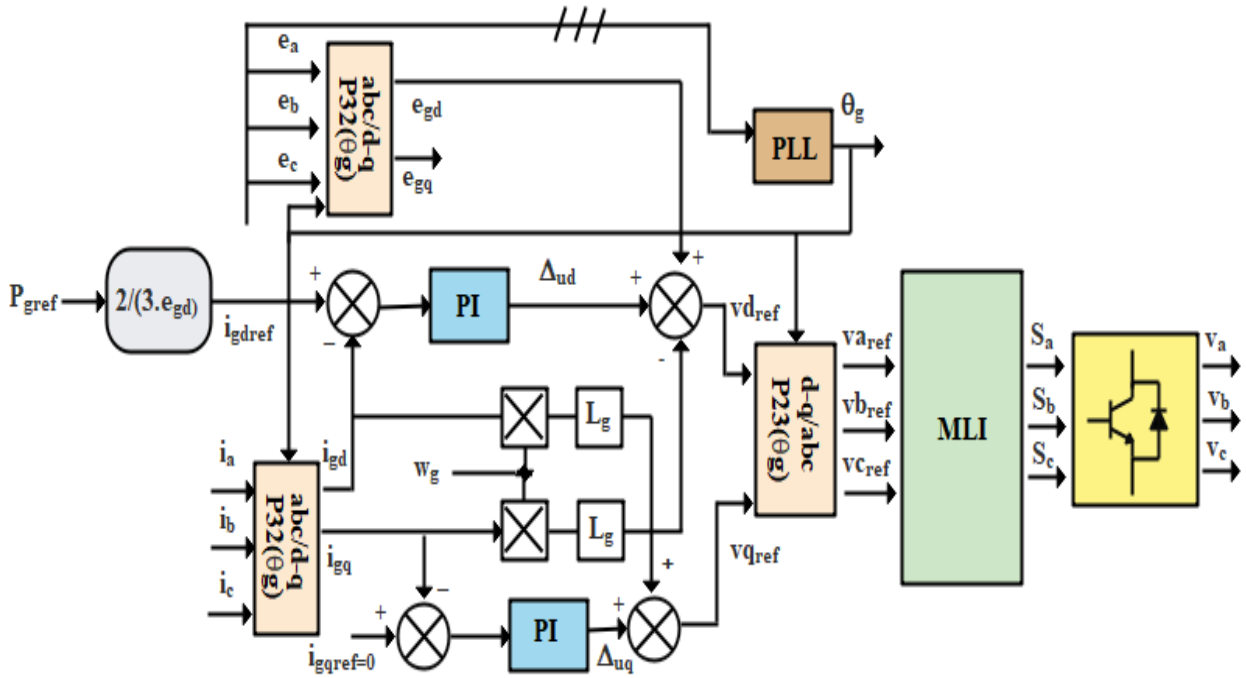


Figure.3.18. Contrôle en courant de l'onduleur réseau dans le référentiel d-q.

Les expressions des puissances active et réactive dans le repère d-q sont données respectivement par les équations (3.52) et (3.53) [31, 35].

$$P = \frac{3}{2}(V_d i_{gd} + V_q i_{gq}) \tag{3.52}$$

$$Q = \frac{3}{2}(V_q i_{gd} - V_d i_{gq}) \tag{3.53}$$

Dans ce même concept, la tension est orientée sur l'axe d (VOC). Donc, pour permettre un fonctionnement à facteur de puissance unitaire lors du fonctionnement en moteur, et un déphasage égal à π en récupération, le courant i_{gqref} doit être maintenu égal à zéro. Les expressions des puissances active et réactive de (3.52) et (3.53) devient :

$$P = \frac{3}{2} V_d i_d \tag{3.57}$$

$$Q = 0 \tag{3.58}$$

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté deux stratégies de gestion d'énergie proposées pour la configuration hybride présentée au chapitre 2 à savoir : la gestion par la séparation fréquentielle et la gestion par le réseau de neurone. En fait, ses algorithmes de contrôle permettent une fois implémentés de gérer les quantités de puissances fournies par chaque source, ainsi qu'un pilotage adéquat des différents convertisseurs statiques introduits. Pour valider les lois de commandes définies, des simulations seront effectués dans le chapitre suivant.

3.5. Références du chapitre 3

- [1] Saib, S., "Contribution à l'optimisation d'un système hybride (PV/éolien) avec stockage d'énergie connecté au réseau électrique".thèse doctorat ,université Setif1 ,2018.
- [2] Marmouh, S., M. Boutoubat, and L. Mokrani, "Performance and power quality improvement based on DC-bus voltage regulation of a stand-alone hybrid energy system". Electric Power Systems Research, 2018. 163: p. 73-84.
- [3] Abdelkrim, M., B. Achour, and B.M. Toufik, "Real time implementation of a fuzzy logic based MPPT controller for grid connected photovoltaic system". International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), 2015. 5(1): p. 236-244.
- [4] Ouchen, S., et al., "Fuzzy-predictive direct power control implementation of a grid connected photovoltaic system, associated with an active power filter".Energy Conversion and Management, 2016. 122: p. 515-525.
- [5] Mahjoubi, C.m., "Modélisation multi-physique et gestion d'énergie d'un micro-réseau résidentiel autonome". Thèse doctorat, université Nantes. 2019
- [6] Slouma, S., et al., "Frequency Separation Model Based on Infinite-Impulse Response Filter Applied To Hybrid Power Generation Intended For Residential Sector". International Journal of Renewable Energy Research (IJRER), 2019. 9(1): p. 118-127.
- [7] Paire, D., et al. "A real-time sharing reference voltage for hybrid generation power system". in 2010 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. 2010. IEEE.
- [8] Macedo, M.N., et al., "Demand side management using artificial neural networks in a smart grid environment". Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. 41: p. 128-133.

- [9] Cherif, H., et al., "Early detection and localization of stator inter-turn faults based on discrete wavelet energy ratio and neural networks in induction motor". *Energy*, 2020: p. 118684.
- [10] Boussaada, Z., et al., "A nonlinear autoregressive exogenous (NARX) neural network model for the prediction of the daily direct solar radiation". *Energies*, 2018. **11**(3): p. 620.
- [11] Derras, B., et al., "Adapting the neural network approach to PGA prediction: An example based on the KiK-net data". *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2012. **102**(4): p. 1446-1461.
- [12] Derras, B., "Contribution des données accélérométriques de KiKNet à la prédiction du mouvement sismique par l'approche neuronale avec la prise en compte des effets de site". thèse doctorat ,université tlemcen,2011.
- [13] Baghli, L., "Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques". these doctorat ,université Henri Poincaré,Nancy-I,1999.
- [14] Tabanjat, A., et al., "Energy management hypothesis for hybrid power system of H2/WT/PV/GMT via AI techniques". *International Journal of Hydrogen Energy*, 2018. **43**(6): p. 3527-3541.
- [15] Bendjamaa, I., et al., "Mathematical Modelling of Engineering Problems". *Journal homepage: <http://iieta.org/journals/mmep>*, 2019. **6**(3): p. 385-389.
- [16] Borni, A., et al., "P&O-PI and fuzzy-PI MPPT Controllers and their time domain optimization using PSO and GA for grid-connected photovoltaic system: a comparative study". *International Journal of Power Electronics*, 2017. **8**(4): p. 300-322.
- [17] Madaci, B., et al., "Design and control of a stand-alone hybrid power system. *International journal of hydrogen energy*", 2016. **41**(29): p. 12485-12496.
- [18] Madaci, B., R. Chenni, and K.E. Hemsas, Architectures intégrées de gestion de l'énergie pour les multisystèmes autonomes utilisant le stockage par accumulateurs. thèse doctorat , Université Frère Mentouri - Constantine 1, 2018,.
- [19] Subudhi, B. and R. Pradhan, "A comparative study on maximum power point tracking techniques for photovoltaic power systems". *IEEE transactions on Sustainable Energy*, 2012. **4**(1): p. 89-98.

- [20] El Gouri, R., M. Brahim, and L. Hlou, "A Comparative Study Of Mppt Technical Based On Fuzzy Logic And Perturb Observe Algorithms For Photovoltaic Systems". *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 2013. **58**(2).
- [21] Salhi, M., A. El-Jouni, and R. El-Bachtiri, "Maximum power point tracker using fuzzy control for photovoltaic system". *International Journal of Emerging Research in Management and Technology (IJERMT)*, Volume 2, Issue 1, January 2013, PP. 105-113, ISSN: 2278-9359, 2013.
- [22] Alajmi, B.N., et al., "A maximum power point tracking technique for partially shaded photovoltaic systems in microgrids". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011. 60(4): p. 1596-1606.
- [23] Tiar, M., et al., "Optimal energy control of a PV-fuel cell hybrid system". *International Journal of Hydrogen Energy*, 2017. 42(2): p. 1456-1465.
- [24] Tiar, M., "Gestion Optimale D'énergie d'une Chaîne de Production Electrique Renouvelable". thèse doctorat, Université Mohamed Khider-Biskra, 2017.
- [25] Errouissi, R. and M. Ouhrouche, "Nonlinear predictive controller for a permanent magnet synchronous motor drive". *Mathematics and Computers in Simulation*, 2010. 81(2): p. 394-406.
- [26] Errouissi, R., et al., "Robust nonlinear predictive controller for permanent-magnet synchronous motors with an optimized cost function". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2011. 59(7): p. 2849-2858.
- [27] Granado, E., "Commande prédictive à base de programmation semi définie". 2004.
- [28] Rodriguez, J. and P. Cortes, "Predictive control of power converters and electrical drives". Vol. 40. 2012: John Wiley & Sons.
- [29] Siami, M., et al., "Robustness improvement of predictive current control using prediction error correction for permanent-magnet synchronous machines". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016. 63(6): p. 3458-3466.
- [30] Sepulchre, L., "Pour l'optimisation de la commande des machines synchrones à aimants permanents en régime de haute vitesse pour véhicule électrique". thèse doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2017.
- [31] Paire, D., "Dimensionnement et gestion d'énergie de systèmes d'entraînements électriques hybrides: application à un ascenseur avec récupération d'énergie" thèse doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard. 2010.

- [32] Xie, W., et al., "Finite-control-set model predictive torque control with a deadbeat solution for PMSM drives". IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015. **62**(9): p. 5402-5410.
- [33] Kermadi, M., Z. Salam, and E.M. Berkouk. "A Rule-based Power Management Controller using Stateflow for Grid-Connected PV-Battery Energy System supplying Household load". IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). 2018. IEEE.
- [34] Laabidi, H., H. Jouini, and A. Mami, "Sliding mode control for PV-wind hybrid system connected to grid". Environmental Engineering.
- [35] Borni, A., ‘‘Etude et optimisation d’un multi système hybride de conversion d’énergie électrique’’.Thèse de doctorat, Université Frère Mentouri - Constantine 1, 2015.

Chapitre 04: Résultats de simulation

4.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous avons concentré notre étude sur le regroupement des sous-systèmes (GPV, batteries et SC) afin d'alimenter le système ascenseur et de le connecter au réseau électrique, à travers un onduleur qui permet de contrôler les courants et les tensions transmis. Cette étude est menée afin de mettre en évidence la faisabilité des deux méthodes de gestion d'énergie qui sont le superviseur basées sur la séparation fréquentielle et le gestionnaire basé sur le réseau de neurone.

Nous utilisons les simulateurs développés pour vérifier d'une part, que la maximisation de la puissance au niveau de GPV est assurée efficacement et d'autre part, que la gestion l'énergie est assurée par les deux techniques de gestion. En effet, de nombreux scénarios peuvent être proposés en fonction des sources d'énergie disponibles, la consommation d'énergie et l'état de charge de la batterie afin d'assurer le bon déroulement de l'algorithme et de déterminer à chaque instant le fonctionnement des différents éléments qui constituent le système d'énergie hybride. De ce fait, pour chaque mode de fonctionnement, l'algorithme va décider la nature des sources impliquées, ainsi de la quantité de puissance fournie.

4.2. Résultats et discussion :

Notre système multi-sources est constitué d'un GPV d'une puissance de 1 kW, des batteries de 200Ah avec une tension de 48v et d'un banc de supercondensateurs, qui possède une capacité totale de 14.5 F sous une tension nominale de 60v. Le SEH est conçu afin d'alimenter un ascenseur de 3m de hauteur et 1m de côté. Afin d'évaluer les performances des stratégies de gestion d'énergie du système multi-sources, le système d'énergie hybride (SEH) est implémenté sous l'environnement Matlab/Simulink, en considérant quelques scénarios mentionnés à la section 3.3.2. Suite à la simulation des stratégies de gestion étudiées, nous présentons et commentons les différents résultats obtenus.

4.2.1 Choix des entrées

4.2.1.1 Les conditions climatiques

Le choix des entrées exogènes du système est critique pour mettre en valeur les performances de commandes développées au cours de cette thèse. Dans ce cas, nous avons considéré que l'évolution de l'irradiation du GPV varie de la manière suivante fig. (4.1) :

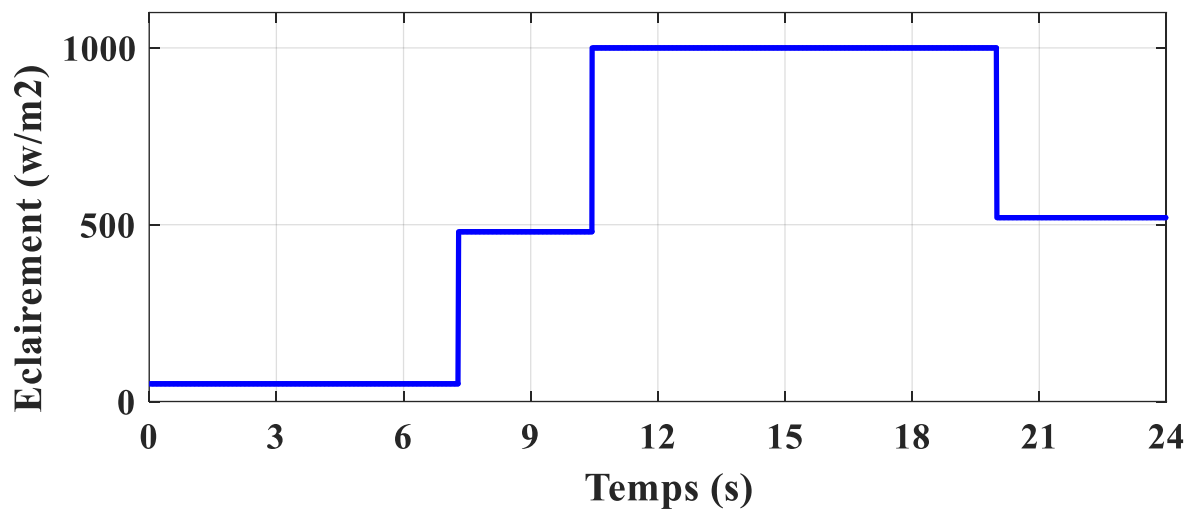


Figure.4.1. Evolution de l'irradiation de GPV.

