



HAL
open science

Approche systémique de la gestion d'énergie électrique par stockage électrochimiques dédiés aux applications de transport

Ismail Oukkacha

► **To cite this version:**

Ismail Oukkacha. Approche systémique de la gestion d'énergie électrique par stockage électrochimiques dédiés aux applications de transport. Autre. Normandie Université, 2019. Français. NNT : 2019NORMLH27 . tel-03080962

HAL Id: tel-03080962

<https://theses.hal.science/tel-03080962>

Submitted on 18 Dec 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Normandie Université

THESE

Pour obtenir le diplôme de doctorat

Spécialité Génie électrique

Préparée au sein de l'Université Le Havre Normandie

Approche systémique de la gestion d'énergie électrique par stockage électrochimiques dédiée aux applications de transport

**Présentée et soutenue par
Ismail OUKKACHA**

**Thèse soutenue publiquement le 17 décembre 2019
devant le jury composé de :**

M. DJERDIR Abdesslem	Maître de conférences -HDR, Université de Technologie de Belfort Montbéliard	Rapporteurs
M. SARI Ali	Professeur des Universités, Université Claude Bernard Lyon I	

M. CUREA Octavian	Professeur à l'École Supérieure des Technologies Industrielles Avancées (ESTIA)	Examineurs
M. GUALOUS Hamid	Professeur des Universités, Université de Caen Normandie	
M. LE BUNETEL Jean Charles	Professeur des Universités, Université de Tours	
M. ABDOU TANKARI Mahamadou	Maître de conférences, Université Paris-Est Créteil Val de Marne	

M. CAMARA Mamadou Baïlo	Maître de conférences - HDR, Université Le Havre Normandie	Directeur de thèse
M. DAKYO Brayima	Professeur des Universités, Université Le Havre Normandie	Co-directeur de thèse

**Thèse préparée au sein du laboratoire GREAH (Groupe de Recherche en Electrotechnique et Automatique du Havre)
GREAH-EA 3220, Université Le Havre Normandie.**

Nomenclature

Acronyme

SSE	Système de Stockage d'Énergie
VE	Véhicule Électrique
VEH	Véhicule Électrique Hybride
PAC	Pile à Combustible
LFP	Lithium Fer Phosphate (LiFePO ₄)
Fc	Fuel cell (pile à combustible)
Sc	Supercondensateur (ou pack des supercondensateurs)
Bat	Batterie (ou module de batteries)
GM	General Motors
ICE	Internal Combustion Engine (Moteur à combustion)
FOC	Field Oriented Control (Commande à orientation du flux)
GES	Gaz à Effet de Serre
MAS	Machine asynchrone
MS	Machine synchrone
MSAP	Machine Synchrone à Aimants Permanents

Notations générales

V_{Bus_ref} et V_{Bus}	Référence et mesure de la tension du bus continu [V]
V_{Bat}	Tension aux bornes du module des batteries [V]
V_{Sc}	Tension aux bornes du pack des supercondensateurs [V]
V_{Fc}	Tension aux bornes de la PAC [V]
I_{Bat_ref} et I_{Bat}	Référence et mesure du courant du module des batteries [A]
I_{Sc_ref} et I_{Sc}	Référence et mesure du courant du pack des supercondensateurs [A]
I_{Fc_ref} et I_{Fc}	Référence et mesure du courant de la PAC [A]
I_{Load}	Courant de la charge (désigne aussi le courant du bus continu) [A]
I_{Bus}	Courant dans le bus continu (désigne aussi le courant de la charge)[A]
$I_{Bat_Bus_ref}$	Référence de la contribution des batteries dans le bus continu [A]
$I_{Sc_Bus_ref}$	Référence de la contribution des supercondensateurs dans le bus continu [A]
$I_{Fc_Bus_ref}$	Référence de la contribution de la PAC dans le bus continu [A]
f_d	Fréquence de contrôle des convertisseurs statiques
I_d et I_q	Courants statoriques selon les axes d et q de la MSAP [A]
V_d et V_q	Tensions statoriques selon les axes d et q de la MSAP [V]
L_d et L_q	Inductances statoriques selon les axes d et q de la MSAP [H]
R_s	Résistance d'une phase statorique [Ω]
p	Nombre de paires de pôles de la MSAP
T_e	Période d'échantillonnage [s]
S_a, S_b, S_c	Signaux PWM de commande de l'onduleur
ϕ_r	Flux des aimants permanents de la MSAP [Wb]
f_v	Coefficient des frottements visqueux
J	Moment d'inertie de la MSAP [kg/m ²]
Ω_{ref}, Ω	Référence et mesure de la vitesse de la MSAP [tr/min]
C_r, C_e	Couple résistant et couple électromagnétique de la MSAP [Nm]
N_{S_Bat}, N_{P_Bat}	Nombre de cellules de batteries en série et en parallèle
N_{S_Sc}, N_{P_Sc}	Nombre de cellules de Sc en série et en parallèle
N_{S_Fc}	Nombre de cellules de PAC en série
A_r	Surface active de la PAC [cm ²]
L_{Bat}, L_{Sc}, L_{Fc}	Inductance de lissage des courants des batteries, Sc et PAC [H]
C_{Bat}, C_{Sc}, C_{Fc}	Capacités de sortie des convertisseurs liées aux batteries, Sc et PAC [F]
C_{Bus}	Capacité du bus continu
τ_{Bat}, τ_{Sc}	Constantes de temps des filtres passe-bas [s]
PWM_i	Signaux PWM de commande des convertisseurs statiques

ρ_P	Puissance spécifique (densité de puissance)
ρ_E	Energie spécifique (densité d'énergie)
SoC	Etat de charge (State of Charge)
DoD	Profondeur de la décharge (Depth of Discharge)
SoH	Etat de santé (State of Health)
SoF	Etat de fonctionnement (State of functioning)

Table des matières

Nomenclature	1
Table des matières	3
Liste des figures	7
Liste des tableaux	11
Résumé	12
Abstract	12
Remerciements	13
Introduction générale	14
Chapitre 1 : Etat de l'art sur les véhicules électriques/électriques hybrides et les problématiques de couplage des sources d'énergie dans les applications de transport	17
1.1 Introduction	19
1.2 Enjeux des véhicules électriques et des véhicules électriques hybrides	19
1.3 Solutions envisageables et leurs limites	22
1.3.1 Première solution : Optimisation de la chaîne de traction thermique.....	22
1.3.2 Seconde solution : les véhicules électriques hybrides	23
1.3.3 Troisième solution : Les véhicules électriques.....	23
1.4 Historique des véhicules électriques	25
1.5 Principales configurations des VEs et VEHS	26
1.5.1 Architectures des véhicules électriques hybrides	26
1.5.2 Architecture hybride série	26
1.5.3 Architecture hybride parallèle	27
1.5.4 Architecture hybride combinée	28
1.6 Degré d'hybridation dans les VEHS	29
1.6.1 Véhicules micro hybrides « micro hybrid »	29
1.6.2 Véhicules semi-hybrides « mild hybrid ».....	29
1.6.3 Véhicules hybrides complets « full hybrid ».....	29
1.6.4 Les véhicules purement électriques.....	30
1.6.5 Les véhicules électriques à pile à combustible.....	30
1.7 Moteur électrique pour la traction des VEs et des VEHS	31
1.7.1 Caractéristiques des moteurs utilisés dans les VEs et VEHS.....	31
1.7.2 Types de moteurs utilisés dans la traction/propulsion électrique	31
1.7.2.1 Les machines à réluctance variable (MRV)	32
1.7.2.2 Les machines asynchrones (MAS)	32
1.7.2.3 Les machines synchrones (MS).....	32
1.8 Hybridation des SEE (Systèmes multi-sources).....	33

1.8.1	Caractéristiques des sources d'énergie électrique	33
1.8.2	Possibilités d'hybridation des sources d'énergie électrique	36
1.9	Problématiques de couplage des unités de stockage au sein des systèmes multi-sources.....	37
1.10	Objectifs de la thèse	39
1.11	Conclusion.....	40
Chapitre 2 : Modélisation des éléments du système multi-sources.....		41
2.1	Introduction	43
2.2	Architectures d'hybridation des sources d'énergie électrique.....	43
2.2.1	Hybridation passive des sources d'énergie électrique.....	43
2.2.2	Hybridation active des sources d'énergie.....	44
2.3	Configurations des systèmes étudiés	45
2.4	Modèles comportementaux des convertisseurs DC-DC.....	46
2.4.1	Modèle du convertisseur dévolteur	46
2.4.2	Modèle du convertisseur survolteur	47
2.4.3	Modèle du convertisseur dévolteur-survolteur.....	47
2.4.4	Modèle du convertisseur survolteur entrelacé.....	48
2.5	Modélisation des éléments de la chaîne de traction/propulsion	49
2.5.1	Modèle de l'onduleur de tension triphasé	50
2.5.2	Modèle de la Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP).....	52
2.5.3	Mise en équation d'une MSAP.....	54
2.6	Modélisation de la pile et unités de stockage d'énergie électrique	56
2.6.1	Technologies de piles à combustible.....	56
2.6.2	Modèle de la PAC	58
2.6.3	Modélisation comportementale des batteries	61
2.6.4	Maturité et performances des technologies des batteries	62
2.6.5	Modèle de la batterie LiFePO4 à deux constantes de temps	64
2.6.6	Validation expérimentale du modèle de la batterie à deux constantes de temps.....	66
2.7	Modélisation comportementale des supercondensateurs.....	67
2.7.1	Modèle constructeur et modèle à plusieurs branches	68
2.7.2	Modèle de supercondensateurs Boost-Cap (3000F/2.7V) retenu pour la gestion d'énergie électrique	69
2.7.3	Validation du modèle de Boost-Cap (3000F/2.7V).....	70
2.8	Conclusion.....	71
Chapitre 3 : Dimensionnement des sources d'énergie électrique et commande des convertisseurs statiques.		72
3.1	Introduction	74
3.2	Modèle dynamique du véhicule électrique.....	74

3.2.1	Représentation mathématique du modèle dynamique du VE.....	74
3.2.2	Choix de l'exemple du véhicule électrique	76
3.3	Dimensionnement des éléments de stockage de l'énergie électrique.....	79
3.3.1	Méthode de dimensionnement basée sur l'approche de décomposition fréquentielle..	79
3.3.2	Dimensionnement du module des batteries	80
3.3.2.1	Dimensionnement en énergie	80
3.3.2.2	Dimensionnement en puissance	81
3.3.2.3	Calcul du nombre d'éléments du module des batteries	82
3.3.3	Dimensionnement du pack des supercondensateurs.....	83
3.3.3.1	Dimensionnement en puissance	83
3.3.3.2	Dimensionnement en énergie	84
3.3.4	Dimensionnement de la pile à combustible.....	84
3.3.4.1	Détermination du nombre et de la surface active des cellules de la PAC	85
3.4	Commande de la Machine Synchrones à Aimants Permanents (MSAP)	86
3.4.1	Commande vectorielle de la MSAP	87
3.4.1.1	Principe de la commande vectorielle.....	87
3.4.1.2	Réglage des consignes des courant I_d et I_q	87
3.4.1.3	Découplage entre les axes d et q.....	89
3.4.2	Commande vectorielle basée sur les correcteurs PI (FOC-PI)	90
3.4.3	Commande vectorielle basée sur les correcteurs RST (FOC-RST).....	92
3.5	Contrôle des convertisseurs d'interfaçage des sources d'énergie.....	97
3.5.1	Contrôle des contributions en courant des sources d'énergie.....	97
3.5.2	Contrôle de la tension du bus continu	99
3.6	Conclusion.....	101
Chapitre 4 : Stratégie de gestion d'énergie par approche fréquentielle et simulations comportementales du système hybride.....		102
4.1	Introduction	104
4.2	Approche de répartition fréquentielle des sollicitations de la charge.....	104
4.2.1	Principe de l'approche fréquentielle.....	104
4.2.2	Choix des constantes de temps des filtres	107
4.3	Simulations comportementales du véhicule par approche fréquentielle	108
4.3.1	Système à deux sources d'énergie (batteries et supercondensateurs).....	108
4.3.2	Système à trois sources d'énergie (PAC, batteries et S_c).....	111
4.3.2.1	Simulations du système à trois sources pour le cycle FTP-75.....	111
4.3.2.2	Simulations du système à trois sources pour le cycle WLPT.....	115
4.4	Conclusions	117

Chapitre 5 : Validation expérimentale de la gestion d'énergie basée sur l'approche fréquentielle et investigation de l'intérêt d'une approche fréquentielle adaptative.....	119
5.1 Introduction	121
5.2 Validation expérimentale de la stratégie de gestion d'énergie basée sur l'approche fréquentielle.....	121
5.2.1 Description des différentes composantes du banc d'essai.....	121
5.2.2 Résultats expérimentaux à échelle réduite.....	124
5.2.2.1 Manipulation 1 : Résultats expérimentaux pour un système hybride à base de batteries et des supercondensateurs	124
5.2.2.2 Manipulation 2 : Résultats expérimentaux pour un système hybride à base de PAC et des supercondensateurs	127
5.2.2.3 Manipulation 3 : Résultats expérimentaux pour le système hybride à base de PAC, des batteries et des supercondensateurs.....	129
5.3 Conclusions	131
5.4 Stratégie de gestion d'énergie électrique basée sur l'approche fréquentielle adaptative	132
5.4.1 Variation de la constante de temps des filtres dans l'approche fréquentielle adaptative.....	132
5.4.2 Vieillessement et état de santé des sources d'énergie électrique	134
5.4.2.1 Vieillessement des sources d'énergie électrique	134
5.4.2.2 Estimation de l'état de santé (SoH) des sources d'énergie électrique	135
5.4.3 Type des approches fréquentielles adaptatives.....	136
5.4.3.1 Approche basée sur la logique déterministe	136
5.4.3.2 Approche basée sur la logique floue	137
5.5 Exemples d'approches fréquentielles adaptatives	138
5.5.1 Conditions des exemples de simulations	138
5.5.2 Résultats des exemples de simulations.....	139
5.5.2.1 1 ^{er} exemple : Approche fréquentielle adaptative basée sur une logique déterministe.....	139
5.5.2.2 2 ^{ème} exemple : Approche fréquentielle adaptative basée sur la logique floue.....	141
5.6 Conclusions	145
Conclusion générale	147
Annexes.....	149
Productions scientifiques	160
Références.....	161

Liste des figures

Figure 1.1: Répartition des émissions de GES par source en France en 2015.	20
Figure 1.2: Répartition des GES en 2016.	20
Figure 1.3: Emissions de GES du secteur des transports en France.	20
Figure 1.4: Evolution de la température en France entre 1900 et 2015.	21
Figure 1.5: Répartition sectorielle des émissions du CO2 dans le monde en 2016.	21
Figure 1.6: Emissions de GES des transports dans l'union européenne en 2016.	22
Figure 1.7: Réduction des émissions en CO2 pour les VEHs et les VEs [21].	24
Figure 1.8: La jamais contente.	25
Figure 1.9: Répartition des ventes des voitures en France pour l'année 2016 [22].	26
Figure 1.10: Architecture hybride série.	27
Figure 1.11: Architecture hybride parallèle.	28
Figure 1.12: Architecture hybride combinée.	28
Figure 1.13: Architecture tout électrique.	30
Figure 1.14: Structure d'un véhicule électrique à pile à combustible.	31
Figure 1.15: Diagramme de Ragone [30].	34
Figure 1.16: Caractéristiques des batteries et des supercondensateurs.	34
Figure 1.17: Caractéristiques des PAC et du couplage (batterie + supercondensateurs).	36
Figure 1.18: Cycle FTP-75 (a) et Cycle NEDC (b).	38
Figure 1.19: Cycle WLPT3 à gauche et Cycle NYCC à droite.	38
Figure 2.1: Architecture sans hybridation des SEE.	43
Figure 2.2: Architecture d'hybridation des SSE avec association passive.	44
Figure 2.3: Architecture mixte d'hybridation des SEE avec association active.	44
Figure 2.4: Architecture d'hybridation des SEE avec association active.	44
Figure 2.5: Configuration à deux SSE.	45
Figure 2.6: Configuration à trois SSE.	46
Figure 2.7: Convertisseur dévolteur connecté au module de batteries.	46
Figure 2.8: Convertisseur survolteur lié à la pile à combustible.	47
Figure 2.9: Convertisseur dévolteur-survolteur connecté au pack des supercondensateurs.	48
Figure 2.10: Convertisseur survolteur entrelacé.	48
Figure 2.11: Signaux de commande et courants pour un Boost entrelacé à trois canaux [45].	49
Figure 2.12: Onduleur de tension triphasé à deux niveaux.	51
Figure 2.13: Représentation d'une MSAP [51].	54
Figure 2.14: Caractéristique tension-courant d'une PEMFC [61].	58
Figure 2.15: Schéma électrique simplifié d'une pile à combustible.	60
Figure 2.16: Tension et puissance du modèle de la PAC Horizon H-100 [60].	61
Figure 2.17: Caractéristiques et niveau de maturité des différentes technologies de batteries.	62
Figure 2.18: Circuit électrique équivalent à deux constantes de temps.	65
Figure 2.9: Profil du courant de test de la batterie LFP.	66
Figure 2.20: Comparaison entre les résultats de simulation et d'expérimentation pour la batterie LFP.	67
Figure 2.21: Erreur entre le résultat expérimental et celui du modèle de simulation pour la batterie LFP.	67
Figure 2.22: Modèle de Zubieta et Bonert d'un supercondensateur.	69
Figure 2.23: Modèle retenu pour le Boost-Cap (3000F/2.7V).	70
Figure 2.24: Courant de charge/décharge du supercondensateur.	70
Figure 2.25: Comparaison entre résultats d'expérimentation et de simulations.	71