4.2.1.2 Les variations de la charge :

Pour Les variations de la charge, la position de l'ascenseur et la masse de la cage sont choisies variables en créneaux pour bien distinguer les performances des différents algorithmes.

Le déplacement de la cage est choisie variable en créneaux à une amplitude d'environ de 1 à 3 m pendant toute la période de simulation (24s) comme il est illustré à la figure.4.2.

La masse de la cage varie en deux états. Lorsque l'ascenseur est vide, la masse de la charge est égale à la masse de la cage qui est de (80 kg) et elle change entre 150kg et 300kg en cas de montée ou de descente de l'ascenseur, comme il est montré sur la figure.4.3.

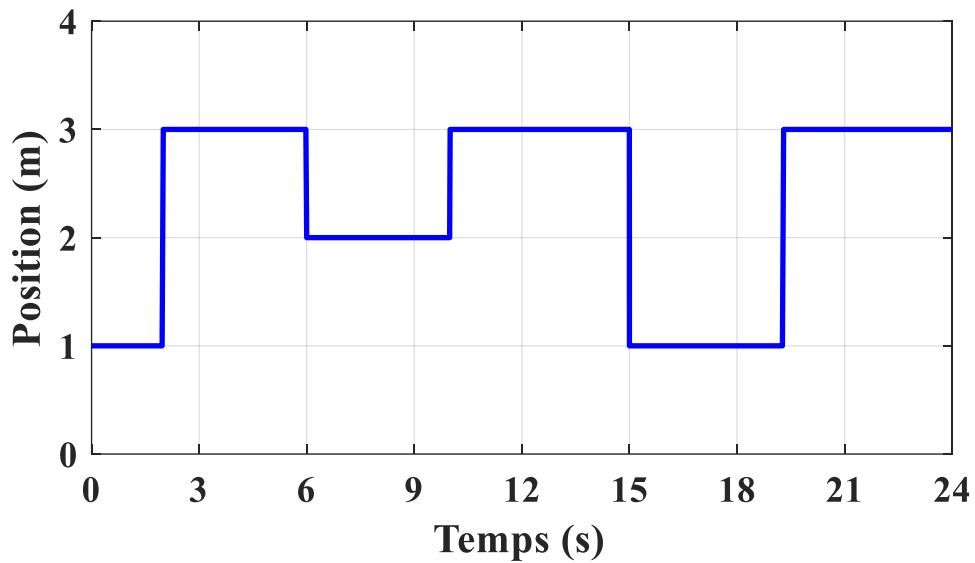


Figure.4.2.La position de l'ascenseur.

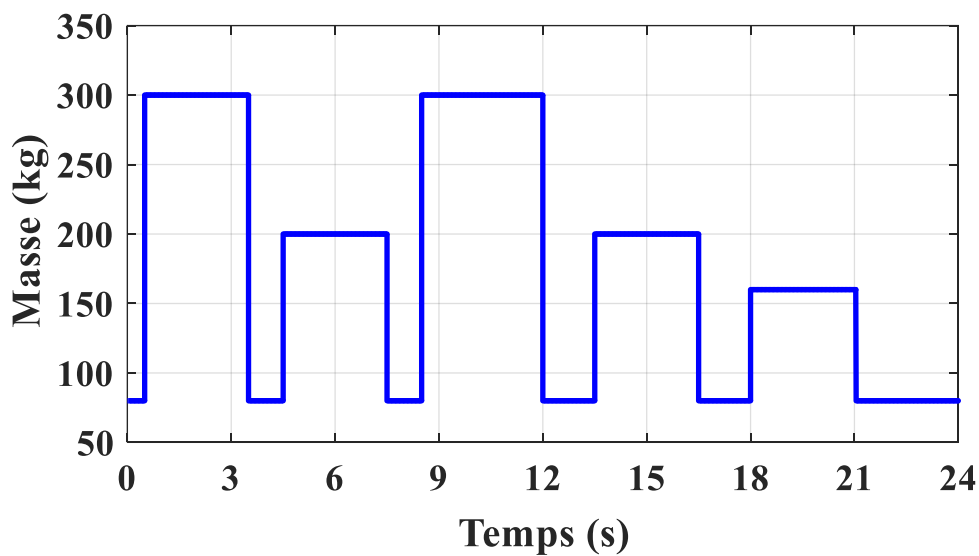


Figure.4.3 : La masse de l'ascenseur

A cet effet, pour permettre de visualiser de près les performances dynamiques et statiques, la consommation de l'ascenseur est de (100W) quand l'ascenseur est vide ; entre (2400W) et (4300W) en accent de l'ascenseur et entre (-1500W) et (-3000W) pendant 14.5s et 15.5s en décente de l'ascenseur, (fig 4.4). On peut clairement remarquer que l'appel de la charge passe par des pics positifs en cas de montée à vitesse variable, des pics négatifs, en descente, et des passages à puissance constante et à valeur faible, lors de l'arrêt de la cage. L'amplitude de cette puissance varie en proportion avec la hauteur et la masse de la cage.

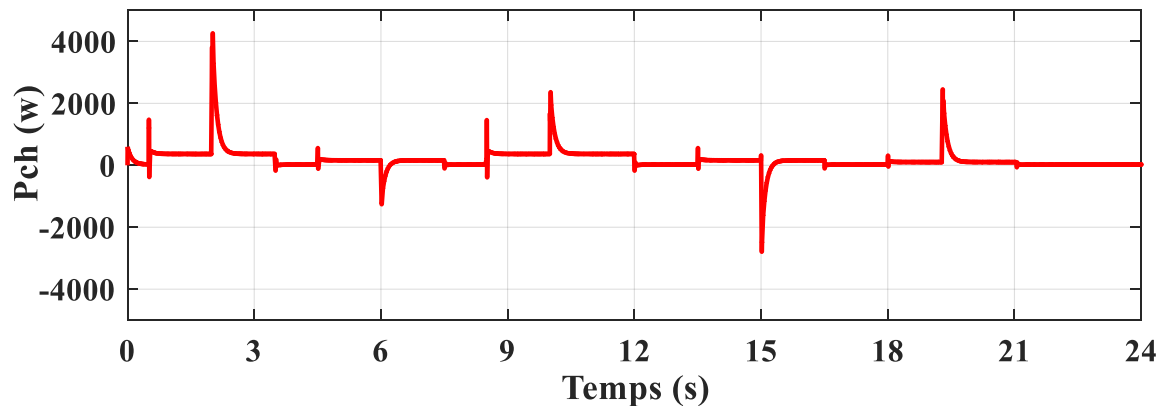


Figure.4.4.Puissance de la charge.

4.2.2 Caractéristique de GPV :

Les techniques de contrôle ont été compilées par l'intermédiaire du package Matlab/Simulink, et testées sur les entrées pré-décrites. Sur la figure.4.5 est illustrée respectivement les allures de la puissance, le courant et la tension extraite du générateur photovoltaïque au point de puissance maximale pour divers changements de l'éclairement.

De ces graphes, le contrôleur MPPT par logique floue extrait la puissance optimale pendant toute l'intervalle de temps, étant donné que la condition de la conductance incrémentale qui est exprimée mathématiquement par: dP_{pv} / dI_{pv} , illustrée sur la figure.4.6, reste proche de zéro, malgré la demande de la charge est variable; ce qui prouve par conséquent l'efficacité de l'algorithme MPPT basé sur la logique floue.

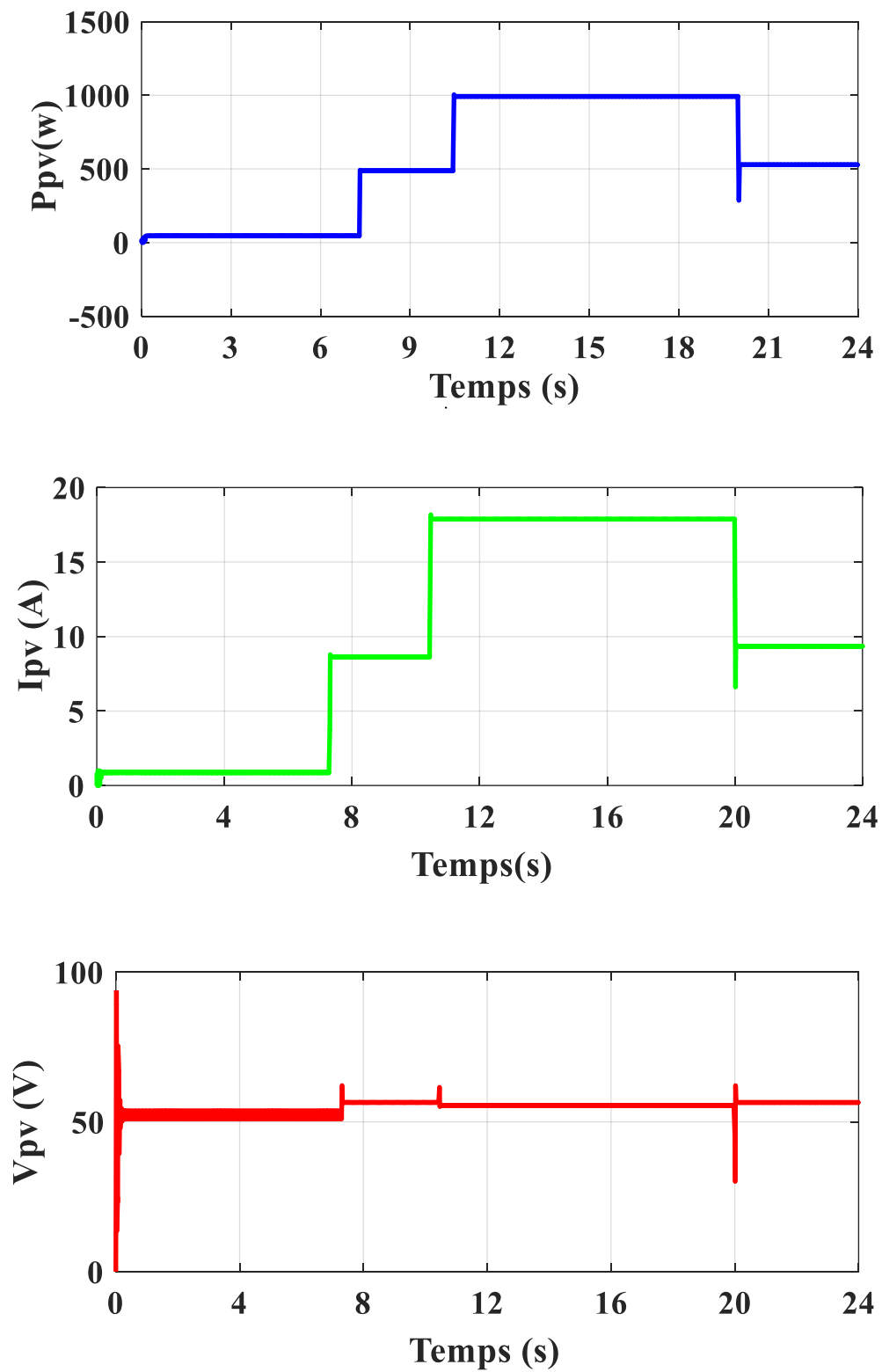


Figure.4.5. Evolution de la puissance, courant et tension du système PV

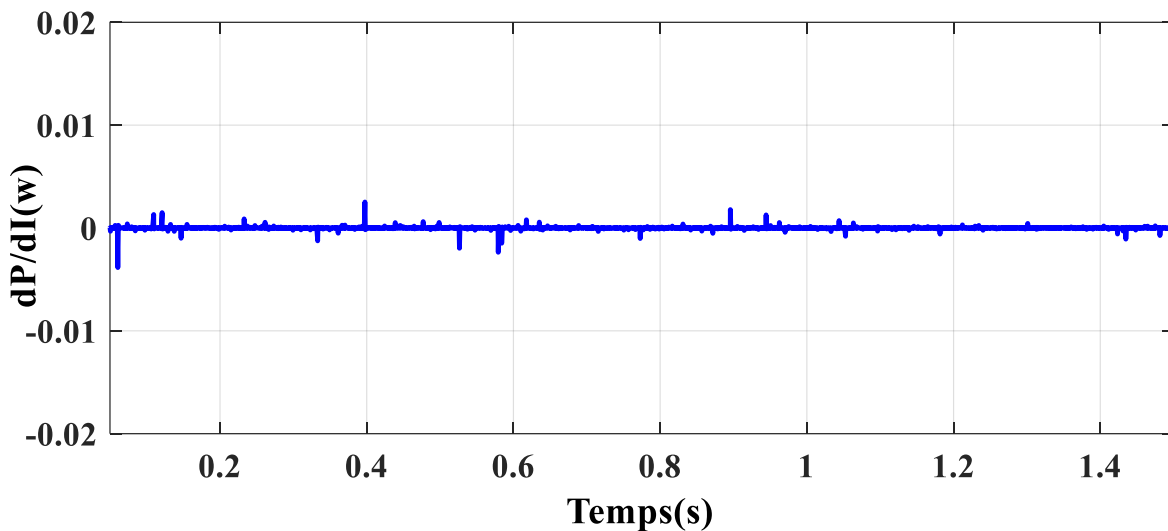


Figure.4.6.Précision du contrôleur MPPT flou ($dP/dI(w)$, W/A).

4.2.3 Résulta de simulation du gestionnaire d'énergie basé sur le RNA :

Pour bien gérer le système sous une demande de la charge variable via le changement de la masse et la hauteur de l'ascenseur, la gestion basée sur le RNA est proposé. Ce superviseur est entraîné hors ligne via la technique de séparation de fréquence. A cet effet le gestionnaire par RNA permet de gérer plusieurs entrées pour fournir en conséquence les quantités de puissances de référence des éléments de stockage (batterie et SC) et du réseau électrique à chaque état de l'ascenseur.