Figure 2.26: Ecart entre la tension expérimentale et celle simulée.	71
Figure 3.1: Bilan des forces exercées sur le véhicule.....	75
Figure 3.2: Volkswagen e-UP.	77
Figure 3.3: Puissance requise par le véhicule pour le cycle NEDC.	78
Figure 3.4: Autonomie en énergie requise pour le cycle NEDC.	78
Figure 3.5: Procédure de dimensionnement des unités de stockage d'énergie.....	79
Figure 3.6: Domaine de validité du dimensionnement d'une batterie.....	82
Figure 3.7: Commande vectorielle de la MSAP.....	89
Figure 3.8: Découplage des composantes d et q pour une MSAP.....	90
Figure 3.9: Résultat du contrôle de la vitesse pour la commande FOC-PI.	91
Figure 3.10: Résultat du contrôle du courant I_q pour la commande FOC-PI.	92
Figure 3.11: Résultat du contrôle du courant I_d pour la commande FOC-PI.	92
Figure 3.12: Régulateur RST sans Anti-windup.	93
Figure 3.13: Régulateur RST avec Anti-windup.	93
Figure 3.14: Résultat du contrôle de la vitesse pour la commande FOC-RST.....	95
Figure 3.15: Résultat du contrôle du courant I_q pour la commande FOC-RST.....	96
Figure 3.16: Résultat du contrôle du courant I_d pour la commande FOC-RST.....	96
Figure 3.17: Résultat du test de robustesse pour la vitesse de la MSAP.....	97
Figure 3.18: Résultat du test de robustesse pour le courant I_q	97
Figure 3.19: Résultat du test de robustesse pour le courant I_d	97
Figure 3.20: Régulateur RST pour le contrôle du courant des supercondensateurs.	98
Figure 3.21: Régulateur RST pour le contrôle du courant des batteries.....	98
Figure 3.22: Régulateur RST pour le contrôle de la tension du bus continu.....	100
Figure 4.1: Exemple de projection du diagramme de Ragone sur un axe fréquentiel [38][111].	106
Figure 4.2: Décomposition fréquentielle pour un système à deux sources d'énergie.	106
Figure 4.3: Décomposition fréquentielle pour un système à trois sources d'énergie.....	106
Figure 4.4: Stratégie du contrôle globale pour un système deux sources.....	109
Figure 4.5: Résultat du contrôle du couple pour le Cycle NEDC.	109
Figure 4.6: Résultat du contrôle de la vitesse pour le Cycle NEDC.	109
Figure 4.7: Contribution des deux sources au niveau du bus continu (Cycle NEDC).	109
Figure 4.8: Zoom sur la contribution des sources au niveau du bus continu (Cycle NEDC).....	109
Figure 4.9: Contribution en courant du pack des supercondensateurs (Cycle NEDC).	110
Figure 4.10: Contribution en courant du module des batteries (Cycle NEDC).....	110
Figure 4.11: Tension aux bornes du pack des supercondensateurs (Cycle NEDC).	110
Figure 4.12: Tension aux bornes du module des batteries (Cycle NEDC).....	110
Figure 4.13: Résultat du contrôle de la tension du bus continu (Cycle NEDC).....	110
Figure 4.14: Etat de charge du pack des supercondensateurs (Cycle NEDC).....	110
Figure 4.15: Stratégie du contrôle globale pour un système trois sources.	111
Figure 4.16: Résultat du contrôle du couple pour le cycle NEDC.	112
Figure 4.17: Résultat du contrôle de la vitesse pour le cycle FTP-75.	112
Figure 4.18: Contribution des sources au niveau du bus continu (Cycle FTP-75).....	112
Figure 4.19: Contribution en courant du pack des supercondensateurs (Cycle FTP-75).	112
Figure 4.20: Zoom sur les contributions des sources au niveau du bus continu (Cycle FTP-75).	112
Figure 4.21: Zoom sur la contribution en courant du pack des supercondensateurs (Cycle FTP-75).	112
Figure 4.22: Contribution en courant du module des batteries (Cycle FTP-75).	112
Figure 4.23: Zoom sur la contribution en courant du module des batteries (Cycle FTP-75).	112
Figure 4.24: Contribution en courant de la PAC (Cycle FTP-75).....	113

Figure 4.25: Tension aux bornes du pack des supercondensateurs (Cycle FTP-75).	113
Figure 4.26: Tension aux bornes du module des batteries (Cycle FTP-75).	113
Figure 4.27: Tension aux bornes de la PAC (Cycle FTP-75).	113
Figure 4.28: Résultat du contrôle de la tension du bus continu (Cycle FTP-75).	114
Figure 4.29: Etat de charge du pack des supercondensateurs (Cycle FTP-75).	114
Figure 4.30: Etat de charge du module des batteries (Cycle FTP-75).	114
Figure 4.31: Résultat du contrôle du couple pour le cycle WLPT.	115
Figure 4.32: Résultat du contrôle de la vitesse pour le cycle WLPT.	115
Figure 4.33: Contribution des sources au niveau du bus continu (Cycle WLPT).	115
Figure 4.34: Zoom sur les contributions des sources au niveau du bus continu (Cycle WLPT).	115
Figure 4.35: Contribution en courant du pack des supercondensateurs (Cycle WLPT).	116
Figure 4.36: Zoom sur la contribution en courant du pack des supercondensateurs (Cycle WLPT).	116
Figure 4.37: Contribution en courant du module des batteries (Cycle WLPT).	116
Figure 4.38: Zoom sur la contribution en courant du module des batteries (Cycle WLPT).	116
Figure 4.39: Contribution en courant de la PAC (Cycle WLPT).	116
Figure 4.40: Tension aux bornes de la PAC (Cycle WLPT).	116
Figure 4.41: Résultat du contrôle de la tension du bus continu (Cycle WLPT).	116
Figure 4.42: Tension aux bornes du module des batteries (Cycle WLPT).	116
Figure 4.43: Etat de charge du module des batteries (Cycle WLPT).	117
Figure 4.44: Tension aux bornes du pack des supercondensateurs (Cycle WLPT).	117
Figure 4.45: Etat de charge du pack des supercondensateurs (Cycle WLPT).	117
Figure 5.1: Banc de tests expérimentaux à échelle réduite (partie puissance).	122
Figure 5.2: Banc de test expérimental à échelle réduite (partie mesure et supervision).	123
Figure 5.3: Banc de tests expérimentaux à échelle réduite (partie contrôle et acquisition des données).	124
Figure 5.4: Courant mesuré au niveau du bus continu (charge).	125
Figure 5.5: Courant du module des batteries.	125
Figure 5.6: Tension aux bornes des batteries.	125
Figure 5.7: Courant des supercondensateurs.	125
Figure 5.8: Zoom sur le courant des supercondensateurs.	125
Figure 5.9: Tension du pack des supercondensateurs.	125
Figure 5.10: Contrôle de la tension du bus continu.	126
Figure 5.11: Courant I_q de la MSAP.	126
Figure 5.12: Zoom sur le courant I_q .	126
Figure 5.13: Courant I_d de la MSAP.	126
Figure 5.14: Courant mesuré au niveau du bus continu (charge).	128
Figure 5.15: Courant de la PAC.	128
Figure 5.16: Tension aux bornes de la PAC.	128
Figure 5.17: Courant des supercondensateurs.	128
Figure 5.18: Zoom sur le courant des supercondensateurs.	128
Figure 5.19: Tension du pack des supercondensateurs.	128
Figure 5.20: Contrôle de la tension du bus continu.	129
Figure 5.21: Courant I_q de la MSAP.	129
Figure 5.22: Zoom sur le courant I_q .	129
Figure 5.23: Courant I_d de la MSAP.	129
Figure 5.24: Courants au niveau du bus continu.	129
Figure 5.25: Courant de la PAC.	129

Figure 5.26: Zoom sur les courants au niveau du bus continu.	130
Figure 5.27: Tension aux bornes de la PAC.....	130
Figure 5.28: Courant de la charge.	130
Figure 5.29: Courant du module des batteries.....	130
Figure 5.30: Zoom sue le courant du module des batteries.....	131
Figure 5.31: Zoom sur le courant des supercondensateurs.....	131
Figure 5.32: Tension aux bornes des batteries.	131
Figure 5.33: Tension du pack des supercondensateurs.....	131
Figure 5.34: Courant des supercondensateurs.....	131
Figure 5.35: Contrôle de la tension du bus continu.....	131
Figure 5.36: Fonction de transfert du filtre de la bibliothèque de Matlab/Simulink.	133
Figure 5.37: Modèle proposé du filtre avec accès à la constante de temps.	133
Figure 5.38: Classification des paramètres : (a) logique déterministe, (b) logique floue.....	137
Figure 5.39: Approche fréquentielle adaptative avec la variation de deux constantes de temps.	139
Figure 5.40: Approche fréquentielle adaptative avec la variation d'une seule constante de temps. ...	139
Figure 5.41: Courant des batteries pour une gestion d'énergie adaptative.....	140
Figure 5.42: Courant des supercondensateurs pour une gestion d'énergie adaptative.	140
Figure 5.43: Courant de la pile à combustible pour une gestion d'énergie adaptative.....	140
Figure 5.44: Scénario choisi pour R_{Bat} et valeur du $SoHR_{Bat}$ correspondante.....	140
Figure 5.45: Contrôle de la tension du bus continu pour une gestion d'énergie adaptative.....	141
Figure 5.46: Evolution de la constate de temps en fonction du $SoHR_{Bat}$	141
Figure 5.47: Fonctions d'appartenance de la variable d'entrée SoC_{Sc}	142
Figure 5.48: Fonctions d'appartenance de la variable d'entrée I_{Bus}	142
Figure 5.49: Fonctions d'appartenance de la variable de sortie f_{Bat}	142
Figure 5.50: Evolution du SoC_{Sc} dans le cas d'une gestion d'énergie adaptative.	143
Figure 5.51: Evolution du SoC_{Sc} dans le cas d'une gestion d'énergie non-adaptative.....	143
Figure 5.52: Courant des supercondensateurs dans le cas d'une gestion d'énergie adaptative.....	143
Figure 5.53: Courant des supercondensateurs dans le cas d'une gestion d'énergie non-adaptative. ..	143
Figure 5.54: Evolution de la constate dans le cas d'une gestion d'énergie adaptative.....	143
Figure 5.55: Evolution de la constate dans le cas d'une gestion d'énergie non-adaptative.	143
Figure 5.56: Courant des batteries dans le cas d'une gestion d'énergie adaptative.	143
Figure 5.57: Courant des batteries dans le cas d'une gestion d'énergie non-adaptative.	143
Figure A. 1: Couplage MCC-MS.	149
Figure A. 2: Allure de la FEM à vide.....	150
Figure A. 3: Câblage pour le calcul des inductances L_q et L_d	150
Figure A. 4: (a) Méthode voltampèremétrique, (b) Allure du courant i	151
Figure A. 5: Allure du courant mesuré.....	152
Figure C. 1: Sollicitations du véhicule en termes de puissance pour le cycle FTP-75.....	155
Figure C. 2: Sollicitations du véhicule en termes de d'énergie en termes d'énergie pour le cycle FTP-75.....	155
Figure C. 3: Courbe de puissance pour la composante basse fréquence.	156
Figure C. 4: Courbe d'énergie pour la composante basse fréquence.	156
Figure C. 5: Courbe de puissance pour la composante moyenne fréquence.	157
Figure C. 6: Courbe d'énergie pour la composante moyenne fréquence.	157
Figure C. 7: Courbe de puissance pour la composante haute fréquence.	158
Figure C. 8: Courbe d'énergie pour la composante haute fréquence.	158

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Les trois classes du cycle WLTP [32].	38
Tableau 2. 1: Caractéristiques des différentes technologies de piles à combustibles.	57
Tableau 2. 2: Paramètres du modèle de la PEMFC Horizon H-100.	60
Tableau 2. 3: Avantages et inconvénients des différentes technologies de batteries lithium.	63
Tableau 2. 4: Coefficients des expressions du VOC(SoC) en charge et décharge.	66
Tableau 2. 5: Paramètres du modèle de la batterie LiFePO4 (SP-LFP100AHA/3.2V).	66
Tableau 2. 6: Paramètres d'une cellule de supercondensateurs Boost-Cap (3000F/2.7V).	70
Tableau 3.1: Caractéristiques techniques de la Volkswagen e-UP.	76
Tableau 3.2: Paramètres du modèle mécanique du véhicule.	78
Tableau 3.3: Paramètres de la MSAP.	90
Tableau 3.4: Paramètres de la commande vectorielle FOC-PI.	91
Tableau 3.5: Paramètres de la commande vectorielle FOC-RST.	96
Tableau 3.6: Paramètres des régulateurs RST pour le contrôle des convertisseurs DC-DC.	101
Tableau 5.1: Les différentes règles du système à logique floue.	141
Tableau C.1: Paramètres du dimensionnement du module des batteries.	157
Tableau C.2: Paramètres du dimensionnement du pack des supercondensateurs.	159

Résumé

Le travail de recherche présenté dans ce manuscrit s'inscrit dans la continuité des activités de recherche du laboratoire GREAH sur les problématiques de la gestion optimale d'énergie électrique embarqué à bord des véhicules électriques et hybrides. En effet, le couplage de plusieurs sources de natures différentes entraîne des problématiques de dimensionnement, de qualité d'énergie et de durée de vie des éléments interconnectés. Pour les applications de transport par exemple, les principaux facteurs de ces problématiques reposent sur les fluctuations de la puissance demandée par la chaîne de propulsion/traction, la durée de vie limitée des éléments de stockage d'énergie électrique, l'absence de profil de mission standard réaliste et la nécessité d'optimisation de la consommation énergétique du bord. La méthode adéquate pour l'étude des systèmes multi-sources passe par une approche systémique. Cette approche est nécessaire pour établir des modèles comportementaux des sources et des convertisseurs en vue de l'élaboration des stratégies de gestion optimale des flux énergétiques entre les organes. La contribution de ce travail de thèse repose sur l'investigation et le développement des stratégies de gestion d'énergie électrique prenant en compte les performances des sources d'énergie électrique ainsi que leur états vis-à-vis des fluctuations de puissance demandée par la chaîne de propulsion/traction qui constitue la charge principale dans un véhicule de tourisme.

Mots clés : Stratégie optimale de gestion d'énergie électrique, Véhicule électrique hybride, Système multi-sources, Approche systémique, Source d'énergie électrique, Modèle comportemental, Chaîne de propulsion/traction, Fluctuations de puissance.

Abstract

The research work presented in this document is a continuation of the GREAH laboratory research activities on the issues of optimal energy management on board of electric and hybrid electric vehicles. Indeed, the coupling of several electrical energy sources with different characteristics causes several issues like energy sources sizing, energy exchange quality and the lifetime of the interconnected elements. In the case of transport applications, the main factors of these problems are based on the high fluctuations in the power required by the propulsion/traction chain; the limited life expectancy of the electrical energy storage elements; the lack of realistic standard mission profile and the need to optimize the electric vehicles energy consumption. The appropriate method for studying the multi-sources systems is by using systemic approach. This approach is necessary to establish behavioral models of energies sources and power converters for the development of optimal energy management strategies. The contribution of this thesis is focused on the investigation and the development of energy management strategies considering the electrical energy sources performances and their state of functioning according to the power fluctuations from the propulsion/traction chain, which presents the load in a touristic vehicle.

Key words: Optimal electric energy management strategy, Hybrid electric vehicle, Multi-sources system, Systemic approach, Electrical energy source, Behavioral model, Propulsion/traction chain, Power fluctuations.

Remerciements

Les travaux de recherche présentés dans ce rapport ont été financés par la Région Normandie et l'Union Européenne. Les travaux ont été réalisés au sein du laboratoire du Groupe de Recherche en Electrotechnique et Automatique du Havre (GREAH-EA3220).

Je voudrais ici exprimer ma reconnaissance et ma gratitude à tous ceux qui ont soutenu ou contribué à ce travail ainsi que les évaluateurs. Je tiens à remercier particulièrement :

Monsieur Ali SARI, Professeur à l'Université Claude Bernard Lyon I et Monsieur Abdesslem DJERDIR Maître de conférences HDR à l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard qui m'ont fait l'honneur d'accepter la lourde tâche de rapporteurs de mon travail de thèse.

Monsieur Jean-Charles LE BUNETEL, Professeur à l'Université de Tours, Monsieur Hamid GUALOUS, Professeur à l'Université de Caen Normandie, Monsieur Octavian CUREA Professeur à l'ESTIA et Monsieur Mahamadou ABDOU TANKARI, Maître de conférences à l'Université de Paris-Est Créteil Val de Marne qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'examiner mon travail de thèse en participant au Jury de soutenance.

En outre, c'est un agréable plaisir pour moi d'exprimer mes remerciements à Monsieur Mamadou Baïlo CAMARA, Maître de conférences HDR à l'Université Le Havre Normandie qui m'a accordé le privilège de mener mes travaux de recherche sous sa direction. Il n'a ménagé ni son temps, ni son énergie et ses compétences pour m'assister de manière continue pour la réussite de mes travaux. Sa grande générosité et sa disponibilité permanente m'ont beaucoup marqué. Je lui en suis très reconnaissant.

Je suis également profondément reconnaissant envers Monsieur Brayima DAKYO, Professeur à l'Université Le Havre Normandie et co-directeur de ma thèse, pour les conseils judicieux qu'il m'a prodigués tout au long de ce travail.

J'exprime mes remerciements posthumes à Monsieur Jean-Yves PAREDE ingénieur d'études au sein du GREAH pour l'aide qu'il m'a apportée dans la réalisation des cartes de mesures et de commande du banc expérimental. 'Qu'il Repose en paix et que de Dieu lui accorde sa miséricorde'.

Je souhaite tout particulièrement exprimer ma gratitude à Monsieur Eric LEMAINS, assistant ingénieur au sein du GREAH pour son suivi permanent et ses conseils judicieux. Merci surtout de m'avoir accompagné malgré tes nombreuses occupations.

J'adresse aussi mes remerciements et ma reconnaissance à tous mes professeurs pendant mon cursus, notamment ceux de l'école nationale des sciences appliquées de Khouribga et ceux du Master CESE à l'Université Paul Sabatier Toulouse III.

J'adresse enfin mes plus vifs remerciements à ma famille et surtout à mes parents. Les mots me manquent pour exprimer toute la reconnaissance, la fierté et le profond amour que je vous porte pour les sacrifices que vous avez consenti pour ma réussite, que vous trouvez ici le témoignage de notre attachement, notre reconnaissance, gratitude et respect, que Dieu vous préserve, bonne santé et longue vie.

Introduction générale

L'utilisation des « véhicules électriques » et des « véhicules électriques hybrides » est devenue aujourd'hui une nécessité pressante. D'une part, le nombre des véhicules à base de moteur à combustion interne (ICE) ne cesse d'augmenter, par conséquent la consommation des combustibles d'origine fossile devient de plus en plus massive et la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère atteint des niveaux inquiétants. D'autre part, les combustibles fossiles se font de plus en plus rares, l'épuisement de ces ressources est donc aussi une réalité préoccupante.

Au cours des dernières décennies, la révolution industrielle a été à l'origine du rejet de grandes quantités de gaz polluants et de gaz carbonique qui a contribué à renforcer le réchauffement de notre planète à cause de « l'effet de serre » qu'il induit. Les répercussions d'un tel phénomène sont diverses, nous citons par exemple : la disparition des espèces animales et végétales, la montée des niveaux des océans, etc. Face à ces conséquences, des mesures sérieuses doivent être prises afin de maîtriser les émissions polluantes provenant principalement du secteur des transports.

Le vecteur énergétique qu'est l'électricité offre une double alternative tant à la durabilité des ressources fossiles qu'aux problèmes de certaines émissions de gaz nocifs dans l'atmosphère. L'échange d'énergie par voie électrique a atteint un niveau de maturité considérable et s'adapte bien à la majorité des activités économiques dont le domaine des transports. Cependant, une fois produite, l'électricité se stocke difficilement et elle doit être consommée presque instantanément. C'est l'une des raisons pour lesquelles en ce qui concerne le secteur des transports, malgré toutes les vertus attendues des véhicules électriques, ils sont encore limités en termes d'autonomie énergétique. Les limitations des véhicules dits « électriques » proviennent principalement de la source d'énergie embarquée. La source d'énergie utilisée repose dans la plupart des cas sur des batteries électrochimiques.

Une solution triviale pour les contraintes citées ci-dessus est de concevoir des moyens de stockage d'énergie à faible coût et permettant d'avoir une grande autonomie énergétique quelques soient les sollicitations de la chaîne de traction/propulsion du véhicule. Des efforts de recherche et des investissements considérables ont été consacrés aux technologies avancées de batteries pour les véhicules électriques [1]. Cependant, le défi majeur demeure le développement de technologies et systèmes assurant de bonnes performances en puissance de traction et une grande autonomie au véhicule à un coût compétitif.

Aujourd'hui, l'une des solutions prometteuses repose sur la conception d'un système multi-sources appelé encore système hybride d'énergie électrique. Ce type de système repose sur l'association de deux ou plusieurs sources d'énergie. Ainsi, les inconvénients d'une source peuvent être compensés par les avantages des autres et vice-versa. Un système de source d'énergie hybride est une solution importante pour étendre les distances parcourues (autonomie du véhicule) et satisfaire les besoins en puissance des véhicules électriques surtout pour les régimes transitoires (fortes accélérations, fortes décélérations et freinages) [2].

Etant donné qu'un système de source d'énergie hybride contient au moins deux sources, il est clair que ce système nécessite une méthode intelligente de prise de décisions permettant de

gérer convenablement les flux d'énergie entre les Systèmes de Stockage d'Énergie (SSE) et la charge constituée principalement de la chaîne de traction/propulsion du véhicule.

En effet, dans un système multi-sources, l'association de plusieurs sources ayant des comportements et des performances différentes les unes des autres donne lieu à diverses problématiques telles que : le dimensionnement, l'optimisation de la durée de vie et des performances des éléments interconnectés et enfin la qualité de l'énergie récupérée lors des opérations transitoires. Le comportement global d'un système multi-sources est très différent du comportement individuel des éléments qui le compose. Ainsi, la démarche pour l'étude d'un système multi-sources devra prendre en considération non seulement les comportements des sous-systèmes, mais aussi les interactions associées. Dans cette étude, nous nous intéressons aux systèmes multi-sources adoptés pour les applications de transport, plus particulièrement celles des véhicules électriques et véhicules électriques hybrides. Plusieurs facteurs sont à l'origine des problématiques dont souffre ce type de système, nous citons par exemple :

- Les fluctuations excessives de la puissance demandée par la chaîne de traction ou propulsion du véhicule. Imprévisibilité de la demande de la chaîne de traction qui dépend principalement du comportement du conducteur et de la nature de la mission à accomplir.
- L'autonomie et la durée de vie limitée des éléments de stockage d'énergie électrique.
- L'absence d'un profil de mission standardisé.

L'étude et le contrôle des systèmes multi-sources est un sujet d'actualité pour la communauté scientifique du génie électrique vu qu'à long terme, les objectifs reposent sur la nécessité de réduire ou d'éliminer l'impact des systèmes de traction/propulsion conventionnels pour les remplacer par des systèmes de traction/propulsion purement électriques. La littérature scientifique contient plusieurs travaux qui étudient l'intérêt des unités de stockage d'énergie afin d'améliorer les performances des systèmes multi-sources dédiés aux applications de transport [3][4][5][6][7].

Le progrès technologique qu'ont connu les systèmes de stockage d'énergie électrique, plus particulièrement les piles à combustibles, les batteries lithium et les supercondensateurs a fortement encouragé l'intégration des systèmes multi-sources dans les applications de transport. Les unités de stockage d'énergie (batteries et supercondensateurs) sont souvent utilisées pour assister la source d'énergie principale (par exemple pile à combustible) en compensant les variations de la demande la charge [8][9].

Face aux problématiques de gestion d'énergie multi-sources embarquée, nous nous intéressons particulièrement à la répartition des missions (puissance/énergie) entre les différentes sources embarquées. Cette répartition doit satisfaire les sollicitations de la charge et respecter diverses contraintes pour un fonctionnement optimale des sources telles que : les sollicitations en puissance pour la pile à combustible et/ou batterie à haute énergie, l'état de charge des supercondensateurs, le taux d'ondulation du courant au niveau des batteries, l'état de santé des sources embarquées, etc.

Plusieurs études ont été menées afin de concevoir des stratégies de gestion d'énergie pour des systèmes multi-sources. Nous citons la gestion d'énergie basée sur la logique floue proposée dans [10] et [11], les stratégies de gestion d'énergie prédictives traitées dans [12] et [13]. Les références [14] et [15] présentent des exemples d'utilisation des techniques des réseaux de neurones et de la programmation dynamique dans la gestion d'énergie. Plus d'approches et de détails sont disponibles dans les références [16] et [17].

Ce mémoire de thèse aborde globalement les règles de constitution des systèmes ainsi que les approches de gestion des flux énergétiques qui conduisent à des propositions de méthodes dimensionnement. Nous nous intéresserons particulièrement à la stratégie de gestion d'énergie basée sur une approche de décomposition fréquentielle des sollicitations de la charge et nous proposerons une version adaptative de cette stratégie. Le travail de recherche proposé dans ce manuscrit est organisé en cinq chapitres :

Le premier chapitre présente l'état de l'art sur les véhicules électriques/électriques hybrides et les problématiques de couplage des sources dans les systèmes multi-sources dédiés aux applications de transport.

Le deuxième chapitre introduit la modélisation des différentes composantes du système multi-sources à savoir : les modèles comportementaux des sources d'énergie électrique, les modèles des convertisseurs statiques et le modèle de la machine électrique.

Le troisième chapitre présente le dimensionnement des différentes sources d'énergie utilisées dans les exemples de systèmes multi-sources étudiés. Ce chapitre décrit aussi les commandes des différents convertisseurs statiques dédiés à la gestion des flux d'énergie et de puissance au sein des systèmes multi-sources proposés.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation de l'approche de gestion d'énergie basée sur la répartition fréquentielle de la demande de la charge. Elle sera validée par des simulations en utilisant deux configurations. La première configuration repose sur l'association d'un module de batteries avec un pack de supercondensateurs. La deuxième configuration porte sur l'association d'une pile à combustible avec un module de batteries et un pack de supercondensateurs.

Le cinquième chapitre repose sur la mise en œuvre du banc de tests et la validation expérimentale de la stratégie de gestion d'énergie basée sur l'approche fréquentielle pour les systèmes à deux et trois sources. En outre, dans ce même chapitre nous présenterons des exemples d'approches fréquentielles adaptatives appliquées à un système contenant trois sources d'énergie.

Le manuscrit se termine par des conclusions et des perspectives sur quelques pistes de recherche permettant de compléter et renforcer le présent travail.

**Chapitre 1 : Etat de l'art sur les véhicules
électriques/électriques hybrides et les problématiques de
couplage des sources d'énergie dans les applications de
transport.**

**“Rien n'est plus pratique qu'une bonne théorie”
Kurt Lewin.**

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous détaillerons les enjeux environnementaux et économiques relatifs aux véhicules électriques et aux véhicules électriques hybrides. Nous introduisons par la suite les différentes architectures de VE et VEH ainsi que les motorisations utilisées pour la traction/propulsion. En outre, nous présenterons les principales caractéristiques des sources d'énergie utilisées et les possibilités d'association de ces sources au sein d'un système multi-sources. Une attention particulière sera donnée aux paramètres affectants les performances des sources d'énergie et par conséquent les performances du système multi-sources global. En fait, c'est le choix de ces critères qui définit la complexité et la finalité de la stratégie de gestion d'énergie à implémenter. Le choix des critères est déterminant pour la modélisation de l'ensemble des sous-systèmes et plus particulièrement la précision souhaitée dans la modélisation des batteries et des supercondensateurs qui présentent généralement des phénomènes électriques et thermiques complexes.

Avant d'entamer les différentes définitions relatives aux systèmes multi-sources ainsi que l'hybridation des éléments de stockage d'énergie électrique. Il est important de signaler que pour cette étude, nous nous intéressons au transport routier et plus particulièrement aux véhicules à usage particulier. De manière générale, un système constitué de plusieurs éléments de nature différente est qualifié de système hybride. Cependant il ne faut pas confondre l'hybridation des sources d'énergie électrique et l'hybridation des chaînes de traction/propulsion.

Un véhicule électrique hybride est un véhicule qui associe une source d'énergie fossile et une source d'énergie de nature électrique. Cependant le stockage de l'énergie électrique peut être réalisé au moyen de plusieurs sources électriques. Dans ce type de véhicule, nous avons une hybridation des chaînes de traction, c'est la raison pour laquelle ils sont qualifiés de véhicules électriques hybrides. Un véhicule purement électrique contient une chaîne de traction basée sur l'énergie électrique même si cette dernière est assurée par plusieurs sources de nature électrique différente, dans ce cas, nous parlons d'hybridation des sources d'énergie électrique. Ce type de véhicule est appelé ici 'Véhicule Electrique'. Dans ce qui suit, nous qualifions de véhicule électrique, le véhicule qui utilise une ou plusieurs sources de nature électrique différente y compris les piles à combustible. Un véhicule électrique hybride est défini comme étant le véhicule pour lequel la traction/propulsion est assurée par deux sources de nature différentes (fossile et électrique). Le véhicule thermique utilise une source basée sur les carburants fossiles.

1.2 Enjeux des véhicules électriques et des véhicules électriques hybrides

La présentation des différents enjeux des véhicules électriques et hybrides exige une étude préalable de la consommation énergétique du secteur des transports et de ces émissions polluantes [18]. Selon un rapport du ministère de la transition écologique et solidaire [19], les gaz à effet de serre (GES) contribuant au réchauffement climatique de notre planète sont principalement produits via la combustion des carburants au niveau des véhicules à moteur utilisant une énergie d'origine fossile. D'après les dernières statistiques, le secteur des transports est de loin le secteur le plus polluant. Comme cela est indiqué par les figures 1.1 et 1.2, en 2015 et 2016 le secteur des transports a contribué à 29% des émissions de GES ce qui

lui confère la tête du classement. Nous déduisons aussi que le secteur des transports détient une partie significative de la consommation d'énergie en France et dans le monde.

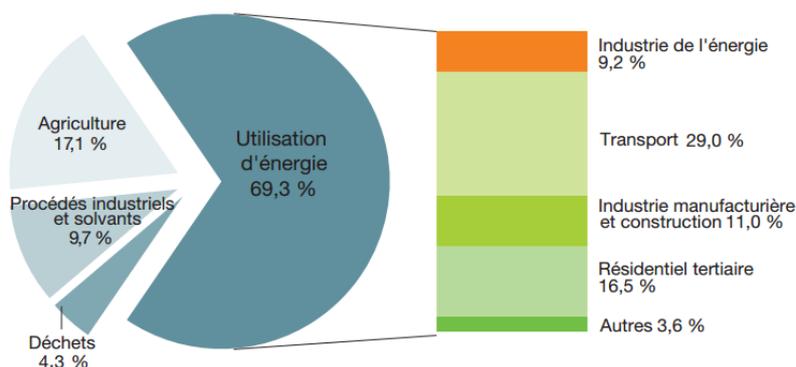


Figure 1.1: Répartition des émissions de GES par source en France en 2015 [18][19].

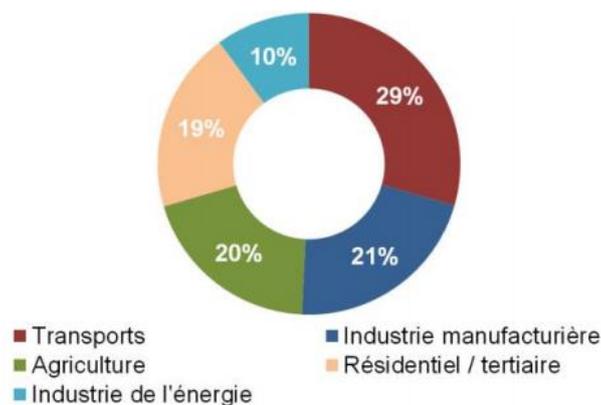


Figure 1.2: Répartition des GES en 2016 [18][19].