Il existe plusieurs types de RNA dans la littérature. Le type de réseau neuronal MLP est la structure la plus utile dans le domaine de la classification. L'algorithme d'entraînement du réseau multicouche à action directe est l'algorithme de rétro-propagation de Levenberg-Marquardt (trainlm). Cet algorithme est un algorithme de descente de gradient avec un taux de gain adaptatif pour améliorer les performances du RNA en réduisant l'erreur entre la sortie désirée et la sortie réelle du réseau, lors du changement des poids le long de son gradient. C'est ce qu'on appelle l'erreur quadratique moyenne (MSE). Cette méthodologie du RNA permet de créer des réseaux de neurones par un processus d'apprentissage selon les étapes suivantes:

Étape 1: Obtenir les données d'entrées et les sorties désirées à partir de la méthode de séparation de fréquence.

Étape 2 : Créez le réseau RNA (MLP) et entraînez le réseau jusqu'à ce que les conditions des paramètres de configuration du réseau soient atteintes.

Étape 3 : Testez le réseau et contrôlez l'analyse de régression.

Étape 4 : Stockez le réseau formé. Ensuite, ce réseau bien formé est prêt à être testé en utilisant de nouvelles données d'entrée pour ce processus en ligne.

Étape 6 : Traitez les nouvelles données d'entrée dans le processus en ligne et obtenir les données des puissances de référence du système ascenseur.

La structure du gestionnaire par RNA se compose d'une couche d'entrée avec quatre neurones qui sont la puissance (P_{pv}) fournie par le GPV, la puissance de la charge et les états de charge des batteries et des SCs; d'une couche cachée, qui contient 20 neurones avec une fonction de transfert d'activation sigmoïde comme le montre la figure 4.7, et enfin, une couche de sortie qui contient trois neurones avec une fonction de transfert linéaire. Les variables de sortie seront les puissances de références des batteries (P_{bat_ref}), des SCs (P_{sc_ref}) et du réseau (P_{res_ref}).

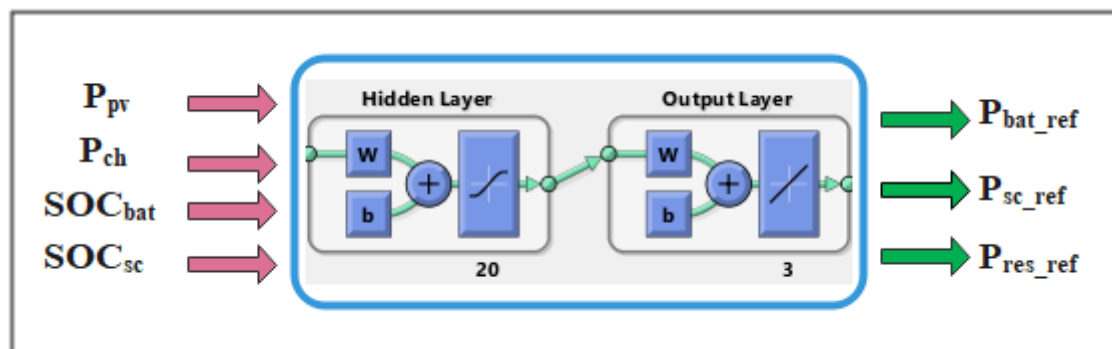


Figure.4.7. GUI du RN développé pour le gestionnaire d'énergie.

4.2.3.1 Les Résultats de l'apprentissage du gestionnaire par RNA :

Comme première étape dans la construction du RNA, le programme hors ligne est résolu pour différents ensembles de données des conditions climatiques et des états de l'ascenseur afin d'obtenir les entrées et les cibles nécessaires pour former le gestionnaire par RNA.

La figure 4.8 représente les données d'entrée d'apprentissage du RNA qui sont composées des vecteurs d'entrée: [P_{pv} ; P_{ch} ; SOC_{bat} ; SOC_{sc}] injectées au RNA.

Compte tenu de ces données d'entrée du RNA, la puissance de référence des batteries, des SCs et du réseau électrique sont utilisées comme vecteur de sorties désiré. L'ensemble d'apprentissage est utilisé pour former ou construire le modèle de régression linéaire, c'est-à-dire

pour calculer les coefficients de régression et de déterminer les poids synaptiques de réseaux de neurone.

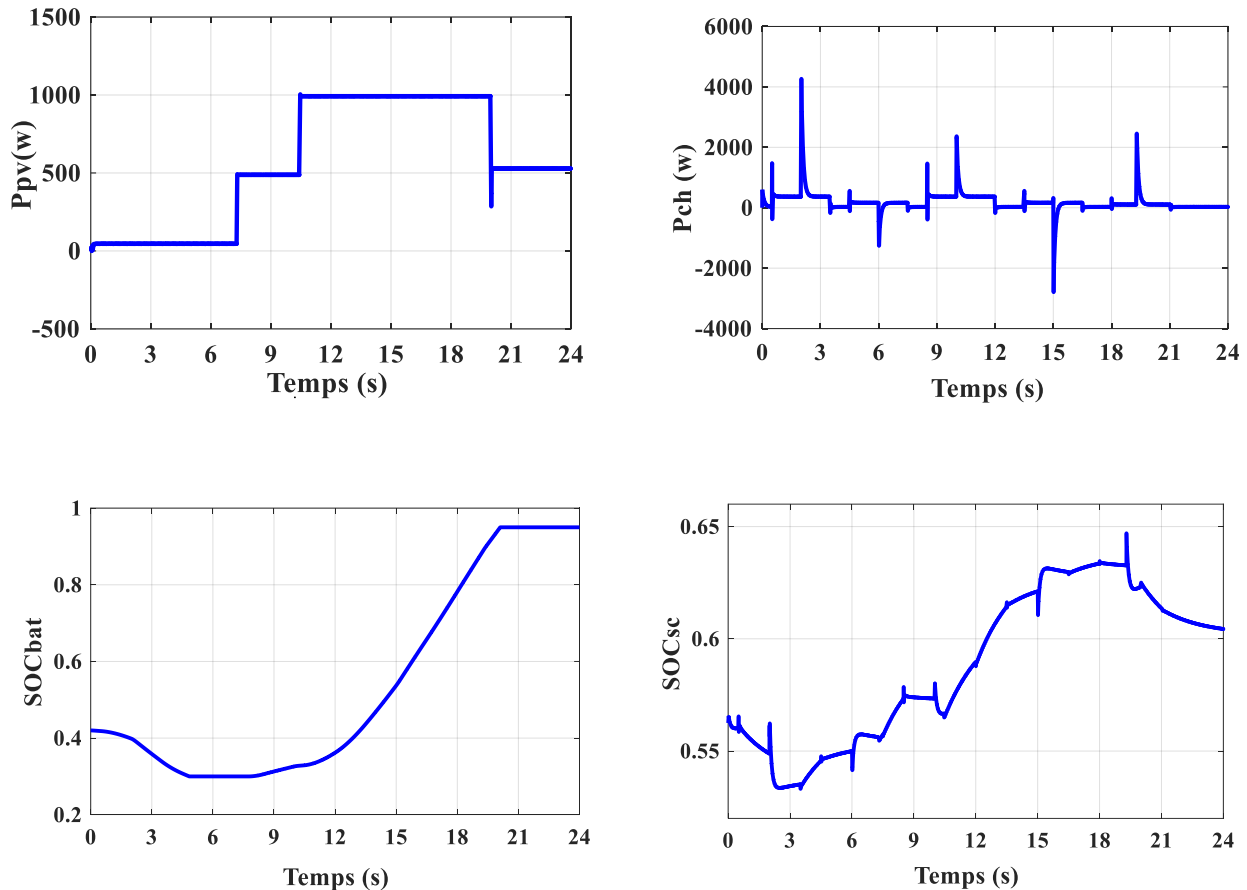


Figure.4.8. Les entrées de l'apprentissage.

La figure 4.9 montre les sorties de l'apprentissage du RNA de type MLP (puissance de référence de la batterie, de SC et du réseau électrique) dans diverses irradiation et lors des variations de l'état de l'ascenseur. De cette figure on peut constater que le RNA est parfaitement appris le jeu de données d'entrée, où il est donné correctement les sorties désirées avec une faible erreur (0.001).

4.2.3.2 Les Résultats de test du gestionnaire de RNA :

Le RNA (MLP) bien formé peut être utilisé en ligne pour tester les nouvelles données d'entrée après chaque changement de l'éclairage et des états de l'ascenseur (position et masse de la cage) afin d'obtenir la répartition de la puissance entre les éléments de stockage (batterie, SC) et le réseau électrique qui sont illustrés sur la figure 4.10. Les puissances de référence générées par le RNA sont analysées et comparées à celles générées par le gestionnaire basé sur la

séparation fréquentielle (SF) en mode en ligne. On peut observer que les performances de répartition de puissance générées par le RNA suivent étroitement les résultats hors ligne.

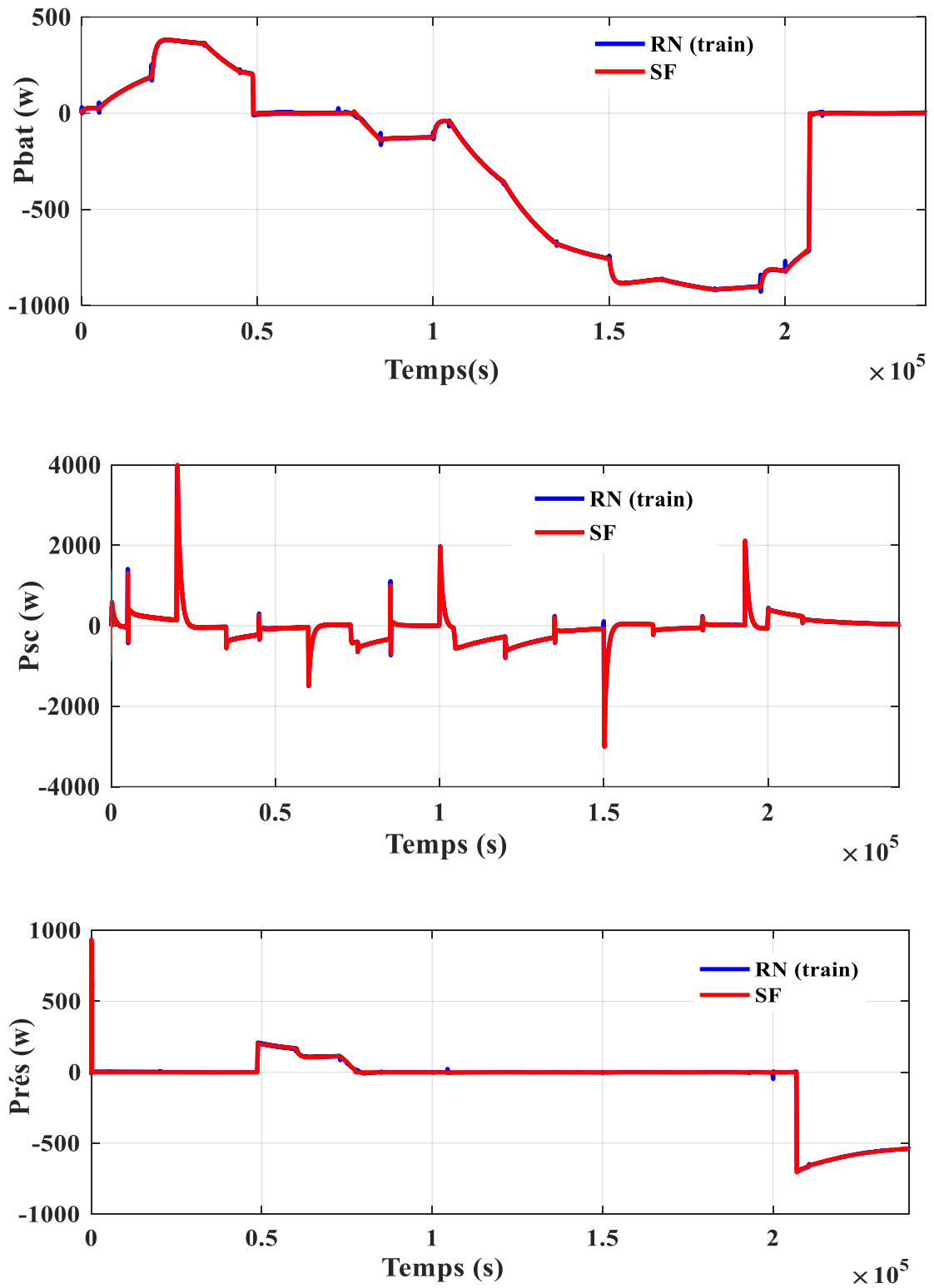


Figure.4.9. Les Sorties de l'apprentissage.

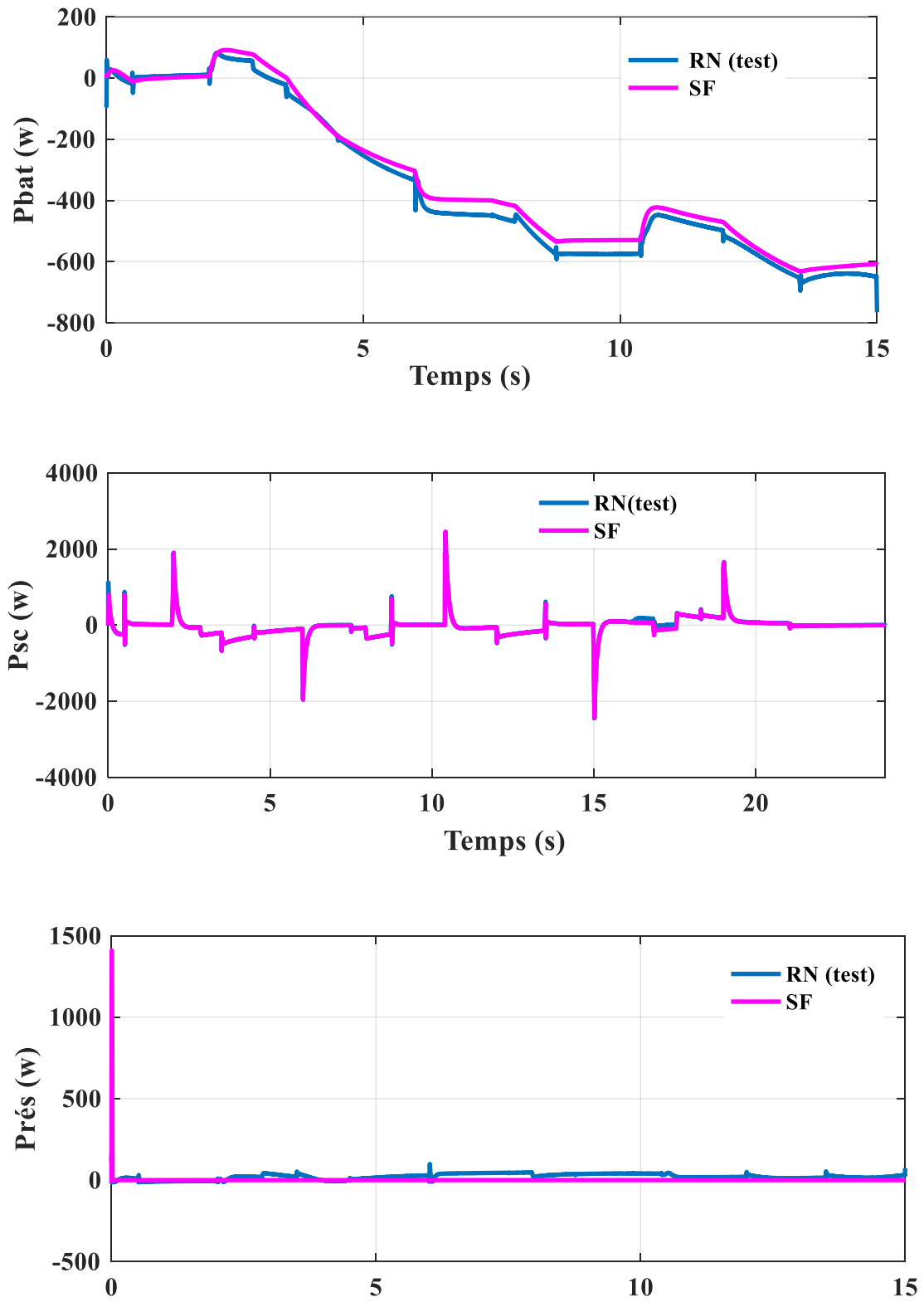


Figure.4.10. Les Sorties de test de RN.

4.2.4. Différents modes de fonctionnement du système hybride.

4.2.4.1 Conditions initiales

- Sur la figure.4.11 est illustrée les allures de la puissance extraite du GPV, la demande de la charge, ainsi que la puissance nette P_{net} ($P_{pv}-P_{ch}$), comme il peut être remarqué, cette dernière embrasse en fait la forme du profil de charge. De ces graphes on remarque bien que la puissance demandée (P_{ch}) et la puissance délivrée par le GPV sont supposés variables pour tester le fonctionnement des contrôleurs proposés dans diverses conditions climatiques et lors des variations de l'état de l'ascenseur.
- Nous supposons que l'état de charge initiale de la batterie est de 43% (presque vide) pour pouvoir vérifier tous les modes de fonctionnement.

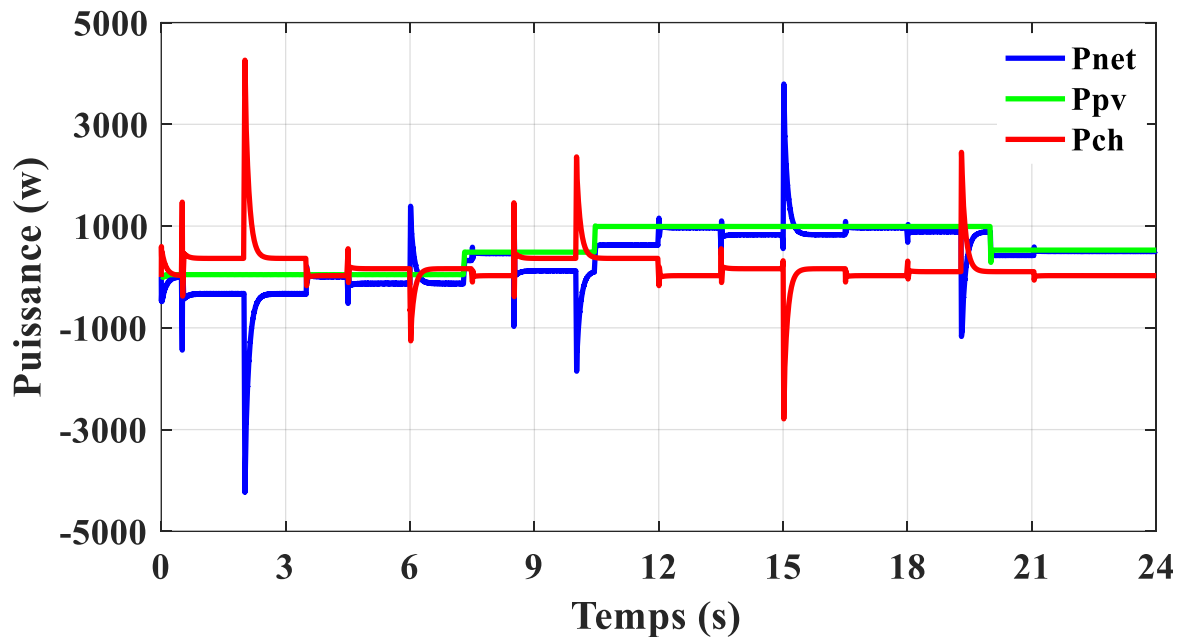


Figure.4.11.Evolution de la puissance P_{net} , P_{ch} et la puissance de GPV.

En effet, selon la puissance délivrée par le GPV, opérant en permanence en mode MPPT, la consommation et les états de charge de la batterie et du SC, nous distinguons plusieurs scénarios de fonctionnement du système hybride et on présentera en fait dans ce qui suit un ensemble de graphes démontrant les performances du système.

4.2.4.2 Mode 1 : Mode de décharge de la batterie :

Dans tous les intervalles de ce mode, la batterie se décharge afin de couvrir la demande de la charge.

Durant le premier palier de la demande de la charge (de 0s jusqu'à 3.5s), la puissance P_{net} est remarquable négative, comme il est indiqué sur la figure 4.11, cela indique que l'énergie produite par le générateur photovoltaïque n'est pas suffisante pour faire alimenter la charge. Dans ce cas, la batterie intervient pour fournir l'énergie nécessaire afin de couvrir la demande de la charge jusqu'à sa limite inférieure SOC_min comme il est illustré sur la figure 4.12. Elle doit donc être dimensionnée de manière à couvrir les besoins en énergie et avoir une autonomie de plusieurs heures voir des jours.

- Dans l'intervalle [1.8 3s]

Le GPV et la batterie ne répondent pas à la demande de la charge, En effet, le SC commence à produire l'énergie manquante demandée par la charge qui fournit immédiatement le courant transitoire nécessaire en montée de l'ascenseur comme le montre la figure 4.13 (a).

- Pour $t \in [3,5 \text{ } 4,9\text{s}]$: la puissance fournie par le GPV et les batteries assure totalement la demande de la charge et l'excès existant sera envoyé pour recharger les SC. (fig 4.13 (b)).

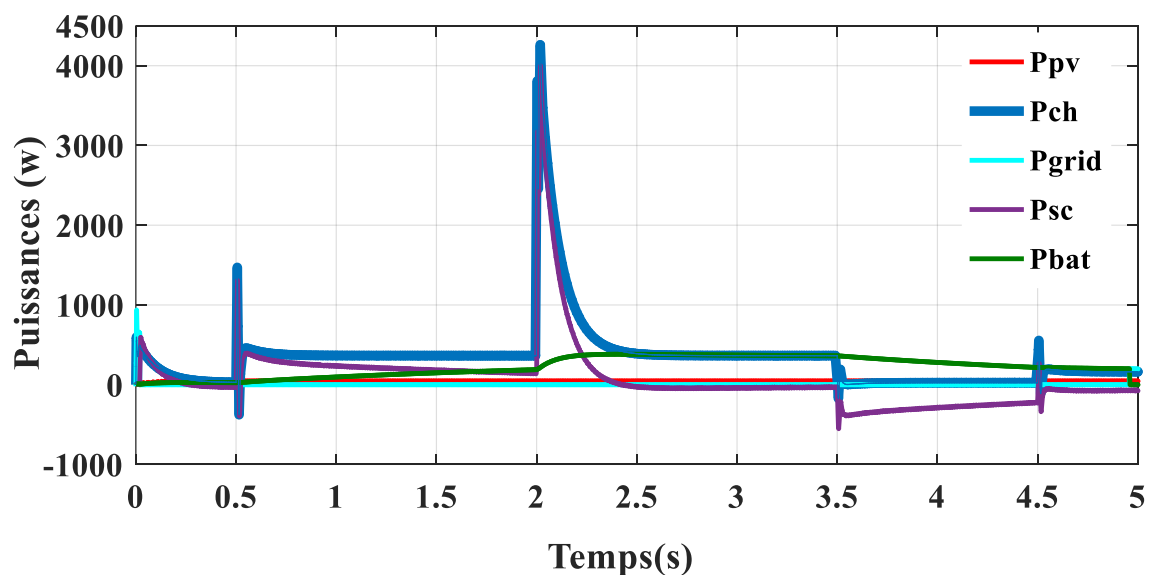
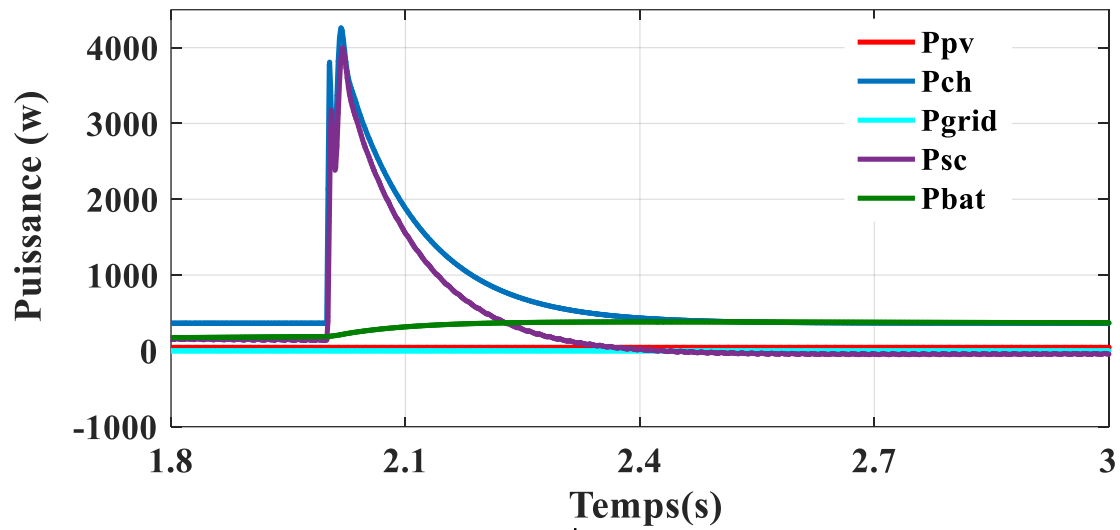
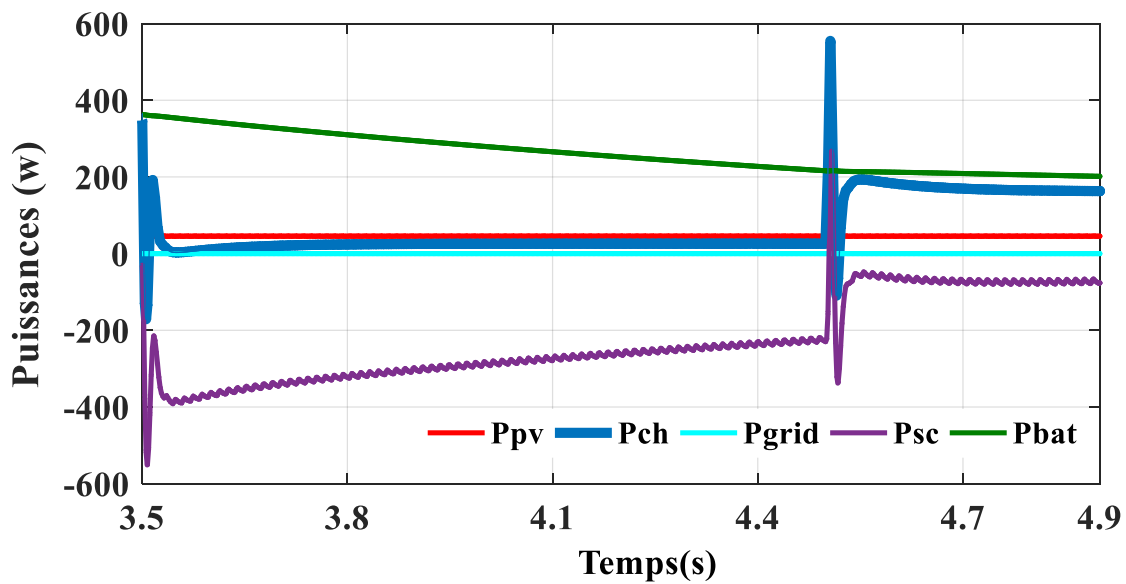


Figure.4.12. Puissance du système hybride en mode 1.



(a)



(b)

Figure.4.13. Zoom des puissances du système hybride en mode 1.

4.2.4.3 Mode2: Mode de demande de réseau.

Pendant les intervalles de temps [(5 - 6s) et (6.3 - 7s)], l'état de charge de la batterie (SOC_{bat}) atteint son minimum (30%) (Fig. 4.14), tandis que la puissance demandée par la charge est supérieure à la puissance maximale délivrée par le GPV, et dans ce cas, le réseau est appelé à fournir la puissance supplémentaire désirée, cela signifie que P_{net} est négative, (fig.4.11).

De (6s à 6.3s) : La puissance P_{net} est remarquable positive (fig.4.11) et la puissance de la charge varie brusquement de 100w à -1600w lors de descente de l'ascenseur. Dans ce cas les SCs récupèrent l'énergie du moteur comme le montre les figures (4.11) et (4.14).