Parmi tous les moyens de transport connu, l'enjeu est particulièrement important pour le transport routier ou les émissions de gaz à effet de serre dépassent les 90% des émissions du secteur des transports, ceci malgré le développement en performances qu'a connu l'industrie automobile durant les dernières décennies. La figure 1.3 présente les émissions des GES en Mégatonne CO₂ équivalent pour différents moyens de transport.

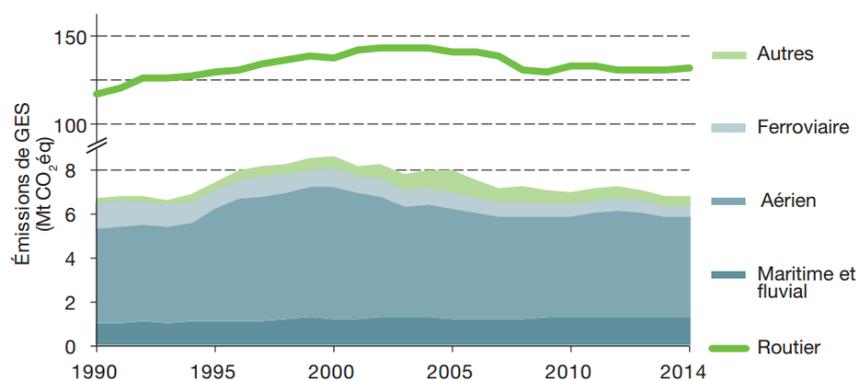


Figure 1.3: Émissions de GES du secteur des transports en France.

La figure 1.4 montre l'évolution de la température en France entre 1900 et 2015, il est clair que la température a augmenté d'environ 2°C, cela montre que le changement climatique est une réalité et que des mesures sérieuses doivent être prises afin de limiter ce fléau. Pour la France comme pour l'union européenne, la lutte contre le réchauffement climatique est devenu une priorité gouvernementale. L'union européenne s'est engagée dans cette perspective en se fixant trois principaux objectifs à l'horizon de 2030 [20]:

- 1) La réduction des émissions des GES de 40% par rapport au niveau de l'année 1990.
- 2) L'augmentation de 27% de la part des énergies renouvelables dans la consommation énergétique finale brute.
- 3) L'augmentation de 27% de l'efficacité énergétique.

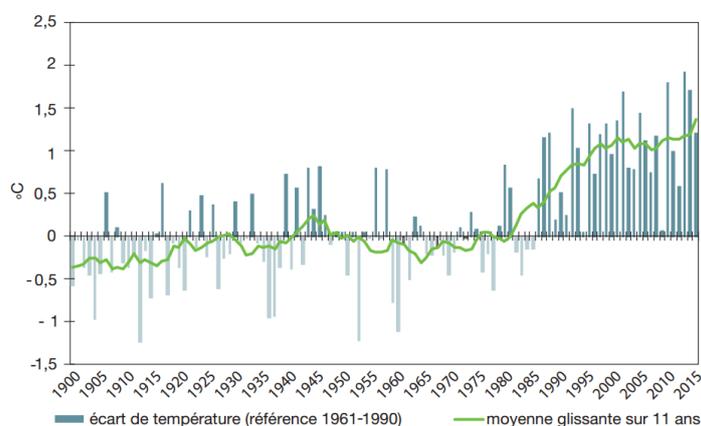


Figure 1.4: Evolution de la température en France entre 1900 et 2015.

Au niveau mondial, le secteur le plus polluant est le secteur de la production d'électricité avec 40% des émissions dues principalement à la combustion d'énergie d'origine fossile, vient ensuite le secteur des transports avec 23% et le secteur de l'industrie avec 19%. Dans l'union européenne, les transports sont responsables de 28% des émissions, ce qui dépasse la moyenne par secteur.

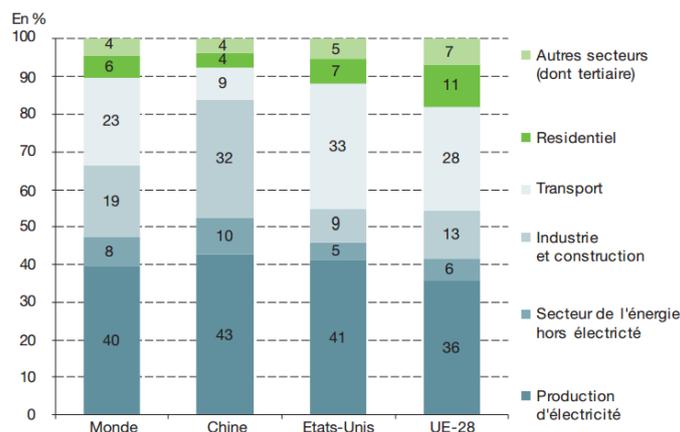


Figure 1.5: Répartition sectorielle des émissions du CO2 dans le monde en 2016.

Au niveau de l'union européenne, le secteur le plus polluant est le secteur de production d'électricité, tandis que le secteur des transports est le principal contributeur aux émissions des GES en France. Au contraire de la moyenne du continent européen le secteur de production de l'énergie est peu polluant (9%) en raison de la production électrique nucléaire. Les voitures à usage particulier détiennent plus que 50% des émissions des GES. La contribution du secteur de transport au niveau des émissions des GES est de plus en plus significative cela est dû à l'augmentation du nombre des kilomètres parcourus.

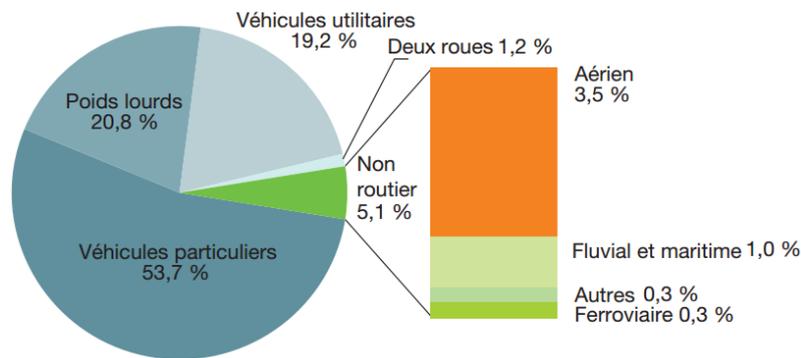


Figure 1.6: Emissions de GES des transports dans l'union européenne en 2016.

1.3 Solutions envisageables et leurs limites

Les différents rapports et les différentes études statistiques montrent que le secteur des transports détient une partie significative de la consommation d'énergie fossile et par conséquent il contribue considérablement aux émissions des GES. L'une des solutions consiste à limiter l'impact du secteur des transports en termes de consommation énergétique d'origine fossile et des émissions néfastes vis-à-vis de l'environnement. Un grand intérêt doit être porté sur le transport routier et particulièrement les véhicules à usage particulier. L'union européenne a mis en place des mesures pour lutter contre les émissions polluantes, une des dernières mesures était la norme Euro 6. La version Euro 6c de cette norme est entrée en vigueur le 1^{er} septembre 2018, elle impose une réduction d'environ 50% des émissions d'oxydes d'azote des véhicules Diesel par rapport à la norme 5 [18]. Cependant ces normes ne sont pas en mesure de baisser les émissions polluantes car le nombre des véhicules utilisés est de plus en plus important, en outre les kilomètres parcourus ne cessent d'augmenter.

L'une des solutions les plus prometteuses en ce moment consiste à remplacer les véhicules conventionnels par des véhicules électriques ou des véhicules électriques hybrides. Le développement de cette alternative doit faire face aux limitations intrinsèques (autonomie et puissance) liées aux sources d'énergies embarquées (principalement les batteries). L'accroissement de la pollution atmosphérique ainsi que la raréfaction des ressources pétrolières sont des facteurs qui favorisent le déclin du transport routier classique. En fait, les émissions polluantes du secteur des transports résultent de la consommation des carburants d'origine fossile. Réduire les émissions polluantes revient donc à baisser la dépendance du secteur des transports aux carburants fossiles. Pour cela différentes solutions alternatives sont envisageables.

1.3.1 Première solution : Optimisation de la chaîne de traction thermique

La première solution prévisible consiste à améliorer l'existant dans le but de réaliser des voitures thermiques moins gourmandes en carburant. Plusieurs techniques sont utilisées à savoir : l'optimisation des moteurs thermiques à essence /diesel, la production des carburants ultra-propres (Biocarburants), l'optimisation aérodynamique du véhicule (diminution de la résistance à l'avancement), etc. Ces améliorations ne seront probablement pas suffisantes pour compenser la quantité des émissions polluantes. D'autant plus que les besoins des conducteurs en termes de puissance, d'autonomie énergétique pour parcourir plus de kilomètres et de confort sont en évolution constante.

1.3.2 Seconde solution : les véhicules électriques hybrides

L'association d'une chaîne de traction/propulsion électrique et d'une chaîne de traction/propulsion à base de moteur thermique a donné naissance aux véhicules électriques hybrides (VEHs). Le but étant de combiner les avantages des deux chaînes de traction/propulsion afin de minimiser les émissions polluantes tout en gardant les mêmes performances en termes d'autonomie énergétique. Ce type de véhicules contient deux sources d'énergie : un réservoir de carburant alimentant le moteur thermique et une source d'énergie électrique alimentant le moteur électrique. En comparaison avec les véhicules conventionnels, les VEHs se caractérisent par un bon rendement énergétique et de faibles émissions polluantes, c'est la raison pour laquelle leur acceptation sur le marché des véhicules propres est plus significative que les véhicules tout électrique.

La traction d'un VEH peut se faire suivant les trois modes ci-dessous :

- Mode de traction tout thermique, où seule la chaîne de traction thermique assure l'avancement du véhicule. Le moteur électrique ne fonctionne pas.
- Mode de traction hybride, où les deux chaînes de traction participent à l'avancement du véhicule.
- Mode de traction tout électrique, où seule la chaîne de traction électrique assure l'avancement du véhicule. Le moteur thermique est à l'arrêt.

La recharge de l'unité de stockage d'énergie qui repose généralement sur des batteries se fait également selon trois modes :

- Mode de recharge tout thermique, où seule la chaîne de traction thermique assure l'avancement du véhicule et la recharge de l'unité de stockage.
- Mode de recharge tout électrique, où le moteur électrique fonctionne en génératrice lors des opérations de freinages ou de décélérations.
- Mode de recharge hybride. Ce mode réunit les deux modes de recharge cités ci-dessus.

Dans les prochains paragraphes, nous présenterons les types et les caractéristiques des véhicules électriques hybrides.

1.3.3 Troisième solution : Les véhicules électriques

Les véhicules électriques constituent une bonne alternative aux véhicules conventionnels vu que leur chaîne de traction n'utilise pas les carburants fossiles. Cependant, le bilan des émissions polluantes dépend du moyen de production de l'énergie stockée dans les sources d'énergie embarquées à bord du VE (Véhicule Electrique). Les caractéristiques, les avantages et les inconvénients des VEs seront discutés dans les sections ci-dessous.

Dans la majorité des cas, les VEs sont alimentés par des batteries qui constituent actuellement l'un des points faibles des VEs à cause de leur limitation intrinsèque en termes d'autonomie énergétique et de puissance. A cette problématique d'autonomie énergétique s'ajoutent les problématiques de recharge rapide (densité de puissance), le prix élevé des VEs dû au coût des batteries et des installations de recharge et finalement le poids de la source d'énergie électrique.

Un autre point critique pour les VE est en relation avec les fortes sollicitations auxquelles sont exposées les batteries. En effet, la traction/propulsion du véhicule (généralement lié au comportement du conducteur) expose les batteries à des pics de puissance répétitifs et à un grand nombre de microcycles de charge/décharge ce qui réduit considérablement leur durée de vie.

Les véhicules à base de pile à combustible (PAC) constituent une solution envisageable car à l'aide d'un réservoir de dihydrogène (H_2), l'électricité peut être produite à bord du véhicule sans émissions polluantes. Néanmoins, une PAC associée à un réservoir de dihydrogène constitue une source d'énergie avec une dynamique proche de celle des batteries (la densité de puissance des PACs est généralement inférieure à celle des batteries). Cependant, les PACs sont vulnérables aux pics des puissances, ajouté à cela le faible rendement de conversion d'énergie, les problématiques liées au prix, à l'approvisionnement (station de distribution du H_2) et au stockage du H_2 à bord du véhicule. Il faut aussi noter qu'une PAC est toujours accompagnée des accessoires nécessaires à son bon fonctionnement (circuit de refroidissement, compresseur, etc.) cela implique plus de poids et d'encombrement et plus de mesures de sécurité.

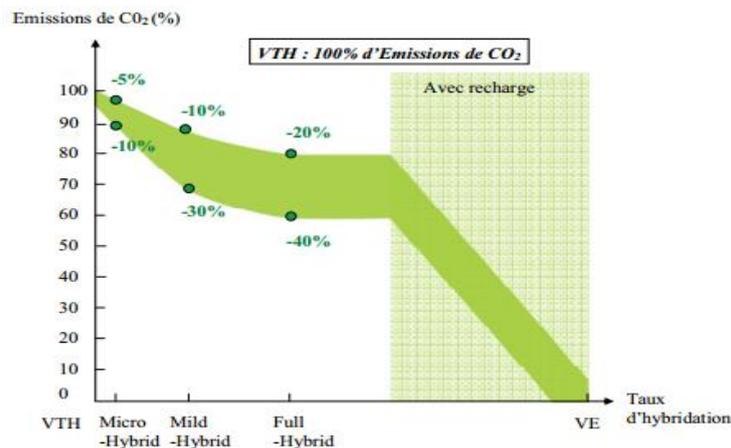


Figure 1.7: Réduction des émissions en CO₂ pour les VEHs et les VEs [21].

Les VEHs semblent être une bonne solution alternative aux véhicules conventionnels, néanmoins et dans le cas le plus favorable, les émissions polluantes n'ont diminué que de 40% dans le cas des Full Hybrid (Figure 1.7). Les VEHs diminuent l'impact des véhicules thermiques sur l'environnement, mais ils ne permettent pas de briser la dépendance aux carburants fossiles.

En guise de conclusion de cette section, la solution la plus adéquate aux problèmes environnementaux liés au secteur des transports consiste à remplacer les véhicules conventionnels par des véhicules électriques. Les véhicules électriques hybrides ont fait leurs preuves en termes de réduction d'émissions de CO₂. Cependant, ils ne résoudront pas la problématique de pollution dans sa totalité. Les VE constituent aujourd'hui une piste de solution prometteuse pour pallier aux limitations des VEHs dans la réduction des émissions des GES. Cette solution deviendra une réalité si les chercheurs et constructeurs arrivent à trouver une solution d'amélioration de l'autonomie des sources et développer des stratégies optimales de gestion d'énergie.

1.4 Historique des véhicules électriques

Aux alentours de 1830, Robert Anderson un homme d'affaires écossais a inventé la première voiture électrique, il s'agissait plutôt d'une carriole électrique. Vers 1834, Thomas Davenport de Brandon construit une petite locomotive électrique qui a peine fait un court trajet. Trois ans plus tard, l'écossais Robert Davidson construit un modèle similaire avec une vitesse maximale de 6 km/h. Jusqu'à lors les batteries rechargeables n'étaient pas encore inventées. Pour que les véhicules électriques prennent leur essor, il fallait attendre l'année 1859 où le français Gaston Planté invente la batterie rechargeable au plomb acide. Elle sera améliorée par Camille Faure vers 1881. En 1897, la ville de New-York a été équipée des premiers taxis électriques. La première voiture électrique à dépasser les 100 km/h était construite par une société belge, elle était baptisée 'la jamais contente' et elle avait la forme d'une torpille (Figure 1.8).



Figure 1.8: La jamais contente.

Dans les années 1900, les voitures électriques connaissent un développement remarquable, plus d'un tiers des véhicules en circulation sont électriques. Mais ce développement ne va pas durer longtemps, les voitures électriques sont beaucoup plus chères que leur homologue à moteur thermique. En effet leur autonomie n'est pas satisfaisante et leur vitesse reste relativement basse, sans oublier le prix et la disponibilité du pétrole en comparaison avec l'électricité. Pendant près de 60 ans, les seuls véhicules électriques vendus étaient des voiturettes de golf et des véhicules de livraison.

A partir des années 80, et plus précisément après les deux premiers chocs pétroliers respectivement en 1973 et 1979. L'opinion publique est en faveur des véhicules électriques vu que les voitures conventionnelles se trouvent dans une situation critique due à leur totale dépendance vis-à-vis du pétrole ainsi que leur grande contribution à l'accroissement de l'effet de serre et à l'augmentation de la pollution atmosphérique. Plusieurs fonds de recherche ont été lancés pour favoriser la construction des véhicules propres. Cependant, malgré les progrès de la technologie des batteries et de l'électronique de puissance, les performances des VEs ne sont pas en mesure de défier les véhicules à moteur thermique.