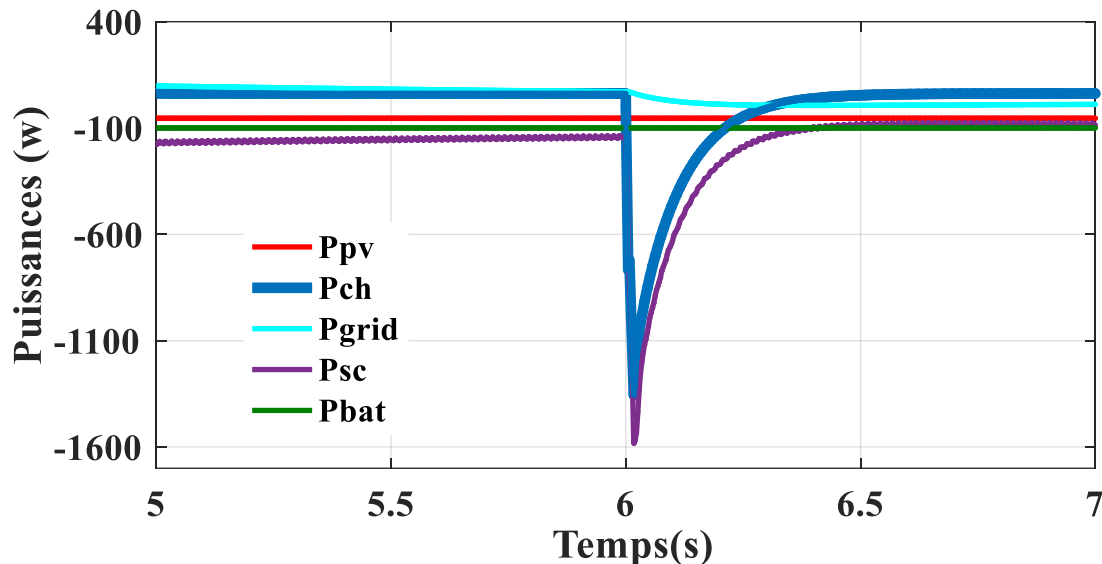


Figure.4.14. Puissance du système hybride en mode 2.

4.2.4.4 Mode de charge de la batterie.

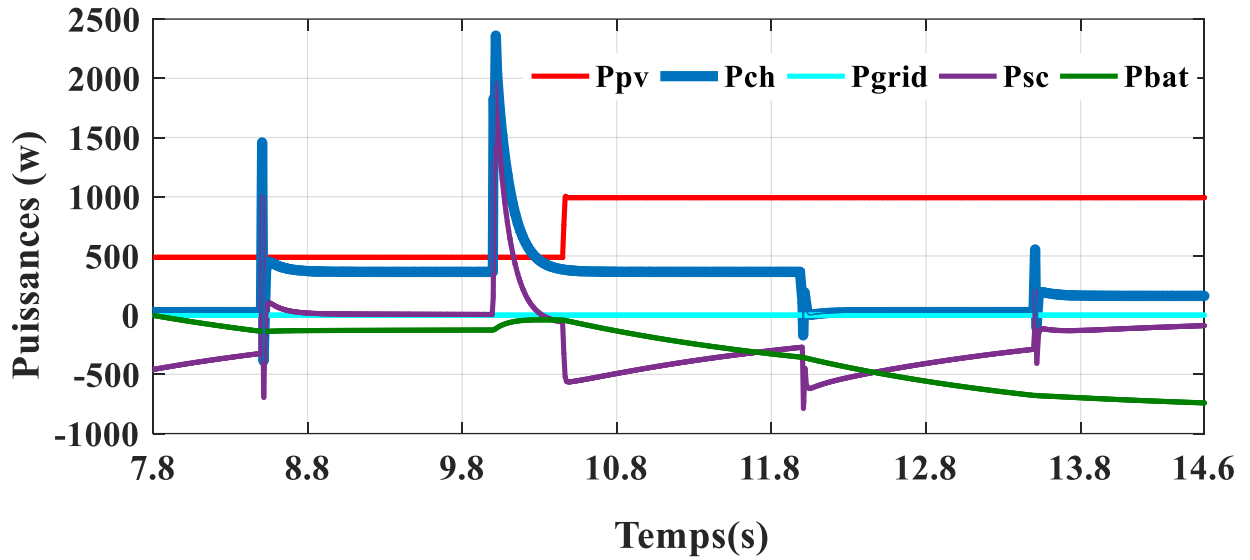
Dans de ce mode, la batterie est en charge pendant tous les intervalles de temps, afin de stocker l'énergie excédentaire du GPV.

Pendant [7.8 à 8.6]: La P_{net} est positive, cela indique que le GPV produit une puissance de $\approx 500w$ (Fig. 4.15.a) qui permet de satisfaire la demande en puissance, et permet de recharger la batterie et les SC en même temps par l'excès existant de l'énergie produite, induisant un courant négatif aux bornes de la batterie et des SC. Cette puissance modérée du GPV a pu combler la puissance faible de la charge, étroitement liée à des faibles masses de la cage.

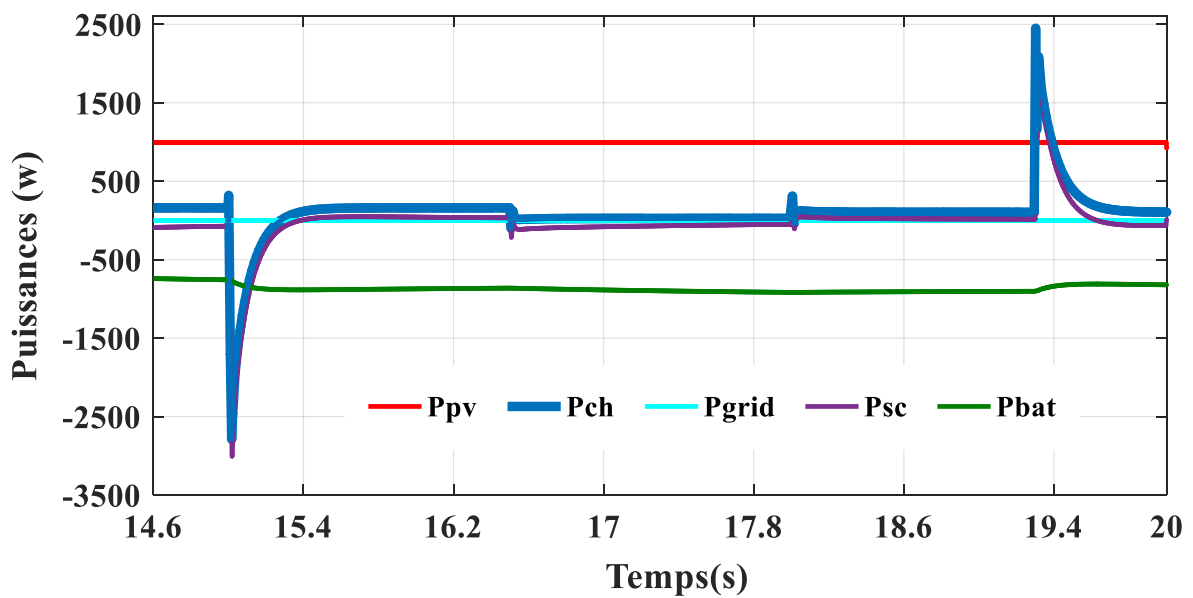
Pendant la fenêtre du temps [10.4s-20s], les remarques suivantes sont extraites :

- Une baisse de la puissance demandée par la charge de 2400w à 480w durant l'intervalle de temps (de 10.7s à 12s) et une augmentation de 480w à 80 pendant l'intervalle (12s à 13.6) sont constatés. Cette demande de la charge est assurée par le GPV, qui produit une puissance optimale de 990 w, qui donne la possibilité de continuer de charger les batteries en dynamique et les SC en statique comme le montre la figure (4.15.a).

- Dans les intervalles de temps ([9.8s 10.7] et [19s 20s]) l'ascenseur est en monté, on trouve que la puissance P_{net} devient négative (fig 4.11) et la demande de la charge prendre une puissance d'environ de 2400w ; qui ne permet pas au GPV de satisfaire cette



(a)



(b)

Figure.4.15. Puissance du système hybride en mode 3.

demande. Le déficit de puissance de la charge est assuré par les SCs qui fournissent les pics de courant au moment de variation brusque de la charge (Fig. 4.15 a et b).

- Pour $t \in [14.6s \quad 15.5s]$: l'ascenseur décent de 3m à 1m : la puissance demandée devient (-3000w); Cette dernière est stockée dans les SC qui sont en mode de charge, induisant un courant négatif aux bornes de SC. comme observé sur la fig. (15.b).

4.2.4.5 Mode4 : Mode d'injecté au réseau :

Dans ce mode (de 20s à 24s), l'état de charge de la batterie atteint son maximum 90% et la puissance P_{net} est notée alors positive. A cet effet, le courant de la batterie devient nul (fig.17.a), et par mesure de sécurité elle est mise hors service, ce qui signifie que l'excès de puissance est injecté dans le réseau électrique (puissance du réseau négative), comme observé sur la fig.4.16.

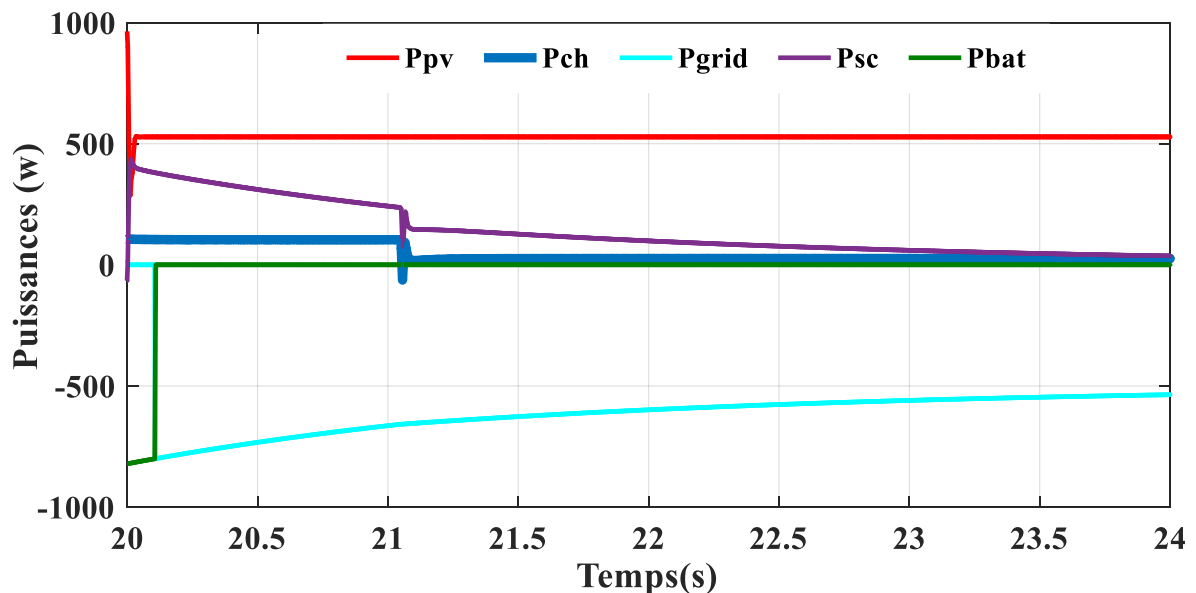
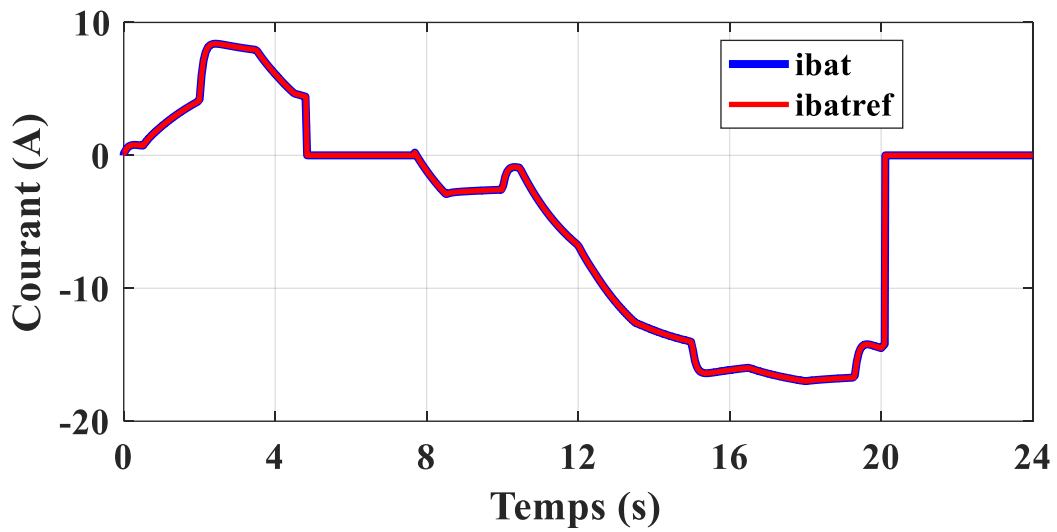
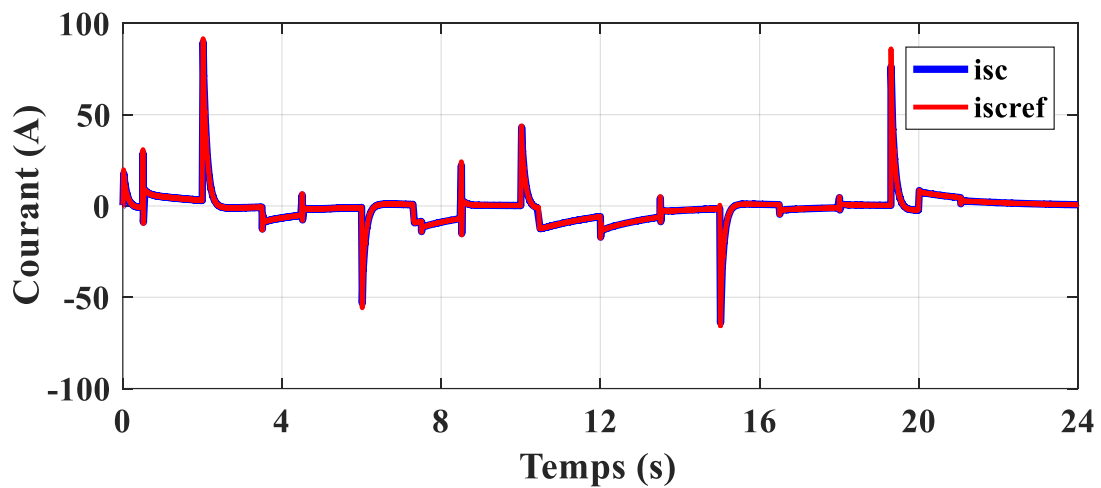


Figure.4.16. Puissance du système hybride en mode 4.

La figure (4.17 a et b) présente respectivement les courants de la batterie et des supercondensateurs avec ses références. On peut distinguer un bon suivi des consignes des courants et une rapidité notable, ce qui prouve l'efficacité des régulateurs de Lyapunov robustes incorporés.



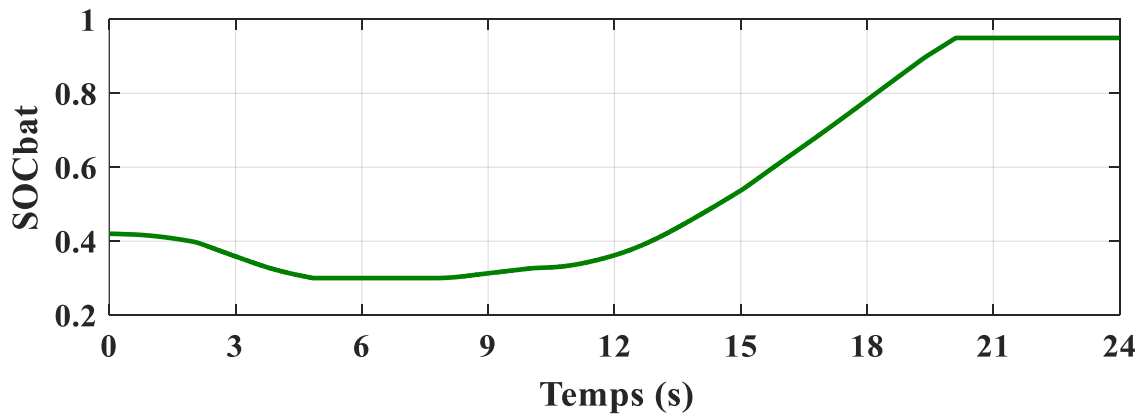
(a)



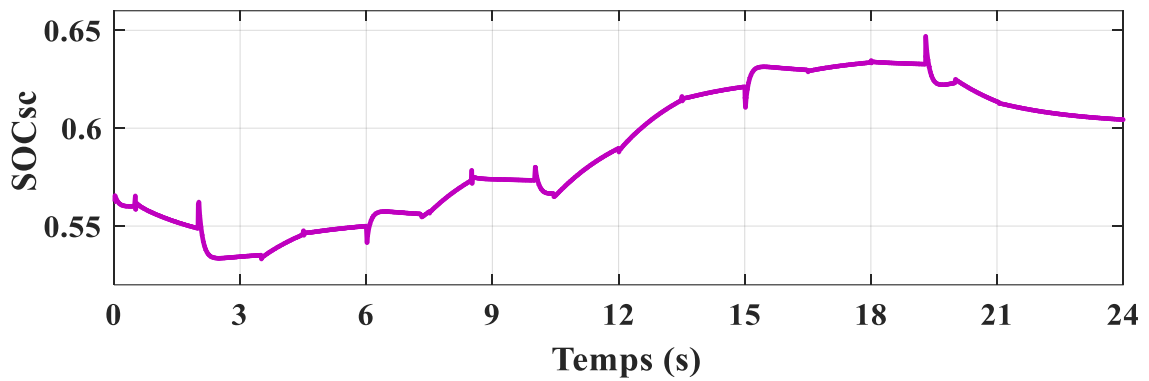
(b)

Figure.4.17. Courant et courant de référence de la batterie et des SC.

La figure (4.18. a et b) présente l'état de charge de la batterie et de supercondensateur respectivement. 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 ($0.3 < SOC < 0.95$) pendant tout le temps de simulation.



(a)



(b)

Figure.4.18.Etat de charge des SC et de la batterie.

4.2.5. Résultat de simulation de l'MSAP :

La figure (4.19) illustre la position de la cage pour des différentes consignes programmées, où on peut clairement remarquer un bon suivi des références de façon aperiodique, avec un temps de réponse de (0.5s). Cette poursuite adéquate de la position fait preuve de l'efficacité de la commande à boucles imbriquées du moteur d'entraînement.

Sur la figure (4.20) est montrée la réponse en vitesse de la MSAP, et cela pour la variation du couple de la charge. On peut constater que la vitesse embrasse sa référence nulle en statique lors de l'arrêt de la cage, imposée par la poursuite de la position via la boucle de commande externe.

De manière analogue, une poursuite adéquate est constatée en dynamique, alternativement en descente et en montée, sans dépassement, ni retard, prouvant l'efficacité du contrôleur introduit.

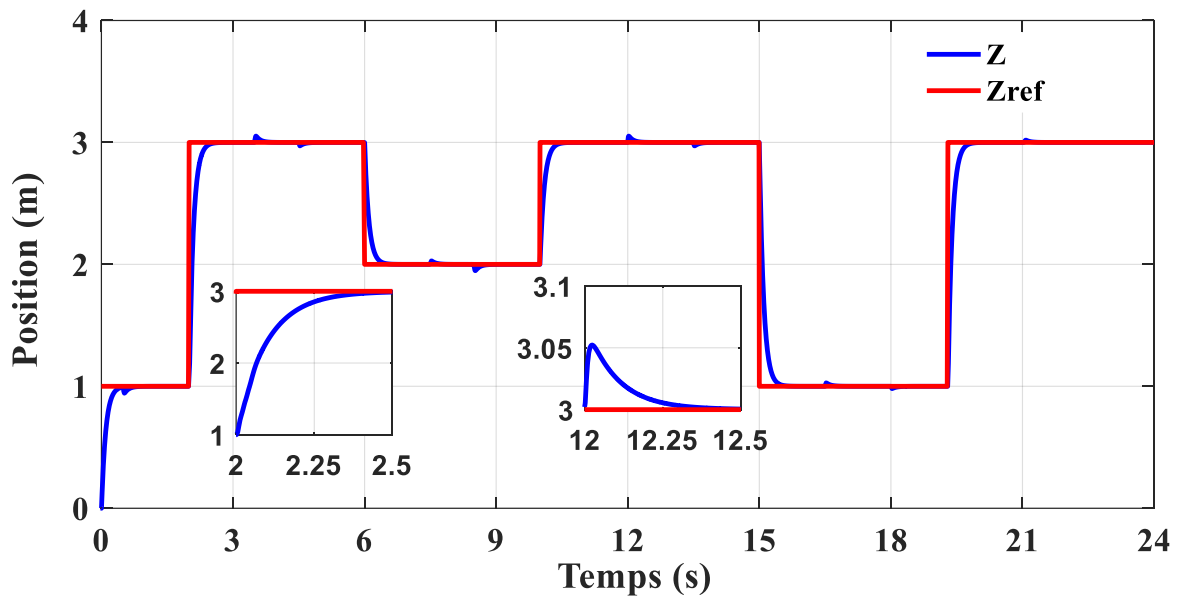


Figure.4.19. Position et sa consigne de l'ascenseur.

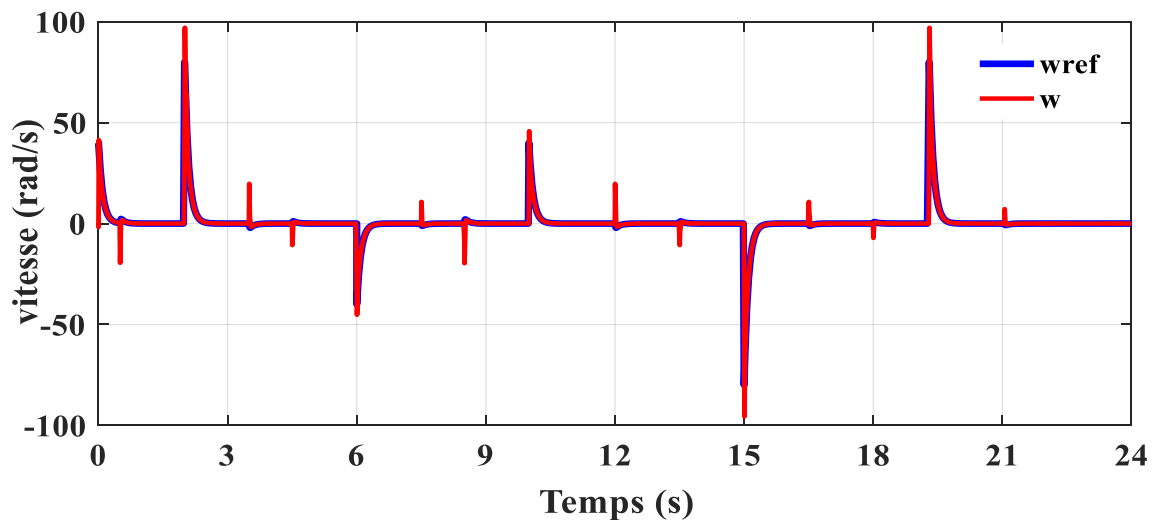


Figure.4.20. Vitesse de rotation mécanique

Les allures des figures (4.21), (4.22) montrent les performances de la commande vectorielle utilisant la commande prédictive en courant de la MSAP.

On remarque bien que le courant i_{qs} a un signe dépendant de l'augmentation ou la diminution de la consigne de position, croit proportionnellement avec l'augmentation de la charge. La composante de courant i_{sd} est proche de zéro même pendant les transitoires, ce qui montre bien le découplage introduit par la commande vectorielle de la machine. En outre, on peut remarquer que la composante du courant i_{qs} est l'image du couple électromagnétique, illustré sur la figure 4.23, qui présente des créneaux proportionnels à la demande de la charge pour une position de la cage bien définie, et des pics comme image de l'appel en transitoire. Ces pics de signe positif indiquent bien une accélération, alors qu'un freinage avec récupération est constaté pour des pics à signe négatif.

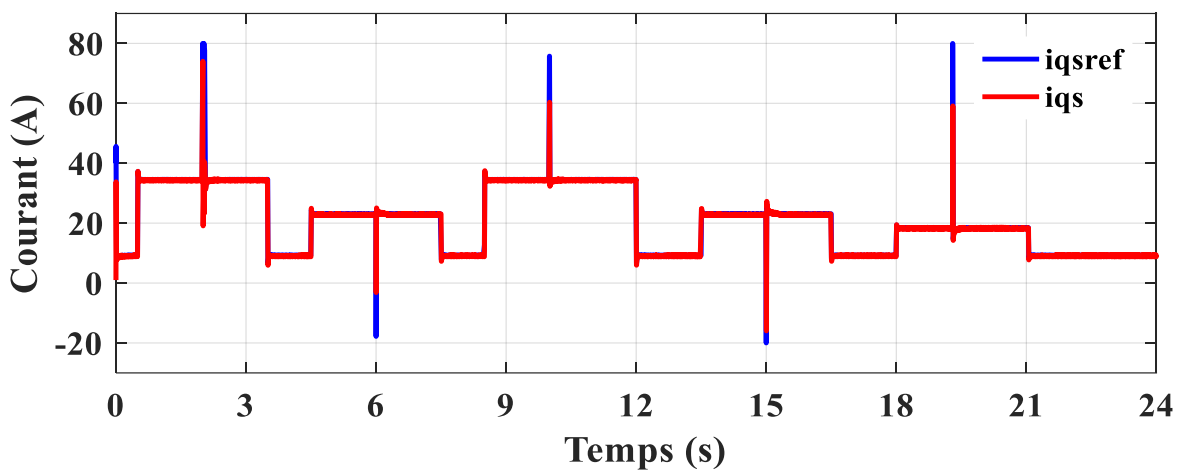


Figure.4.21. Le courant en quadrature (i_{qs}) et son référence.

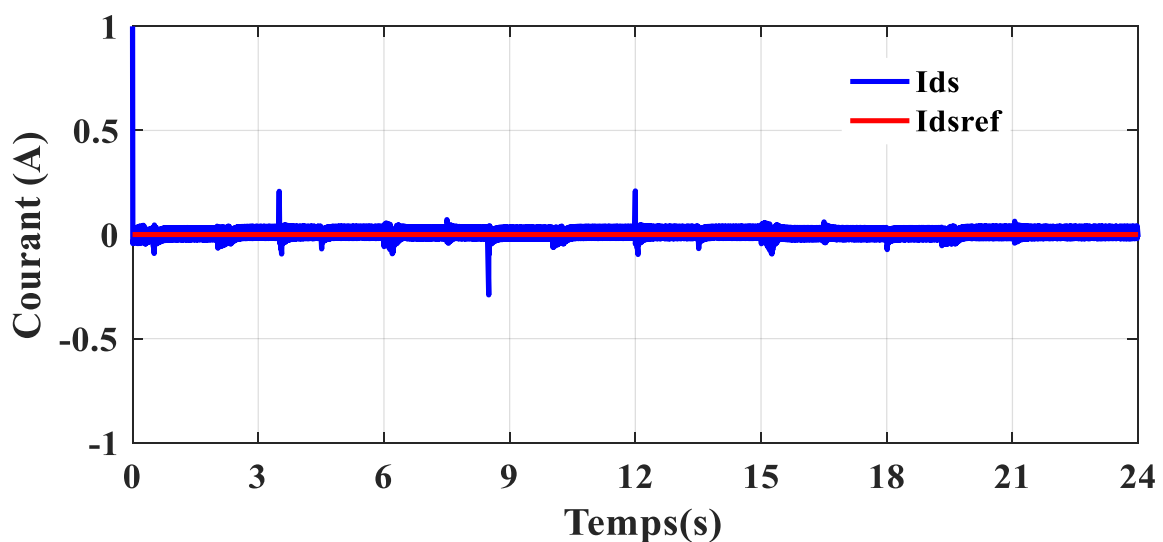


Figure.4.22. Le courant direct (i_{ds}) et son référence.