Le vrai intérêt pour les VEs a commencé à partir des années 1990, avec la sortie de l'EV1 réalisée par GM et la 106 électrique développée par PSA. Bien que ces véhicules représentent une réelle réussite en particulier par rapport aux premières réalisations, il est apparu par la suite que ces véhicules ne pouvaient pas rivaliser avec les voitures à moteur thermique.

Malgré tous ces handicaps, les constructeurs des VEs n'ont cessé d'améliorer leurs produits surtout en termes d'autonomie énergétique. Une des alternatives ayant obtenu une grande visibilité sur le marché automobile était la Toyota Prius, la première voiture électrique hybride. Aujourd'hui, le véhicule 100% électrique commence à prendre de l'ampleur avec une autonomie et une puissance en évolution permanente, les constructeurs offrent des produits de plus en plus intéressants et les bornes de recharges sont de plus en plus nombreuses.

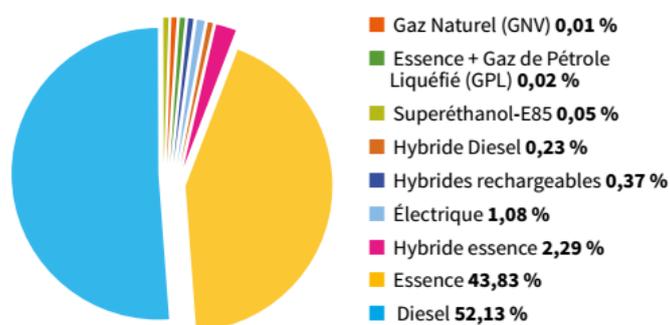


Figure 1.9: Répartition des ventes des voitures en France pour l'année 2016 [22].

En 2016, 21 826 véhicules électriques ont été vendus en France, tandis que 17268 véhicules électriques ont été vendus en 2015. En 2016, le marché des véhicules électriques a été dynamique avec une augmentation des ventes de 26% par rapport à 2015. La figure 1.9 illustre la répartition des ventes des voitures en France pour l'année 2016.

1.5 Principales configurations des VEs et VEHs

Conformément au type d'énergie embarqué au bord du véhicule, nous distinguons trois grandes catégories : le véhicule électrique hybride, le véhicule purement électrique et le véhicule électrique à pile à combustible. Dans les prochains paragraphes, nous exposons les principales architectures et caractéristiques de ces trois familles de véhicules.

1.5.1 Architectures des véhicules électriques hybrides

Nous parlons de véhicule électrique hybride lorsque nous avons l'association d'un moteur à combustion interne avec une machine électrique connectée à une unité de stockage d'énergie ou plus. Lorsqu'un véhicule est équipé de plusieurs unités de stockage d'énergie électrique alors que la traction (ou propulsion) est assurée seulement par une machine électrique, dans ce cas il ne s'agit pas d'un véhicule électrique hybride mais d'un véhicule électrique avec hybridation des sources d'énergie électrique. Pour les véhicules électriques hybrides, nous distinguons trois types d'architectures : série, parallèle et combinée. Les architectures série et parallèle sont différenciées par le point de jonction des différentes chaînes de traction communément appelé 'nœud'. Dans l'architecture série, le nœud est électrique alors qu'il est de nature mécanique pour l'architecture parallèle.

1.5.2 Architecture hybride série

Un véhicule doté d'une architecture hybride série se compose d'un moteur à combustion interne, une génératrice, une unité de stockage d'énergie électrique (généralement un pack de batteries, un pack de supercondensateurs ou un volant d'inertie) et deux convertisseurs DC-

AC. Eventuellement, l'élément de stockage d'énergie peut être interfacé par un convertisseur DC-DC ou liée directement au bus continu. Dans l'architecture hybride série, le moteur à combustion interne entraîne une génératrice qui débite à la fois sur une source auxiliaire (généralement une batterie) et sur le moteur électrique de traction via un onduleur. Seul le moteur électrique participe à l'entraînement du véhicule. La source auxiliaire est utilisée pendant les opérations de démarrage et de freinage. En plus, si elle est suffisamment dimensionnée, elle peut être également utilisée en zone urbaine afin de limiter les émissions polluantes. Pour les longues distances nécessitant plus d'autonomie énergétique, c'est le moteur thermique qui prend le relais, cependant la source auxiliaire peut toujours intervenir lors des demandes de puissance transitoire. Enfin, le moteur à combustion interne n'est pas connecté directement à la transmission mécanique, cela offre une utilisation plus optimale de ses capacités, néanmoins les multiples étages de conversion d'énergie peuvent impacter le rendement de l'architecture. La disposition des composants dans une architecture hybride série est illustrée par la figure 1.10.

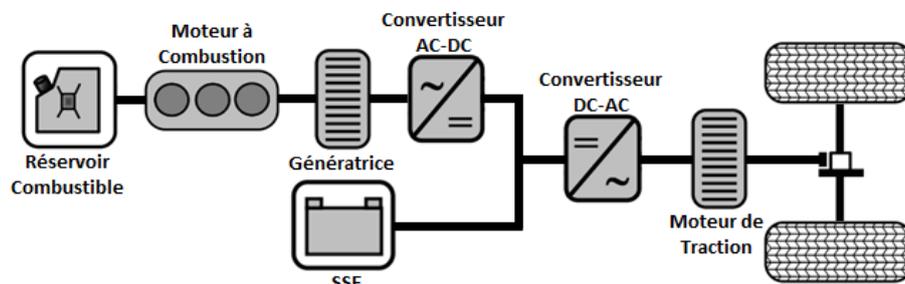


Figure 1.10: Architecture hybride série.

Avantages de l'architecture hybride série :

- ✓ Une plus grande autonomie et une puissance plus élevée par rapport au véhicule thermique.
- ✓ Une gestion d'énergie plus optimale en présence des deux modes de traction (thermique et électrique).
- ✓ Le moteur à combustion interne n'est pas dimensionné pour la puissance maximale.

Inconvénients de l'architecture hybride série :

- Le système de motorisation est plus important (plus d'encombrement, un coût plus élevé).
- Plusieurs étages de conversions d'énergie ce qui entraîne plus de pertes.
- La chaîne de traction électrique doit être dimensionnée pour la puissance maximale du véhicule.

1.5.3 Architecture hybride parallèle

A la différence de l'architecture série et grâce au couplage mécanique des deux sources d'énergie, l'architecture hybride parallèle permet aux deux moteurs (thermique et électrique) de participer simultanément ou séparément à l'entraînement du véhicule. Généralement, c'est le moteur à combustion interne qui entraîne le véhicule. Grâce à son couple élevé, le moteur électrique assiste le moteur thermique pendant les phases des démarrages et des reprises. Lors des fortes décélérations et des freinages, la machine électrique fonctionne en génératrice et

transforme l'énergie cinétique des roues en énergie électrique, cette énergie est stockée dans les batteries. Les phases de fonctionnement en mode tout électrique sont restreintes aux vitesses réduites (dans les zones urbaines par exemple). La disposition des composants dans une architecture hybride parallèle est schématisée par la figure 1.11.

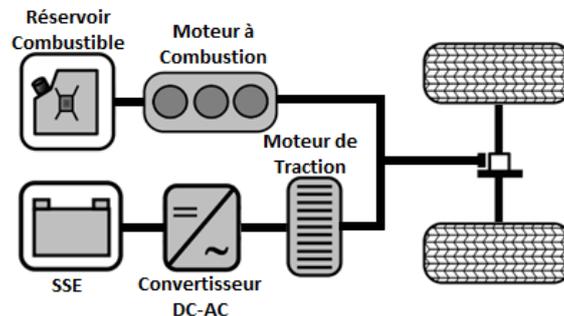


Figure 1.11: Architecture hybride parallèle.

Avantages de l'architecture hybride parallèle :

- ✓ Une autonomie comparable à celle du véhicule thermique.
- ✓ Un taux d'émission nul en mode de traction électrique.

Inconvénients de l'architecture hybride parallèle :

- Le poids et l'encombrement sont élevés à cause du système de motorisation.
- Un coût plus élevé en comparaison avec les véhicules conventionnels de même puissance.

1.5.4 Architecture hybride combinée

Cette solution est aussi appelée architecture à hybridation de puissance ou architecture série-parallèle. Afin de profiter des avantages et d'éliminer les inconvénients des deux architectures présentées précédemment, les fabricants des véhicules électriques hybrides ont eu l'idée de combiner les deux configurations série et parallèle surtout pour les véhicules routiers à usage particulier. Sur le principe de fonctionnement, elle est presque identique à la solution hybride parallèle, sauf que la puissance délivrée par le moteur thermique peut emprunter trois chemins différents : l'entraînement mécanique direct du véhicule, la recharge de la source d'énergie électrique ou les deux. Les principaux constructeurs des véhicules électriques hybrides adoptent l'architecture hybride combinée (Toyota Prius, Chevrolet Volt, etc.). La disposition des composants dans une architecture hybride combinée est illustrée par la figure 1.12.

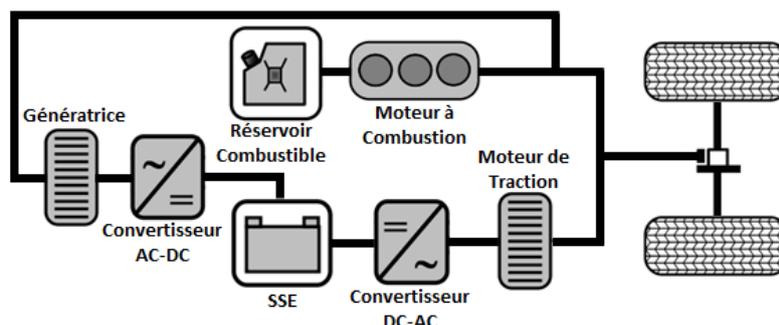


Figure 1.12: Architecture hybride combinée.

Avantages de l'architecture hybride combinée :

- ✓ Une plus grande autonomie.
- ✓ Il s'agit des voitures les plus vendues, elles concurrencent les véhicules à moteur thermique.
- ✓ Ce type d'architecture est moins polluant en comparaison avec les véhicules conventionnels.

Inconvénients de l'architecture hybride combinée :

- La grande complexité du groupe motopropulseur.
- Le poids et le coût élevé.

1.6 Degré d'hybridation dans les VEHS

En plus de la classification selon l'architecture du système de traction (architecture série, parallèle ou combinée), les véhicules électriques hybrides peuvent être classés suivant leur degré d'hybridation [21][23]. Ce classement contient trois catégories :

1.6.1 Véhicules micro hybrides « micro hybrid »

Il s'agit des véhicules qui utilisent le système stop/star, le système de gestion d'énergie au sein de ces voitures éteint automatiquement le moteur à combustion interne lors des arrêts. Le redémarrage automatique se fait à l'aide de la batterie, l'hybridation n'est pas très effective dans ce type de véhicules, d'où le nom « micro hybrid ». Une « micro hybrid » est une solution intéressante notamment dans les zones urbaines où les arrêts sont très fréquents. La C3 développée par Citroën est un exemple de ce type de véhicule. La puissance du moteur électrique dans ce type de véhicule est de 3 à 5 kW.

1.6.2 Véhicules semi-hybrides « mild hybrid »

Dans ce type de véhicule, la contribution de la chaîne de traction électrique est beaucoup plus effective que les « micro hybrid ». Le moteur électrique généralement sous dimensionné permet d'assister le moteur de combustion interne pendant les phases de traction. En comparaison avec les véhicules conventionnels, l'économie de carburant est bien concrète vu que le moteur thermique n'a pas besoin de fournir la totalité de l'énergie. La recharge de la source auxiliaire (batteries) se fait généralement lors des fortes décélérations ou des freinages, néanmoins le moteur thermique peut aussi recharger la source auxiliaire. Il faut noter que dans un véhicule « mild hybrid », le moteur électrique n'est pas en mesure de propulser le véhicule tout seul, sa fonction consiste à assister le moteur thermique. Parmi les avantages de ce type de véhicule, nous citons le poids et le volume de la source auxiliaire qui reste raisonnable vu que la chaîne de traction électrique ne peut pas fonctionner individuellement. La Honda Insight et la Honda Civic sont des exemples de véhicules « mild hybrid ». La puissance du moteur électrique dans ce type de véhicule varie entre 10 et 20 kW.

1.6.3 Véhicules hybrides complets « full hybrid »

La principale caractéristique d'un « full hybrid » est que le moteur électrique est suffisamment dimensionné pour tracter ou propulser individuellement le véhicule (suivant

l'autonomie de la source d'énergie embarquée). Cette architecture est très utile surtout dans les zones urbaines où le véhicule peut rouler en mode électrique à faible vitesse. Si l'état de charge de l'unité de stockage est faible, le moteur thermique prend le relais et la recharge. L'exemple le plus populaire du « full hybrid » est la Toyota Prius. La puissance du moteur électrique dans ce type de véhicule varie entre 30 et 50 kW.

1.6.4 Les véhicules purement électriques

La motorisation des véhicules tout électrique est assurée par un ou plusieurs machines (cas des moteurs-roues) électriques exclusivement alimentées par des sources d'énergie électriques. Depuis, les premières réalisations des véhicules électriques, le frein essentiel à leur développement a été et reste encore aujourd'hui lié aux faibles performances des accumulateurs électrochimiques dont l'énergie et la puissance massique sont largement faible en comparaison avec les carburants d'origine fossile. L'architecture des véhicules tout électriques est illustrée par la figure 1.13.

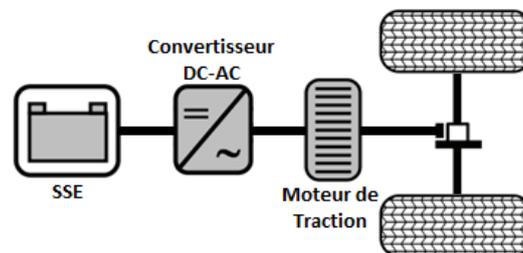


Figure 1.13: Architecture tout électrique.

Avantages de l'architecture tout électrique :

- ✓ Absence des émissions polluantes.
- ✓ Absence du bruit.
- ✓ La chaîne de traction est réversible et permet la récupération de l'énergie électrique pendant les freinages et les décélérations.
- ✓ Une utilisation et une conduite plus commode.

Inconvénients de l'architecture tout électrique :

- Autonomie limitée en comparaison avec les véhicules à moteur thermique.
- Les faibles performances des sources d'énergie électriques embarquées surtout en termes de densité de puissance.
- Un coût d'achat relativement élevé.
- Absence des infrastructures de recharge.
- Une masse trop élevée et une durée de vie limitée pour les accumulateurs.
- Une longue durée de recharge.

1.6.5 Les véhicules électriques à pile à combustible

Ce type de véhicule entre dans la catégorie des véhicules hybrides série. Comme pour le véhicule à architecture hybride série le point de jonction de la chaîne de traction est électrique, c'est-à-dire que la puissance de traction est fournie aux roues par l'intermédiaire d'un moteur électrique. Cependant, le système d'alimentation en énergie électrique est

différent. En plus d'une source auxiliaire (généralement un module de batteries ou un pack de supercondensateurs), la pile à combustible joue le rôle de source principale, elle génère l'énergie électrique à partir de l'hydrogène stocké dans le réservoir du véhicule. La structure du véhicule électrique à pile à combustible est présentée dans la figure 1.14.

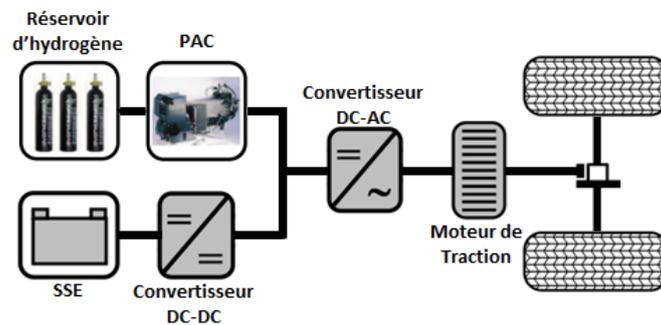


Figure 1.14: Structure d'un véhicule électrique à pile à combustible.

1.7 Moteur électrique pour la traction des VEs et des VEHS

1.7.1 Caractéristiques des moteurs utilisés dans les VEs et VEHS

Les machines électriques utilisées dans les VEs et les VEHS doivent respecter certaines exigences afin de bien assurer la traction/propulsion du véhicule durant le cycle de mission [24][25][26] :

- ✓ Le moteur électrique doit être en mesure d'assurer un couple élevé à faible ondulations sur la totalité de la plage de vitesse.
- ✓ Le moteur électrique doit bénéficier d'une densité de puissance élevée afin de réduire le poids et l'encombrement du véhicule.
- ✓ La dynamique du couple doit être rapide afin de répondre aux différentes sollicitations.
- ✓ Un rendement élevé afin d'étendre l'autonomie du véhicule.
- ✓ Un faible bruit acoustique et des vibrations mécaniques réduites.
- ✓ Le moteur électrique doit permettre une utilisation fiable et sécurisée (tolérance aux défauts).
- ✓ Un coût abordable.
- ✓ Le moteur électrique peut fonctionner dans les quatre quadrants.
- ✓ La possibilité d'intégration au niveau des roues.