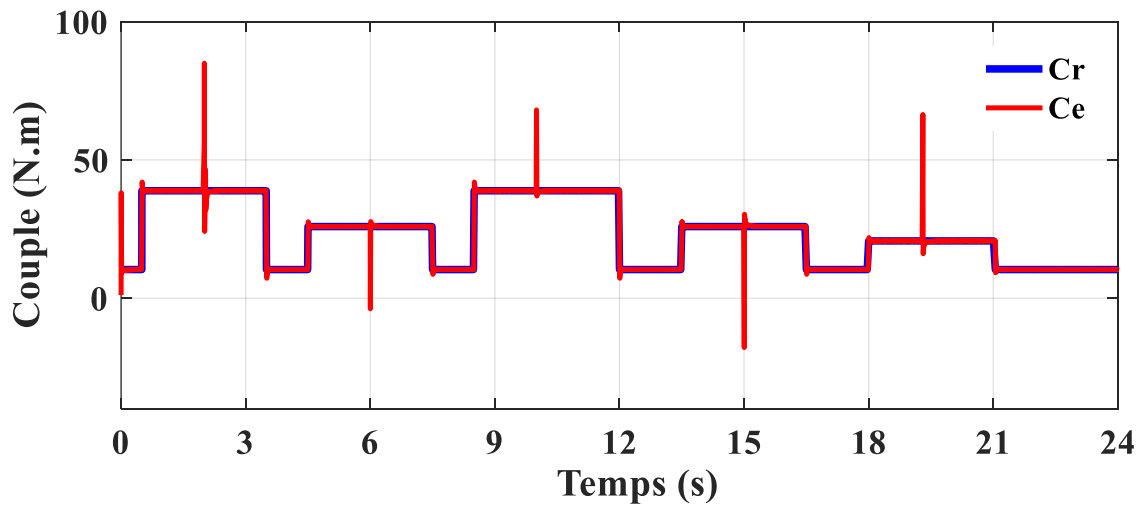
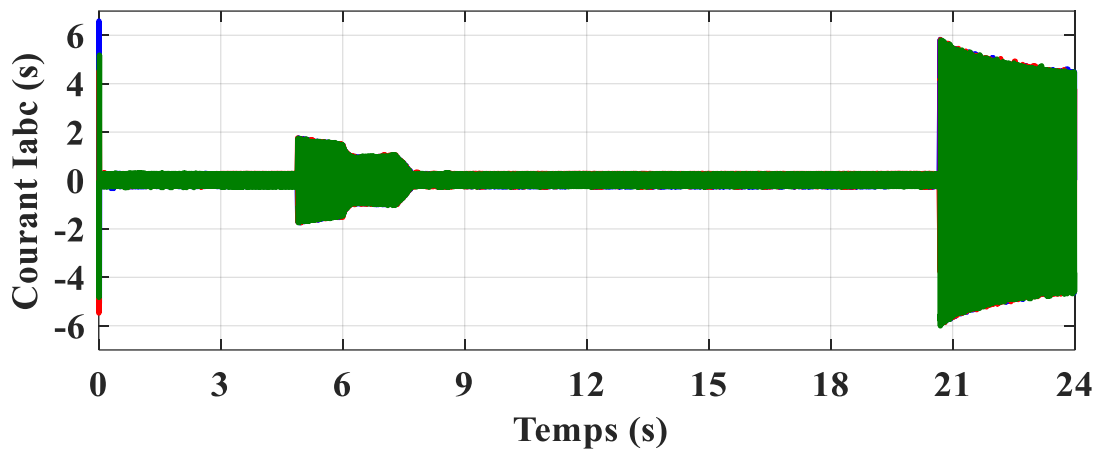


Figure.4.23. Le couple électromagnétique (C_{em}).

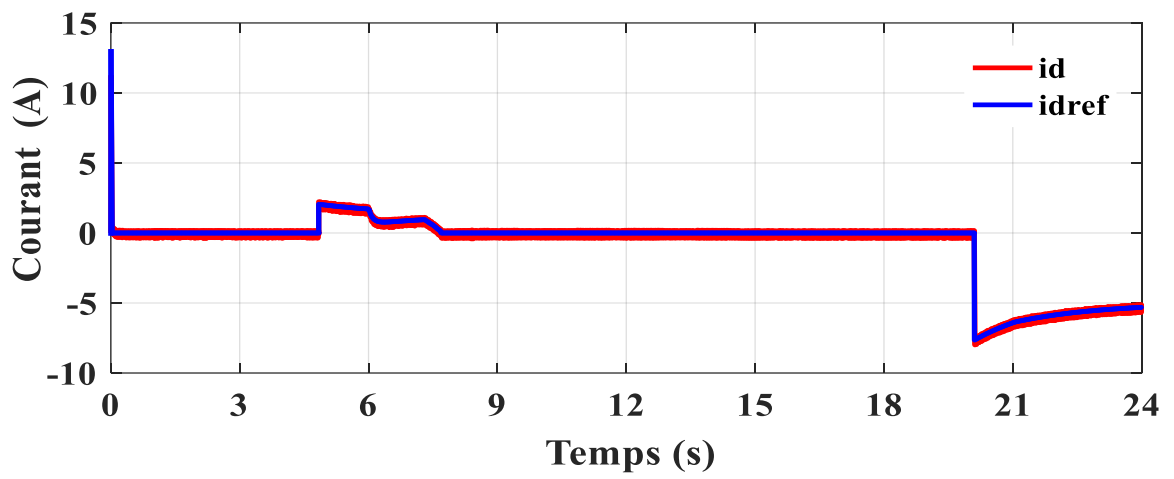
4.2.6. Résultats de simulation du réseau électrique :

Les courants de sortie, du côté AC de l'onduleur, sont contrôlés à l'aide d'une commande vectorielle, qui assure le contrôle indépendant du flux de puissance active et réactive entre l'onduleur et le réseau électrique. Selon les résultats de simulation présentés ci-dessous, on peut clairement remarquer que les courants direct et en quadrature (i_d et i_q) du réseau convergent bien vers leurs références après un temps de réponse court, relativement à la dynamique lente du profil de la source primaire (éclairage), prouvant ainsi l'efficacité du régulateur utilisé, comme indiqué dans la fig 4.24 (b et c).

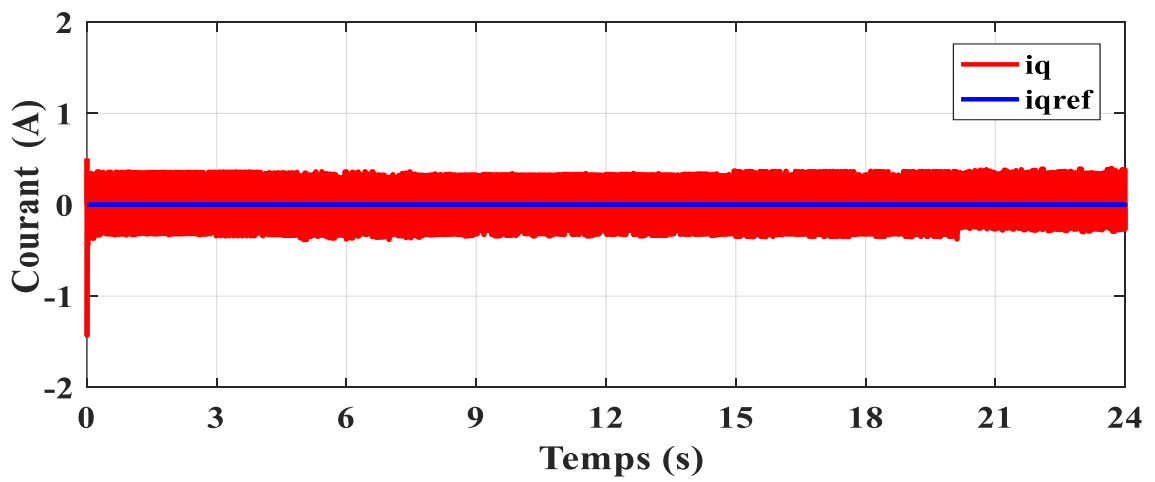
- Le courant i_d est d'environ de 3 A dans l'intervalle de temps de [5s à 7s], et le courant fourni par le réseau présente une faible distorsion harmonique, il est pratiquement en phase avec la tension du réseau comme il est observé dans la figure (fig.4.25.a), indiquant un fonctionnement à facteur de puissance unitaire, et le convertisseur coté réseau opéré alors en redresseur commandé.
- Pendant l'intervalle de temps [20s 24s], le courant (i_d) devient négative ce qui fait basculer le système en mode 4, et l'excès de puissance sera injecté dans le réseau, et cela indique une puissance active du réseau négative (comme image du courant i_d), comme observé sur la fig. (4.26 -a-).



(a)

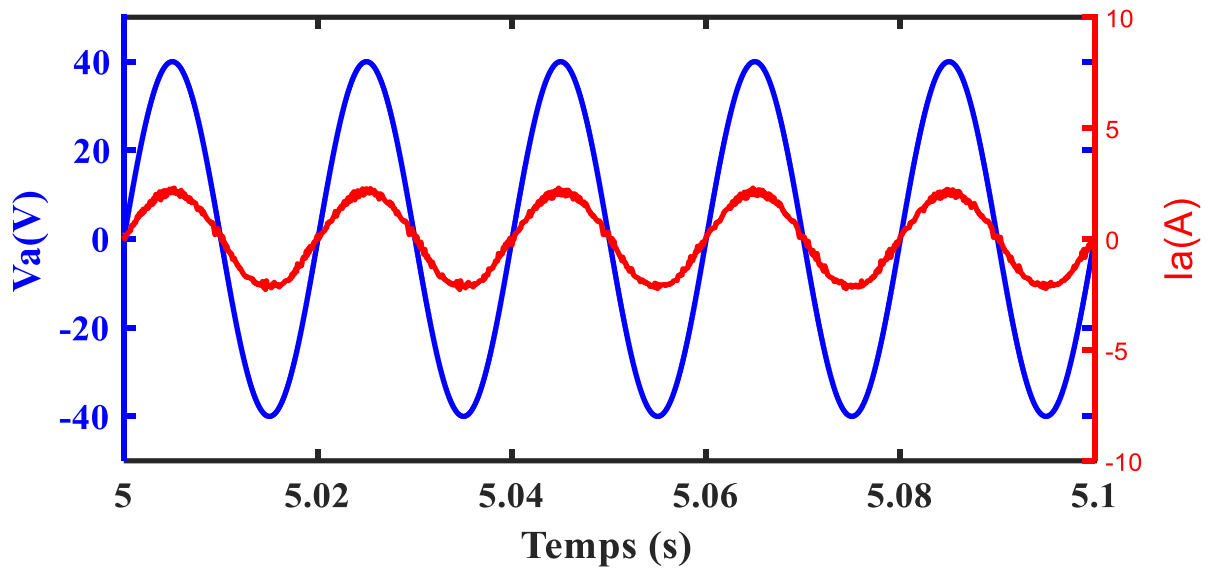


(b)

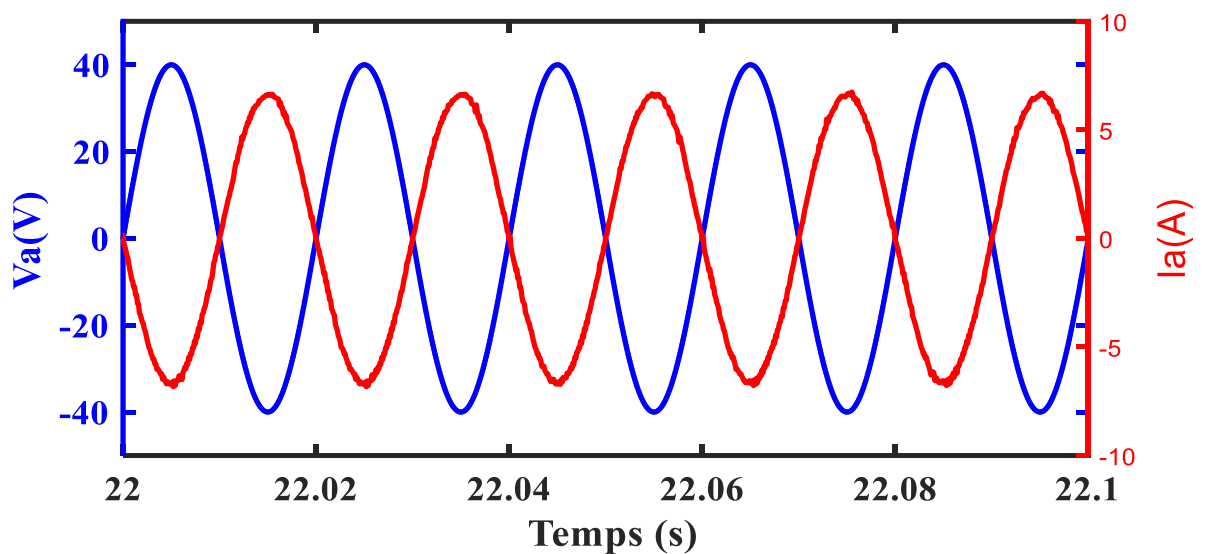


(c)

Figure.4.24. Courant injectée au réseau : a. I_{abc} ; b. i_d ; c. i_q .



(a)



(b)

Figure.4.25. Allure de la tension et du courant du réseau (a: mode 2 et b : mode4)

- Le courant en quadrature I_q est maintenu nul quel que soit la variation de la puissance de la charge, ce qui indique un transit nul de la puissance réactive entre les deux côtés de l'onduleur, comme il est remarqué à la fig. (4.24.c) et fig. (4.26.b). Les allures du courant et de la tension du réseau pour ce dernier état sont alors maintenues en opposition de phase, comme montré sur la figure (4.25.b), et le convertisseur coté réseau opère alors en onduleur autonome.

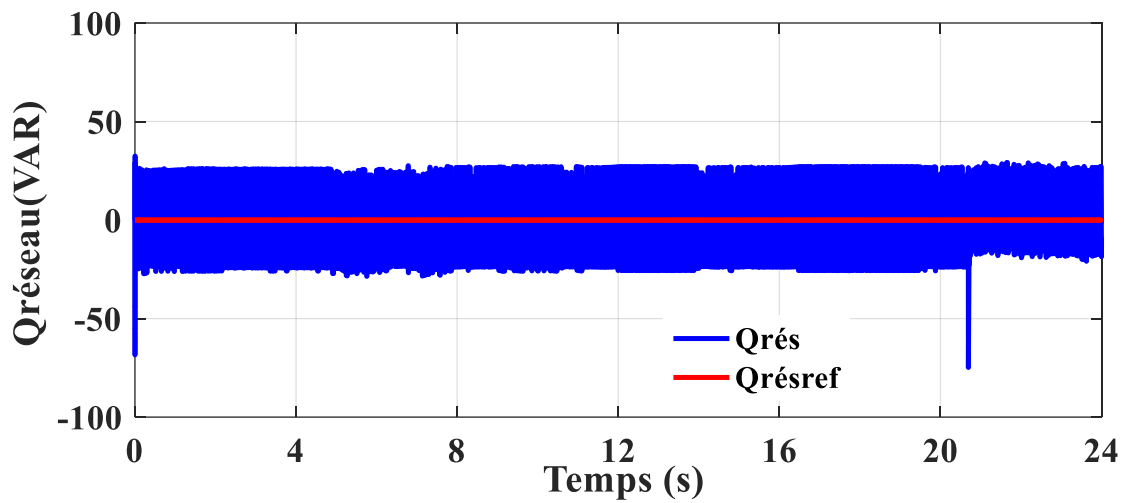
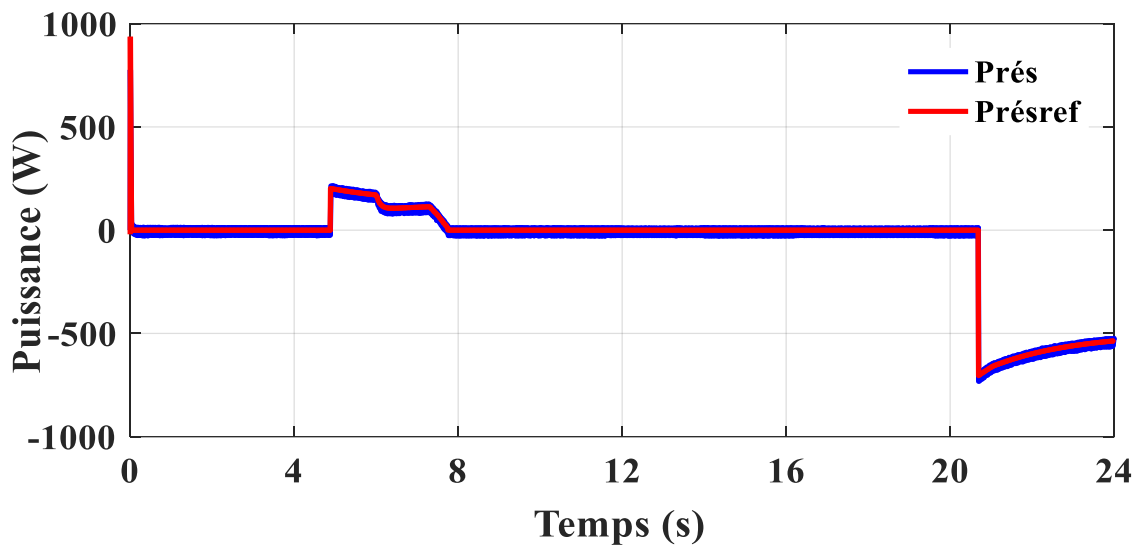


Figure 4.26. Allure de la puissance active et réactive du réseau (a: active et b : réactive).

Le régulateur par logique floue arrive à maintenir constante la tension du bus continu à une valeur de référence de 100V sur tout l'intervalle de temps (figure.4.27), sans dépassement notable lors du changement du mode, et par conséquent un écoulement souple des différentes quantités d'énergie produites vers la charge est garantie.

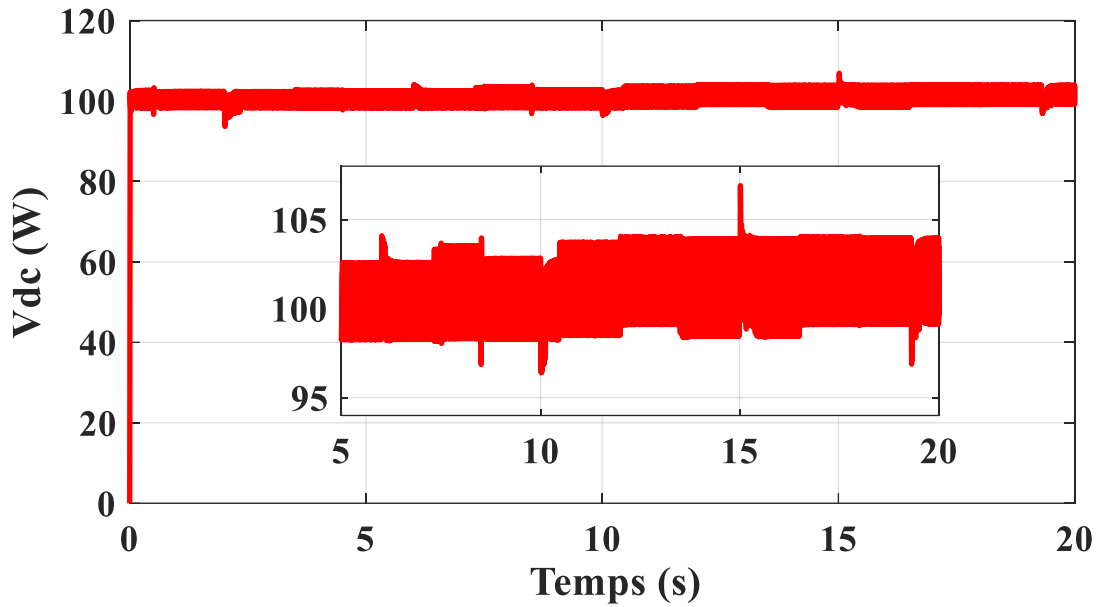


Figure.4.27. Evolution de la tension du bus DC.

4.3 Conclusion :

Dans le présent chapitre, et pour mettre en exergue les performances issues des deux gestionnaires d'énergie proposés, une série de courbes indiquant les allures des puissances fournies par chaque sous-système, ainsi que le contrôle de la position et de la vitesse du système ascenseur et le contrôle de la puissance active et réactive du réseau ont été présentées.

Les résultats de la gestion d'énergie par l'algorithme des réseaux de neurones a permis au système de gérer intelligemment l'équilibre énergétique production-demande des entrées exogènes variables ainsi que le profil de charge variable tout en exploitant les informations obtenues des différent sous-systèmes avec prise en charge des limitations de fonctionnement des différentes sources de puissance. On a pu constater que les deux méthodes de gestion d'énergie ont concrétisé avec succès une permutation souple entre les quatre modes de fonctionnement.

Ensuite, nous avons présenté les performances du RLF permettant de maximiser la puissance fournie par le générateur photovoltaïque. Par la suite, le contrôle du convertisseur DC/AC (onduleur) permettant de connecter les diverses sources au réseau électrique a été présentée.

*Conclusion générale et
perspectives*

Conclusion générale

Les travaux que nous avons menés dans le cadre de cette thèse visent à assurer un fonctionnement souple et efficace du système ascenseur alimenté par les sources à puissances finies le constituant. Notre contribution est de concevoir deux stratégies de gestion d'énergie : l'une est basée sur la séparation fréquentielle et l'autre est basé sur l'intelligence artificielle (RNA) permettant un écoulement souple des flux d'énergie des différentes entités de puissance (sources), et d'assurer la demande de la charge. De ce fait, Cette thèse est composée de quatre parties.

En premier lieu, des généralités sur les systèmes d'énergie hybrides ont été présentées. Puis, nous avons donné une classification des différentes stratégies de gestion d'énergie afin de choisir une technique adéquate pour gérer l'énergie produite par les différentes sources. Les modèles mathématiques qui décrivent le comportement des différentes parties de notre système hybride ainsi que les convertisseurs statiques (hacheur boost, bidirectionnel, onduleur et redresseur) nécessaires à la conversion de l'énergie électrique ont été donnés dans le deuxième chapitre. Tout ce qui est discuter sur le premier et le deuxième chapitre nous a orienté à choisir la bonne conception de fonctionnement de notre système hybride, où les générateurs photovoltaïques ai été choisi comme une source de production primaire grâce à leur énergie spécifique élevée. D'autre part, son intermittence aux conditions climatiques nous a menés vers un ajout d'une troisième source afin d'augmenter la fiabilité de notre système hybride. Cependant, les super condensateurs et les batteries ont été employés, respectivement, comme sources auxiliaires. Les accumulateurs chimiques (batteries) dans ce travail ont été considérés comme une autre source d'énergie, afin d'améliorer le comportement de notre système hybride en régime permanant. D'autre part, les super condensateurs ont été employés comme une source de puissance spécifique élevée et ses dynamiques rapides dans les régimes transitoires permettent de satisfaire la demande en montée et en descente de l'ascenseur. Afin d'optimiser l'énergie produite par le GPV, nous avons adopté un algorithme MPPT flou permettant d'extraire en permanence l'optimum de puissance. 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 par le premier théorème de stabilité de

Lyapounov pour stabiliser la tension sur le bus continu, sur lequel sont connectées les différentes sources et la charge.

Des simulations sous Matlab/Simulink de l'ensemble sont effectuées au dernier chapitre pour valider les approches de commande définies au troisième chapitre. De ce fait, quelques conclusions ont été déduites:

- Une efficacité notable des deux gestionnaires d'énergies proposés permet de gérer efficacement les échanges de flux d'énergie entre les sources et la satisfaction de la demande de la charge face aux variations de la charge et aux conditions climatiques.
- Le régulateur MPPT flou a permis une extraction maximale de la puissance fournie par le GPV pour toute la période de simulation.
- La commande prédictive appliquée aux deux courants i_d , i_q du moteur MSAP offre de bonnes performances statiques et dynamiques.
- La position réelle suit la référence imposée avec une faible influence lors de la variation de la charge en régime de montée ou de descente de la cage de l'ascenseur.
- La tension du bus DC du système est bien régulée et que la réponse suit sa référence sans dépassement.
- Les régulateurs par la théorie de Lyapounov des convertisseurs de la batterie et des supercondensateurs sont démontrent une robustesse notable vis-à-vis la variation des modes de fonctionnement afin de protéger les batteries et les SC contre les charges excessives et les décharges profondes.
- L'utilisation du réseau électrique s'effectue uniquement si les seuils des états de charge des éléments de stockages (batterie et supercondensateur) sont atteints. Ceci permet d'utiliser les sources d'énergies renouvelables et les éléments de stockage en priorité. Les courants transitoires sont fournis ou absorbés par les supercondensateurs, les batteries gèrent les besoins avec une constante de temps lente. Cette dernière est réglable en fonction des performances souhaitées.

Enfin, des perspectives de ce travail qui peuvent être distinguées dans le but d'améliorer ce genre de systèmes sont citées ci-dessous:

- Proposer et comparer une autre commande pour la gestion d'énergie pour ce type du système. Pour ce faire, un algorithme basé sur la commande robuste est cité.
- L'utilisation d'autres structures de convertisseurs de puissance permettant d'augmenter la densité de puissance, notamment pour le système hybride de grande puissance.
- L'intégration d'autres types de stockage pour le lissage de la puissance active injectée dans le réseau électrique, et également pour la contribution au réglage de la fréquence
- Hybridation avec d'autres sources renouvelables telles que les piles à combustibles afin de maximiser la production.
- La réalisation d'un banc d'essai à partir des résultats de simulation pour compléter le travail et concrétiser ce projet sur site.
- Un autre aspect de sécurité est d'engager une réflexion sur l'introduction d'une surveillance des défauts pour les éléments du système de stockage ou des panneaux photovoltaïques afin d'optimiser toujours la production en cas de défaillance d'une partie d'entre eux.

Annexe

Annexe A : Paramètres des composants du SEH

Les paramètres de la machine synchrone à aimant permanent:

- Puissance nominale 5Kw
- Fréquence nominale 50 Hz
- Résistance de phase 0.3676 Ω
- Inductance cyclique sur l'axe directe 0.00355 H
- Inductance cyclique sur l'axe transverse 0.00355 H
- Nombre de paire de pôles 6
- Amplitude de flux des aimants permanents 0.25 Wb
- Moment d'inertie 7.856 Kg m²
- Coefficient de frottement visqueux 0.00038818N.m/rd/s
- Rayon du pignon (r) 25.9mm

Onduleur de tension :

- F_{porteuse} 20kHz

Les paramètres de Générateur photovoltaïque :

- Puissance crête : 990 W
- Tension optimale : 68.8 V
- Courant optimum : 14.4 A
- Intensité de court-circuit : 15.3 A
- Tension en circuit ouvert : 86.4 V
- $\alpha = 0.06 \text{ \% / } ^\circ\text{C}$
- $\beta = 0.4 \text{ \% / } ^\circ\text{C}$

Convertisseur associé au GPV : $L_{\text{pv}} = 1\text{mH}$

Les caractéristiques de la batterie :

- La tension 48 V
- La capacité 200Ah
- r_{bat} 0.02 Ω
- n 24 cellules

Convertisseur associé: $L_{\text{bat}} = 250\text{mH}$

Annexe

Les caractéristiques des supercondensateurs :

- Capacité totale 14.5F
 - Tension nominale 60v
 - Energie disponible 19575J
 - R_{sc} 118.27m
- Convertisseur associé :* $L_{sc} = 250mH$

Bus continu

- C_{dc} 1000 μ F
- V_{dc} 100v

Contributions Scientifiques

Publications Internationales:

M. Maamir^{a,*}, O. Charrouf^a, A. Betka^a, M. Sellali^a, M. Becherif^b, "Neural network power management for hybrid electric elevator application". Mathematics and Computers in Simulation, 2020. **167**: p. 155-175.

Maamir,M.,Betka, A., & Aboub, H. (2016). "Modeling and Simulation of Energy Management Hybrid Sources System composed of Solar-PV and Battery". International Journal of Energetica, 1(1), 12-19.

Conférences Internationals:

M.Maamir, A.Betka, O.charrouf, M.Sellali, M.Becherif., " Neural network power management for hybrid electric elevator application", International conference on Emerging and Renewable Energy : Generation and Automation," ICEREGA18", held in Sousse-Tunisia, 28-30 October 2018.

M.Maamir, A.Betka, "Energy management of photovoltaic array/Battery/Supercapacitor Hybrid power source fed a PMSM drive for Electric Elevator Application" ICEEB'14 conference held in Biskra. 2014.

Maamir,M.,Betka, A., & Aboub, H. "A study on photovoltaic/Battery and supercapacitor Hybrid system based on PMSM driver for Electric Elevator Application" INCOSLE2015 conference held in Bordj Bou Arreridj, May 4-5, 2015.