1.7.2 Types de moteurs utilisés dans la traction/propulsion électrique

Les performances en couple et en rendement diffèrent selon le type du moteur électrique utilisé ainsi que la stratégie de contrôle adoptée. Dans les applications embarquées de type véhicule électrique, le moteur électrique doit répondre aux besoins du conducteur en termes de vitesse, de puissance et d'autonomie tout en surmontant les différentes forces résistives auxquelles est soumis le véhicule. Dans les prochains paragraphes, nous présenterons les types ainsi que les caractéristiques des moteurs électriques utilisés dans les VEs. Les trois types de machines électriques les plus utilisés dans les véhicules électriques actuels sont : les machines à réluctance commutée, les machines asynchrones et les machines synchrones [27].

1.7.2.1 Les machines à réluctance variable (MRV)

Les machines à réluctance variable ont une structure simple et robuste avec une densité de puissance élevée. Leur contrôle est relativement aisé mais nécessite une topologie spéciale du convertisseur. Elles permettent un fonctionnement en mode dégradé et possèdent des caractéristiques couple-vitesse intéressantes. Le principal inconvénient de ce type de machine provient du bruit généré par les ondulations du couple. Ces ondulations sont plus accrues à vitesse élevée et constituent un handicap pour une utilisation dans les systèmes embarqués [27].

1.7.2.2 Les machines asynchrones (MAS)

Les machines asynchrones aussi appelées machine à induction possèdent un niveau de maturité inégalée, il s'agit du type de moteur le plus utilisé dans l'industrie. En plus de la très bonne fiabilité de ces moteurs, ils sont connus par leur robustesse et leur faible besoin en maintenance, le coût du moteur asynchrone à cage d'écureuil est très abordable. Cependant, dans les applications des véhicules électriques, les MAS présentent un faible couple massique, le rendement est détérioré à cause de la présence des pertes joules au niveau du rotor. Le facteur d'utilisation de l'onduleur est faible et son contrôle est relativement complexe. La réversibilité de la MAS n'est possible que pendant le régime hyper-synchrone.

1.7.2.3 Les machines synchrones (MS)

Il existe deux types de machines synchrones : les machines synchrones à rotors bobinés (MSRB) et les moteurs synchrones à aimants permanents (MSAP). Dans une MSRB, le flux inducteur peut être facilement réglé, cela permet de diminuer le flux d'excitation et ainsi augmenter la plage de vitesse de la machine. Pourtant, les applications moteur-roue pour ce type de moteur sont limitées à cause des contacts tournants nécessaires à l'alimentation du rotor. Au contraire de la MSRB, la MSAP contient des aimants permanents au niveau du rotor ce qui lui procure un couple élevé sur une gamme de vitesse étendue et un bon rendement énergétique. Si les aimants ont une forte densité d'énergie, le moteur peut fournir un couple massique élevé, le poids et le volume sont ainsi réduits. Les inconvénients des MSAP sont principalement liés aux aimants permanents, ces derniers ont un coût élevé et souffrent de la démagnétisation à température élevée. En comparaison avec les MAS, le coût du processus de fabrication est élevé, la commande est relativement complexe surtout en ce qui concerne le défluxage. Suivant la position des aimants permanents, les MSAP sont classés selon trois catégories : les MSAP à aimants permanents montés en surface du rotor (Surface Mounted PMSM) ; les MSAP à aimants permanents insérés au rotor (Insert PMSM) et les MSAP à aimants permanents enterrés dans le rotor (Interior PMSM) [27].

Pour notre étude nous retiendrons la machine synchrone à aimants permanents car c'est le type de machine le plus utilisée pour les applications VEs et VEHs. Ce type de machine possède de meilleures performances pour les applications véhicules électriques à savoir : un très bon rendement, un couple élevé sur une large plage de vitesse, une densité de puissance élevée, un fonctionnement sur les quatre quadrants et des faibles vibrations. En outre, plusieurs constructeurs de VEs l'utilisent comme moteur de traction/propulsion à savoir : Volkswagen, Fiat, Ford, Nissan, etc.

1.8 Hybridation des SEE (Systèmes multi-sources)

Dans cette partie, nous comparerons les différentes sources d'énergie électrique utilisées dans les applications embarquées. A l'issue de cette comparaison, nous présenterons les potentiels d'hybridation de ces sources pour les applications VE.

Une source électrique ayant une grande densité de puissance et d'énergie reste le défi majeur que rencontrent les constructeurs des véhicules électriques. Bien que le vecteur énergie électrique ait atteint un grand niveau de maturité, le stockage de cette énergie est une tâche compliquée. Dans la majorité des cas, l'énergie électrique ne se stocke pas directement, il faut la transformer en une autre forme d'énergie stockable puis effectuer la transformation inverse lorsque l'on désire l'utiliser. Les formes d'énergie stockable ont donné naissance à plusieurs types de sources à savoir : les batteries, les PACs associés à l'Hydrogène (énergie électrochimique), les supercondensateurs (énergie électrostatique). Il faut noter que les processus de transformation engendrent des pertes et des limitations suivant la forme d'énergie stockable.

1.8.1 Caractéristiques des sources d'énergie électrique

Plusieurs technologies de stockage d'énergie électrique sont utilisées dans les systèmes multi-sources dédiés aux applications de transport. Néanmoins le principe de fonctionnement de ces sources est relativement semblable : avant de stocker l'énergie électrique, elle est transformée en une autre forme d'énergie stockable. Le processus inverse est appliqué au moment de la restitution. Avant d'entamer la comparaison des différentes solutions de stockage d'énergie électrique, il est nécessaire de présenter leurs principales caractéristiques. Dans cette étude, nous nous intéressons à trois sources : les piles à combustibles, les supercondensateurs et les batteries. Pour chaque élément de stockage d'énergie, il existe six principaux critères. Le choix des critères pour une application donnée doit être déduit du cahier de charges et de l'architecture du système multi-sources considéré [21].

- Densité d'énergie : souvent appelée énergie massique ou énergie spécifique, c'est la quantité d'énergie stockée dans un 1kg de matière, elle est exprimée en Wh/kg. Ce critère évalue la quantité d'énergie stockable par l'élément. La densité d'énergie théorique n'est pas totalement disponible vu les pertes engendrées par les transformations ainsi que les précautions concernant la durée de vie qui dépend de la décharge complète de l'unité de stockage (profondeur de décharge).
- Densité de puissance : souvent appelée puissance massique, il s'agit de la puissance que peut produire 1kg de matière, elle est exprimée en W/kg. Ce critère évalue le niveau de puissance que l'élément peut fournir.
- Durée de vie : ce paramètre caractérise le nombre maximal de cycles de charge/décharge que l'élément de stockage peut supporter. C'est le paramètre le plus important et en même temps le plus difficile à évaluer car il dépend de plusieurs facteurs (la température, la fréquence du cyclage, les valeurs maximales des puissances assurées, etc.).
- Coût : c'est le coût d'investissement et de maintenance exprimé en €/kWh.

- **Sécurité**: ce critère évalue les éventuels risques liés à l'utilisation de la source d'énergie.
- **Recyclabilité**: ce critère permet d'évaluer les possibilités de recyclage et de réutilisation de l'unité de stockage en question.

Le ratio de la densité de puissance sur la densité d'énergie est équivalent à une fréquence. Ainsi, les indicateurs des performances énergétiques et celles relatives à la puissance classent les différentes technologies de stockage d'énergie électrique en fonction de leur réponse dynamique. Cette répartition est connue sous le nom de 'Diagramme de Ragone', un exemple de ce diagramme est présenté par la figure 1.15. Dans la majorité des cas, le diagramme de Ragone est l'outil le plus répandue pour la comparaison entre les différentes solutions de stockage d'énergie électrique. Dans ce diagramme, la comparaison est basée sur les densités de puissance et d'énergie, le reste des caractéristiques détaillées ci-dessus ne sont pas pris en compte. Néanmoins, les références [21], [28] et [29] proposent une comparaison suivant les six critères définis ci-dessus, ce type de représentation est généralement appelée diagramme d'araignée. La figure 1.16 présente un exemple de diagramme d'araignée pour les batteries et les supercondensateurs.

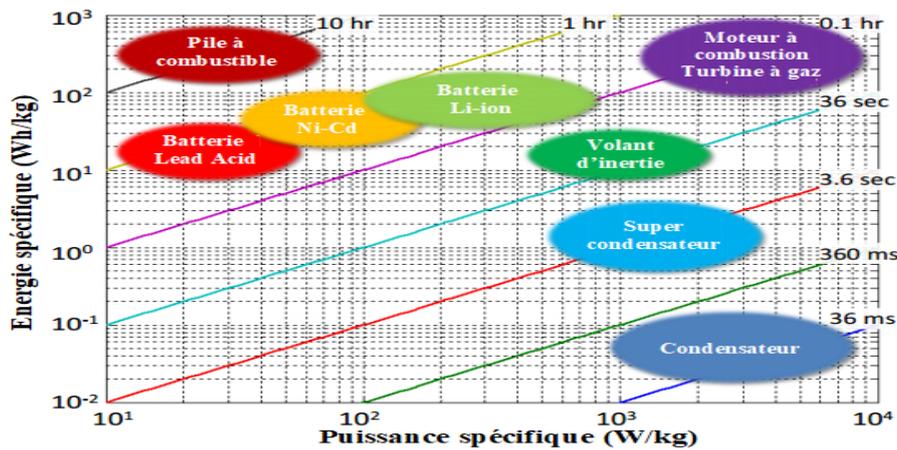


Figure 1.15: Diagramme de Ragone [30].

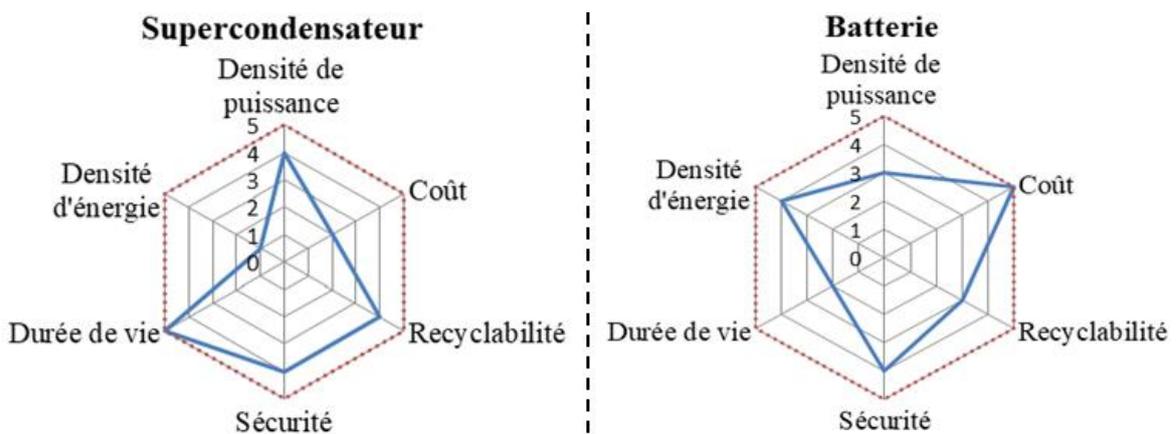


Figure 1.16: Caractéristiques des batteries et des supercondensateurs.

D'après le diagramme de Ragone, les supercondensateurs bénéficient d'une densité de puissance beaucoup plus importante que celles des batteries et des piles à combustibles, et une densité d'énergie supérieure à celle des condensateurs classiques. Néanmoins, leur densité d'énergie est largement en dessous de celle des batteries et celle des PACs, c'est la raison

pour laquelle ils sont qualifiés de source de puissance. Les supercondensateurs sont connus pour leur grande durée de vie largement supérieure à celles des batteries et des PAC, en outre leur réponse dynamique est rapide, elle est généralement inférieure à quelques dizaines de secondes. Les batteries et les PACs ont un comportement complémentaire à celui des supercondensateurs, elles possèdent une faible densité de puissance, mais une densité d'énergie élevée. Les batteries sont supérieures aux PACs en termes de densité de puissance, c'est l'inverse en ce qui concerne la densité d'énergie. Les batteries se caractérisent par une réponse dynamique supérieure à la minute, tandis que la réponse dynamique des PACs est généralement supérieure à quelques minutes.

Remarques :

Suivant les matériaux utilisés chaque solution de stockage d'énergie électrique (batterie, supercondensateurs et PAC-Hydrogène) supporte plusieurs technologies dont les performances sont différentes les unes des autres. Cette particularité rend difficile l'évaluation des propriétés des sources d'énergie, autrement dit les informations présentées au niveau du diagramme d'araignée ne sont pas très précises. Cependant, ce diagramme nous permet d'avoir une première idée sur les caractéristiques des sources que l'on désire éventuellement utilisées au sein de notre système. En comparaison avec le diagramme de Ragone, le diagramme d'araignée (ou diagramme en Radar) permet d'avoir plus de propriétés sur les SSE (coût, recyclabilité, durée de vie, etc). Ces propriétés peuvent être utilisées comme critère de choix lors du dimensionnement des unités de stockage d'énergie et dans la conception de l'algorithme de gestion d'énergie appliquée au système multi-sources. Néanmoins, pour des raisons de simplicité, nous nous limitons à deux principaux critères : la densité d'énergie et la densité de puissance, en d'autres termes, notre dimensionnement ainsi que les gestions d'énergie proposées seront principalement basées sur le diagramme de Ragone.

De par leur fonctionnement, les piles à combustibles sont toujours associées à des réservoirs d'hydrogène. Pour cette raison, elles sont qualifiées de convertisseur d'énergie et non pas d'unité de stockage d'énergie [31]. Par abus de langage, nous les qualifierons d'unité de stockage d'énergie ou source d'énergie électrique.

L'avancée technologique dans le domaine des batteries permet d'atteindre des capacités en puissance qui se rapproche de plus en plus des densités de puissance proposées par les supercondensateurs. Ainsi nous distinguons les batteries à haute densité de puissance et les batteries à haute densité d'énergie. L'investigation des différentes caractéristiques des unités de stockage montrent que si une technologie est performante sur un critère, elle l'est moins pour d'autres critères. En d'autres termes il n'existe pas une solution qui réunit toutes les performances désirées, à savoir : une bonne densité de puissance et d'énergie, une bonne réponse dynamique et une durée de vie élevée. Les unités de stockage ont donc un caractère complémentaire et non concurrentiel. Nous pouvons tirer un profit considérable en exploitant le caractère complémentaire des sources d'énergie. L'idée est de réaliser un système multi-sources où nous associons deux ou plusieurs sources, le choix est établi en tenant compte des avantages et des faiblesses de chaque source. L'objectif étant de compenser les faiblesses d'une source en l'associant à une ou plusieurs autres sources à caractère complémentaire. Cette démarche est souvent appelée couplage ou hybridation des sources d'énergie électrique.

1.8.2 Possibilités d'hybridation des sources d'énergie électrique

D'après le diagramme de Ragone et le diagramme en Radar, il est clair qu'aucune source d'énergie électrique n'est performante sur tous les critères mentionnés. Par contre, nous pouvons constater un caractère complémentaire entre ces sources, autrement dit certaines sources excellent dans certains critères mais elles sont moins performantes sur d'autres critères et vice-versa.

En termes de densité de puissance et du nombre de cycle charge/décharge, le supercondensateur est le meilleur candidat, en contrepartie il présente une faible densité d'énergie et par conséquent une faible autonomie, il dispose d'une grande durée de vie, mais leur coût est relativement élevé en comparaison avec les autres solutions de stockage d'énergie. Les supercondensateurs sont généralement utilisés comme des sources de puissance tampon, ils sont destinés pour les applications nécessitant de fortes contraintes en puissance et un nombre considérable de cycle de charge/décharge. Les piles à combustible et les batteries sont beaucoup plus intéressantes en termes de densité d'énergie, néanmoins l'autonomie dont elles disposent reste très limitée en comparaison avec les carburants d'origine fossiles. Comme il s'agit des sources d'énergie, la durée de vie de ces sources est fortement compromise si elles sont exposées à des pics de puissance répétitifs (excès de cycle charge/décharge). En comparaison avec les supercondensateurs, les batteries sont plus abordables en termes de prix. Les PACs sont relativement onéreux vu qu'elles nécessitent plusieurs auxiliaires ainsi que le combustible. Afin de bénéficier des avantages de chacune des sources et de corriger ces lacunes, il est judicieux de réaliser un système de stockage hybride généralement appelé système multi-sources où nous associons deux ou plusieurs SSE ayant des caractères complémentaires. Le système multi-sources présentera donc une bonne performance sur l'ensemble des critères. L'une des associations la plus connue est celle des batteries et des supercondensateurs, la figure 1.17 montre que les performances de cette association sont meilleures si nous les comparons aux performances individuelles des batteries et des supercondensateurs (Figure 1.16).

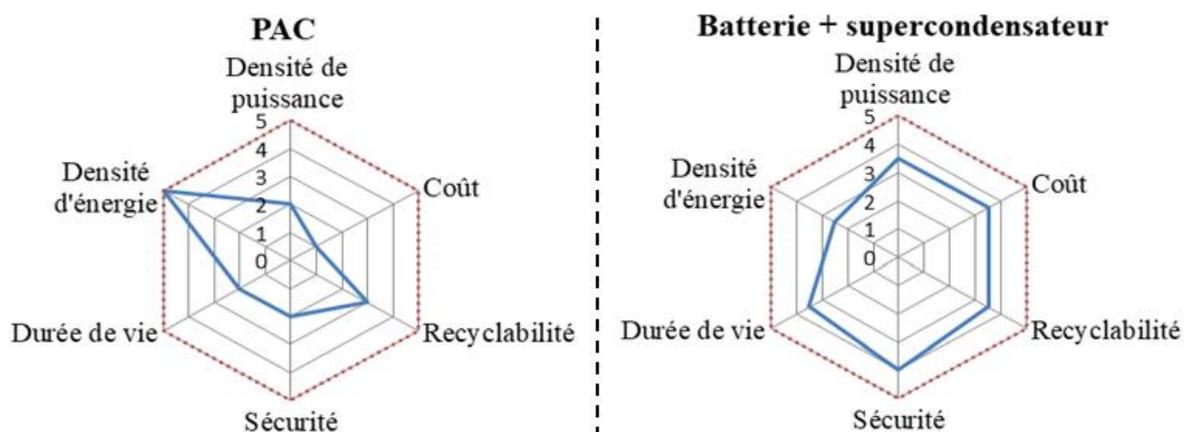


Figure 1.17: Caractéristiques des PAC et du couplage (batterie + supercondensateurs).

Comme nous nous intéresserons particulièrement à trois sources à savoir : les PACs, les batteries et les supercondensateurs, nous étudierons les différentes associations envisageables entre ces trois sources. Deux exemples de systèmes multi-sources seront proposés : le premier système associe un module de batteries lithium à haute densité d'énergie avec un pack de

supercondensateurs. Le deuxième système associe une pile à combustible avec un pack de supercondensateurs et un module des batteries lithium. L'étude de ces deux systèmes sera détaillée dans les prochains chapitres.

1.9 Problématiques de couplage des unités de stockage au sein des systèmes multi-sources

L'hybridation des sources d'énergie électrique pour les applications de transport (ou toute autre application) est une bonne démarche afin de compenser les faiblesses de certaines sources, cependant il faut faire face à certaines problématiques liées au coulage de ces sources. Les problématiques de couplage des unités de stockage d'énergie pour les applications de transport sont les suivantes :

a) Fluctuations et incertitudes de la demande de la charge

En plus de son caractère très fluctuant, la demande de la chaîne de traction est imprévisible car elle dépend principalement du comportement du conducteur et de la nature de la mission que nous désirons accomplir. Nous avons eu l'opportunité de voir que chacune des sources présente des performances et des contraintes qui lui sont propres. L'utilisation d'une source impose la prise en compte de ses contraintes tout en essayant d'exploiter ses performances sans compromettre son fonctionnement optimal. Par contre, le couplage de plusieurs sources dont les performances et les contraintes de fonctionnement sont complémentaires n'est pas toujours une tâche facile. Afin de préserver la stabilité du système global et améliorer ses performances, la stratégie de gestion d'énergie devra prendre en compte les contraintes de fonctionnement propres à chaque source vis-à-vis des sollicitations de la chaîne de traction/propulsion.

b) Autonomie, capacité en puissance et durée de vie des sources

Comme nous avons eu l'occasion de le découvrir dans les paragraphes précédents, chacune des sources d'énergie électrique possède ces propres performances. Dans ce travail, nous nous focaliserons particulièrement sur deux principaux critères : l'autonomie (ou densité d'énergie) et la densité de puissance. Les sources qui assurent l'autonomie des systèmes multi-sources ont forcément une densité d'énergie élevée et par conséquent leur densité de puissance est généralement limitée. Dans ce cas, il est fortement conseillé de ne pas exposer ces sources à des niveaux de puissances élevées et à des fluctuations rapides. En effet, la réponse dynamique de ces sources n'est pas en mesure de suivre les demandes rapides de la charge, en plus leur densité de puissance ne permet pas de fournir des valeurs de puissance élevée. D'un autre côté, les sources de puissance ne peuvent pas assurer l'autonomie du véhicule sur tout le cycle de conduite vu que leur densité d'énergie est très faible. Le ratio de la densité de puissance sur la densité d'énergie est équivalent à une fréquence. Ce ratio détermine la zone de fonctionnement optimale de la source. Un fonctionnement excessif hors de cette zone peut compromettre la durée de vie de la source.

c) Absence d'un profil de mission standardisé

Une multitude de cycles de conduite ont été développées pour les applications de transport. Ces profils varient de pays en pays et aussi suivant les applications [32]. Quelques profils sont

présentés dans les figures 1.18 et 1.19. Généralement ces profils sont conçus afin d'évaluer la consommation du carburant et les émissions polluantes des véhicules conventionnels. Les plus connus sont les cycles dits 'normalisés' tels que : le cycle européen de conduite (NEDC : New European Driving Cycle). Les cycles de conduite américains à savoir : le FTP-75 (Federal Test Procedure), le cycle HWFET (Highway Fuel Economy Test) ainsi que le l'US06, le NYCC, le SC03 et le cycle froid effectué à une température ambiante de -7°C . Les cycles de conduite japonais : le cycle JC08 et le 10-15 mode. Les cycles normalisés sont des profils théoriques qui ne reflètent pas le comportement réel de la conduite en zone urbaine et extra-urbaine. Dans le but de mieux évaluer les consommations et les émissions des véhicules classiques ainsi que l'autonomie des véhicules électriques légers, un cycle mondial harmonisé WLPT (Worldwide Harmonized Light vehicles Test Procedures) a été développée. Ce cycle reproduit de façon plus réaliste l'usage des véhicules. Suivant la valeur de la puissance massique P_{massique} (ratio de la puissance nominale divisée par le poids du véhicule) il existe trois variantes, le tableau 1.1 présente les trois classes du cycle WLPT.

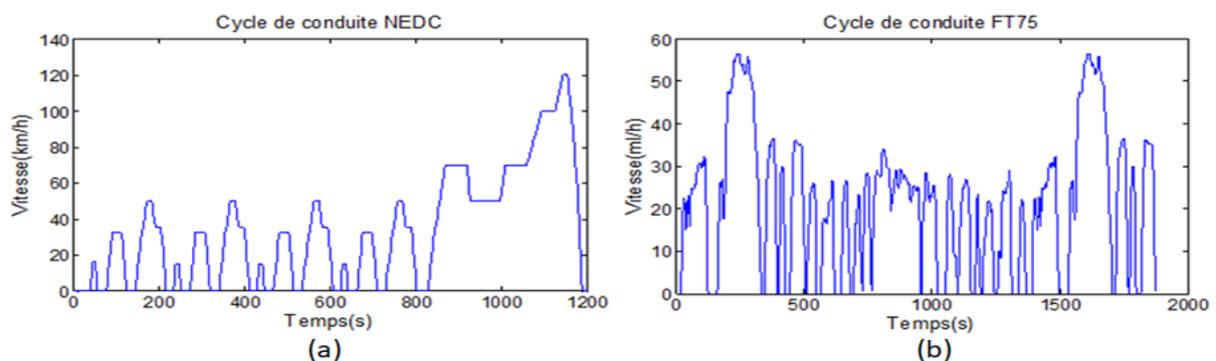


Figure 1.18: Cycle NEDC (a) et Cycle FTP-75 (b).

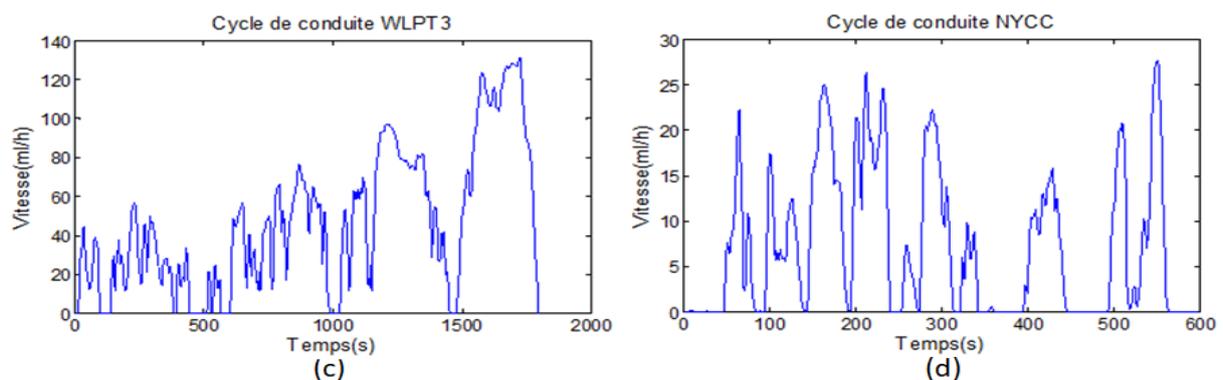


Figure 1.19: Cycle WLPT3 (c) et Cycle NYCC (d).

Tableau 1.1: Les trois classes du cycle WLTP [32].

Classe	Puissance massique (W/Kg)
Classe 1	$P_{\text{massique}} \leq 22$
Classe 2	$22 < P_{\text{massique}} < 34$
Classe 3	$P_{\text{massique}} \geq 34$

La pluralité des cycles de conduite entraîne une diversité de cahier de charges et par conséquent une variété de méthode de dimensionnement et de gestion d'énergie des systèmes multi-sources. Ces circonstances compliquent d'avantage l'étude et le développement des stratégies de gestion d'énergie pour les applications de transport.

1.10 Objectifs de la thèse

Les objectifs de cette thèse visent le développement d'une stratégie de gestion optimale d'énergie électrique pour une application de type véhicule électrique. En effet, le couplage de plusieurs sources de natures différentes entraîne des problématiques de dimensionnement, de qualité d'énergie échangée entre les sources et la charge, sans oublier les durées de vie et les états de santé et de charge des éléments interconnectés (plus particulièrement les sources d'énergie). Pour les applications de transport, les principaux facteurs de ces problématiques reposent sur : les fluctuations de la puissance demandée par la chaîne de propulsion/traction, la durée de vie limitée des éléments de stockage d'énergie électrique, l'absence de profil de mission standard réaliste et la nécessité d'optimisation de la consommation énergétique du véhicule. La méthode adéquate pour l'étude des systèmes multi-sources repose sur une approche systémique. Cette approche est nécessaire pour établir des modèles comportementaux des sources et des convertisseurs en vue de l'élaboration des stratégies de gestion optimale des flux énergétiques entre les organes.

Dans le présent manuscrit, notre contribution reposera sur la mise en œuvre des stratégies de gestion d'énergie basées sur une approche de décomposition fréquentielle du courant de la charge qui est une image de la puissance instantanée tant que la valeur moyenne de la tension du bus continu est maintenue constante. Nous investiguons aussi les approches adaptatives de décomposition fréquentielle. Ce travail de thèse s'inscrit naturellement dans la continuité des activités du laboratoire GREAH sur les problématiques de gestion de l'énergie électrique basées sur l'approche fréquentielle. Cette approche initiée par le GREAH a fait l'objet de plusieurs publications scientifiques [33][34][35][36] et plusieurs thèses [37][38][39]. En effet sur la base de la connaissance des densités de puissance et d'énergie, nous pouvons situer chaque source d'énergie dans le domaine de fréquence qui convient à ses performances. Les demandes de la charge sont ainsi réparties suivant le type et le nombre des sources d'énergie électrique utilisées. Cependant, l'utilisation d'une fréquence de séparation fixe ne garantit pas toujours une répartition optimale des composantes fluctuantes de la puissance requise de la charge entre les différentes unités de stockage surtout dans les conditions réelles de conduite. Certaines limites de sécurité (état de santé ou état de charge par exemple) peuvent ne pas être respectées si nous n'adaptions pas la constante de temps des filtres au cours de la conduite. La contribution de cette thèse repose sur le développement des stratégies de gestion d'énergie adaptative qui consiste à changer la fréquence de coupure des filtres suivant l'évolution des indicateurs propres aux unités de stockage d'énergies à savoir : l'état de santé ou l'état de charge.

Les travaux de recherche à mener peuvent se diviser en deux principaux volets. Le premier volet porte sur l'étude et la modélisation comportementale des différentes composantes du système multi-sources, le dimensionnement de la chaîne de traction et des sources d'énergie électrique. La deuxième partie est destinée à l'investigation et au développement des stratégies de gestion d'énergie prenant en compte les dynamiques propres aux sources d'énergie électrique ainsi que leur état de fonctionnement.

1.11 Conclusion

Ce chapitre a été consacré aux problématiques liées à l'étude des systèmes multi-sources, plus précisément l'hybridation des sources d'énergie électrique. Nous nous intéressons particulièrement aux systèmes multi-sources dédiés aux applications de transport (cas des véhicules électriques). Une synthèse des technologies de stockage d'énergie électrique a été discutée dans le but de choisir les critères à prendre en compte lors de l'élaboration de la stratégie de gestion d'énergie. Nous avons eu aussi l'occasion d'investiguer les enjeux environnementaux et économiques relatifs aux véhicules électriques et aux véhicules électriques hybrides sans oublier les architectures des VEs et des VEHs ainsi que des motorisations utilisées pour la traction/propulsion.

Le prochain chapitre sera consacré à la modélisation des différentes parties du système multi-sources à savoir : les sources d'énergie électrique, les convertisseurs de puissance et le moteur de traction/propulsion. Nous présenterons aussi les systèmes multi-sources sur lesquelles nous travaillerons tout au long de ce mémoire.

Chapitre 2 : Modélisation des éléments du système multi-sources.

**“Ce n'est pas que je suis si intelligent.
C'est que je reste plus longtemps avec les problèmes”
Albert Einstein.**

2.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de présenter les modèles des différents éléments du système multi-sources à savoir : les sources d'énergie électrique (batteries, supercondensateurs et pile à combustible), les convertisseurs statiques associés aux sources et la chaîne de traction/propulsion composée d'un onduleur de tension triphasé et d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). La MSAP joue le rôle du moteur de traction/propulsion du véhicule. La première partie de ce chapitre présente les différentes architectures d'hybridation des sources d'énergie électrique au sein d'un système multi-sources. La deuxième partie est consacrée à la présentation des modèles mathématiques des convertisseurs statiques (DC-DC et DC-AC) ainsi que la chaîne de traction/propulsion. La dernière partie traite la modélisation comportementale des sources d'énergie électrique.

2.2 Architectures d'hybridation des sources d'énergie électrique

L'objectif de cette première section est de présenter les différentes architectures d'hybridation des sources d'énergie électrique. Il existe deux façons d'associer des sources électriques au sein d'un système multi-sources : l'association active et l'association passive. Ces associations peuvent être effectuées via un ou plusieurs convertisseurs [21]. Généralement, les véhicules à usage particulier sont équipés d'une seule source d'énergie électrique. Dans la majorité des cas, il s'agit d'un module de batteries connecté directement au système de traction/propulsion via un bus continu comme illustré par la figure 2.1 (b). Le système de traction est constitué d'un ou plusieurs onduleurs suivant s'il s'agit d'un seul moteur de traction ou des systèmes moteurs-roues. Ce type d'architecture nécessite un nombre élevé de batteries pour atteindre le niveau de tension souhaité. La connexion directe impose donc un surdimensionnement des batteries. En effet, quand la tension du bus continu atteint la limite minimale, le système de traction doit garder les mêmes performances. Sans oublier les problèmes d'équilibrage des tensions qu'engendre le nombre élevé de batteries en série. Afin de réduire le nombre de batteries, un convertisseur DC-DC est souvent intercalé entre la source d'énergie électrique et le système de traction comme cela est présenté dans la figure 2.1 (a). Cette architecture permet aussi le contrôle de la tension du bus continu via le convertisseur DC-DC.

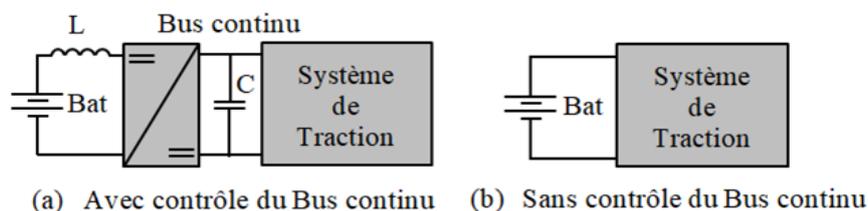


Figure 2. 1: Architecture sans hybridation des SEE.

2.2.1 Hybridation passive des sources d'énergie électrique

L'hybridation passive consiste à associer directement en parallèle deux ou plusieurs sources de stockage d'énergie électrique. La figure 2.2 présente un exemple de configuration de véhicule à deux sources basées sur un module de batteries et un pack de supercondensateurs. Les sollicitations de la charge seront partagées entre les deux sources. En comparaison avec l'architecture sans hybridation, les contraintes imposées en termes de

puissance sur les batteries sont réduites, cela permettra d'améliorer leur durée de vie. Grâce à l'ajout des supercondensateurs, la densité de puissance du système de stockage d'énergie (SSE) électrique est considérablement améliorée. Le contrôle de la tension du bus continu nécessite l'ajout d'un convertisseur DC-DC comme illustré dans la figure 2.2. L'association passive impose que les sources interconnectées aient le même niveau de tension. En outre, les contributions en courant ne sont pas contrôlées, elles sont conditionnées par les impédances, les dynamiques ainsi que les niveaux de tension des deux sources, la répartition des puissances n'est donc pas optimale [21].

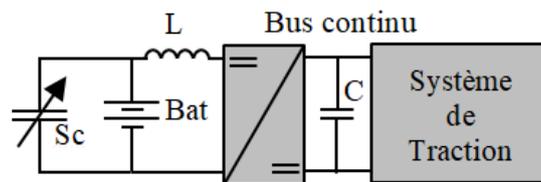


Figure 2. 2: Architecture d'hybridation des SSE avec association passive.

2.2.2 Hybridation active des sources d'énergie

L'hybridation active consiste à séparer les sources d'énergie à l'aide des convertisseurs statiques DC-DC comme il est présenté par la figure 2.3 et la figure 2.4. Dans la majorité des cas, la source principale (celle ayant la plus grande densité d'énergie) ici une pile à combustible ou une batterie est connectée directement sur le bus continu. Sa tension varie moins rapidement en comparaison à une source de puissance (par exemple des supercondensateurs ou des batteries à densité de puissance élevée). Cette dernière est liée au bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur DC-DC (Figure 2.3). Cette architecture permet de mieux contrôler le flux de puissance entre les sources et les charges car elle permet de prendre en compte des critères d'optimisation des performances dans l'estimation des consignes des puissances à imposer aux sources. Elle permet également aux sources d'énergie d'avoir des niveaux de tensions différents. Pour contrôler la tension du bus continu, un deuxième convertisseur est introduit entre la source principale et le bus continu. Les deux convertisseurs peuvent être mis en parallèle ou en cascade comme le montre la figure 2.4.

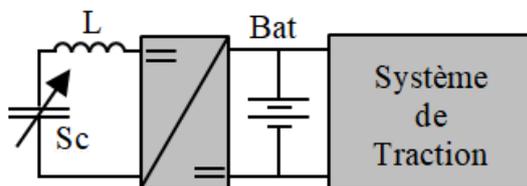


Figure 2. 3: Architecture mixte d'hybridation des SSE avec association active.

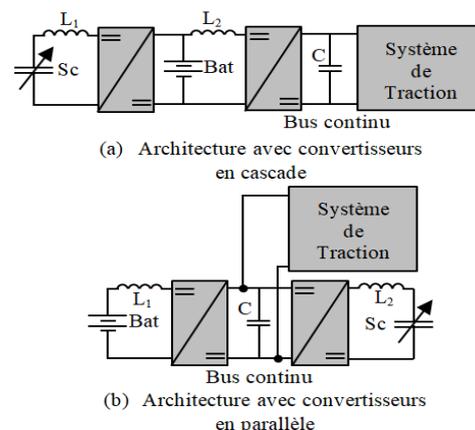


Figure 2. 4: Architecture d'hybridation des SSE avec association active.

L'architecture avec des convertisseurs en parallèle est plus intéressante en termes de rendement. En prenant par exemple les système multi-sources de la figure 2.4, le flux de

puissance propre aux batteries passe par un seul convertisseur tandis qu'il est obligé de passer par deux convertisseurs dans l'architecture à convertisseurs en cascade. Le dimensionnement par rapport à la structure à convertisseurs en cascade est moins avantageux que celui de l'architecture à convertisseurs en parallèle [21][31]. Les stratégies de gestion d'énergie seront plus simples à mettre en œuvre avec l'architecture utilisant des convertisseurs en parallèle, c'est la raison pour laquelle nous adopterons cette architecture pour les systèmes multi-sources étudiés. Les convertisseurs liés aux sources d'énergie électrique sont des convertisseurs DC-DC réversibles en courant (convertisseur Buck-Boost). Nous utiliserons aussi des convertisseurs Boost à structure entrelacée afin de réduire les pertes par commutation et de limiter le volume et le poids des éléments passifs. Dans ce travail, nous nous intéresserons particulièrement aux systèmes multi-sources équipés de deux ou trois sources d'énergie indépendantes avec une architecture parallèle. Les stratégies de gestion d'énergie développée pour les systèmes à deux et trois sources peuvent être étendues pour les systèmes multi-sources dotés de plus de trois sources.

2.3 Configurations des systèmes étudiés

Les figures 2.5 et 2.6 présentent les deux systèmes multi-sources étudiés. Dans ce mémoire, nous les appelons respectivement systèmes à deux SSE et systèmes à trois SSE. Dans le système à deux sources, la batterie lithium joue le rôle de source d'énergie principale et un pack de supercondensateurs est utilisé dans le but d'assister la source principale au cours du cycle de la mission, plus précisément pendant les régimes transitoires. Concernant le système à trois SSE, c'est la PAC qui joue le rôle de la source d'énergie principale. Elle sera épaulée par deux unités de stockage auxiliaires à savoir : un module de batteries lithium qui à la différence du système à deux SSE jouera le rôle d'une source de puissance et un pack de supercondensateurs.

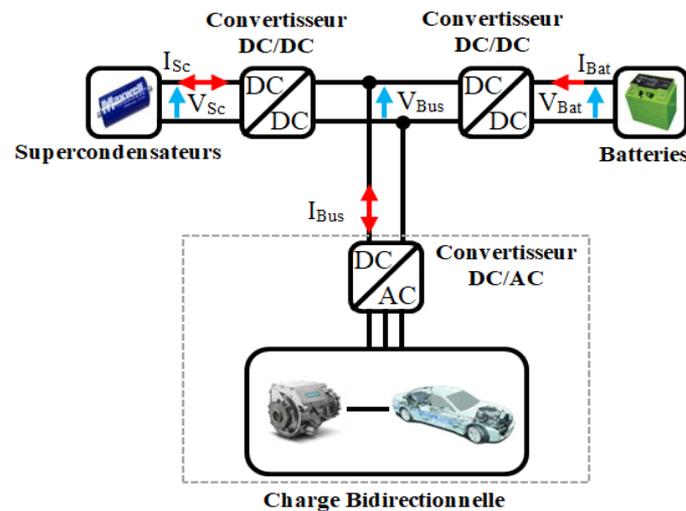


Figure 2. 5: Configuration à deux SSE.

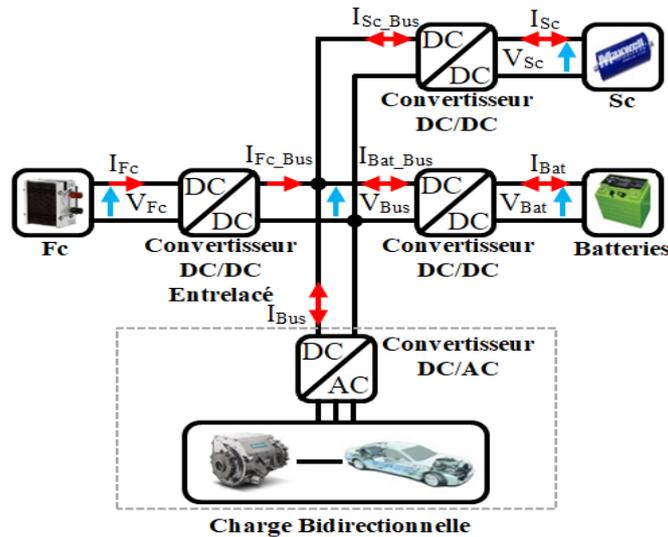


Figure 2. 6: Configuration à trois SSE.

2.4 Modèles comportementaux des convertisseurs DC-DC

L'objectif de cette partie est de présenter les modèles des convertisseurs statiques en vue de développer les stratégies de contrôle des systèmes multi-sources à étudier. Dans ce mémoire, la source d'énergie principale (batteries ou pile à combustible) est interfacée via un convertisseur survolteur (Boost) ou un convertisseur survolteur entrelacé. L'étude de la structure entrelacée sera traitée dans le prochain paragraphe. Les sources secondaires utilisées comme des sources de puissance sont couplées au bus continu par l'intermédiaire des convertisseurs réversibles en courant (Buck-Boost). Les stratégies de commande des convertisseurs dépendent de la configuration du système multi-sources et des stratégies de gestion d'énergie souhaitées [31][40]. En désignant par TR_i le transistor de puissance dont le signal de commande est PWM_i . La modélisation des convertisseurs DC-DC reposera sur l'analyse des séquences de fonctionnement des modes (dévolteur et/ou survolteur). Plusieurs travaux de recherche se sont intéressés à l'étude des convertisseurs DC-DC et plus particulièrement aux problématiques des conductions discontinues [41][42]. La relation de non-linéarité entre le rapport cyclique et la tension du bus continu rend l'étude et la mise en œuvre de ce mode de conduction très complexe [43]. Pour des raisons de simplicité, seul le mode de conduction continu est pris en compte dans ce travail.

2.4.1 Modèle du convertisseur dévolteur

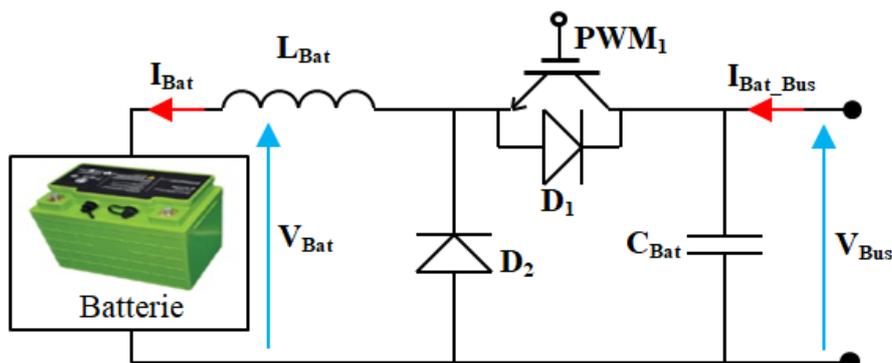


Figure 2. 7: Convertisseur dévolteur connecté au module de batteries.

Lors du fonctionnement dévolteur, le transistor de puissance TR_1 de la figure 2.7 commute, la batterie se charge depuis le bus continu. Ce type de fonctionnement est décrit par le modèle analytique présenté par le système d'équations différentielles (2.1). Admettant que le rapport cyclique α_{Bat} est égale à l'unité lorsque TR_1 est passant et nul lorsque TR_1 est bloqué. Nous pouvons donc extraire le modèle moyen du convertisseur en fonctionnement dévolteur. Le modèle analytique du convertisseur est présenté par l'équation (2.2).

$$\begin{cases} L_{Bat} \cdot \frac{dI_{Bat}}{dt} = V_{Bus} - V_{Bat} \\ C_{Bat} \cdot \frac{dV_{Bus}}{dt} = I_{Bat} - I_{Bat_Bus} \end{cases} \quad (2.1)$$

$$\begin{cases} L_{Bat} \cdot \frac{dI_{Bat}}{dt} = \alpha_{Bat} \cdot V_{Bus} - V_{Bat} \\ C_{Bat} \cdot \frac{dV_{Bus}}{dt} = \alpha_{Bat} \cdot I_{Bat} - I_{Bat_Bus} \end{cases} \quad (2.2)$$

2.4.2 Modèle du convertisseur survolteur

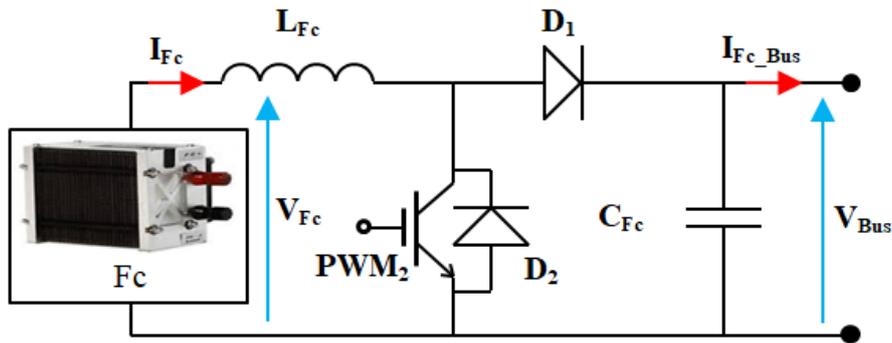


Figure 2. 8: Convertisseur survolteur lié à la pile à combustible.

Lors du fonctionnement survolteur, le transistor de puissance TR_2 de la figure 2.8 commute, la pile à combustible produit de l'énergie et alimente le bus continu. Ce type de fonctionnement est décrit par le modèle analytique présenté par le système d'équations différentielles (2.3). Admettant que le rapport cyclique α_{Fc} est égale à l'unité lorsque TR_2 est passant et nul lorsque TR_2 est bloqué. Nous obtenons le modèle moyen du convertisseur survolteur présenté par l'équation (2.4).

$$\begin{cases} L_{Fc} \cdot \frac{dI_{Fc}}{dt} = V_{Fc} \\ C_{Fc} \cdot \frac{dV_{Bus}}{dt} = -I_{Fc_Bus} \end{cases} \quad (2.3)$$

$$\begin{cases} L_{Fc} \cdot \frac{dI_{Fc}}{dt} = V_{Fc} - (1 - \alpha_{Fc}) \cdot V_{Bus} \\ C_{Fc} \cdot \frac{dV_{Bus}}{dt} = (1 - \alpha_{Fc}) \cdot I_{Fc} - I_{Fc_Bus} \end{cases} \quad (2.4)$$

2.4.3 Modèle du convertisseur dévolteur-survolteur

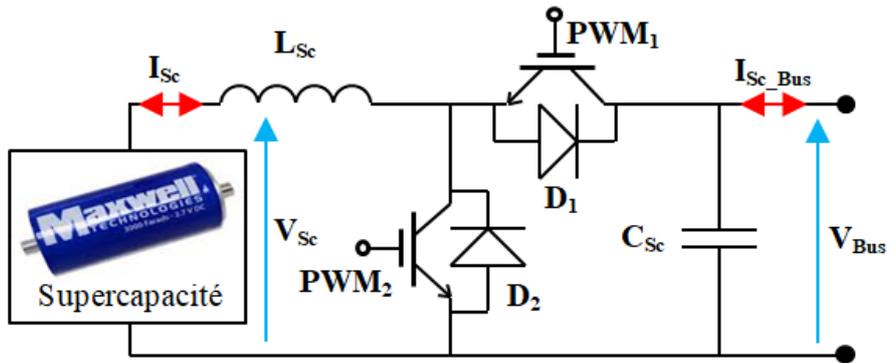


Figure 2. 9: Convertisseur dévolteur-survolteur connecté au pack des supercondensateurs.

Les modèles moyens des convertisseurs dévolteur et survolteur sont semblables. Il est donc possible de regrouper les deux modèles, afin de proposer un modèle moyen pour le convertisseur dévolteur-survolteur. Ce type de convertisseur est présenté par la figure 2.9, où le fonctionnement dévolteur correspond à la charge des supercondensateurs et le fonctionnement survolteur correspond à la décharge des supercondensateurs. Le modèle moyen du convertisseur bidirectionnel en courant est présenté par l'équation (2.5), où k désigne le signe du courant et α_{Sc} le rapport cyclique.

$$\begin{cases} L_{Sc} \cdot \frac{dI_{Sc}}{dt} = k \cdot (V_{Sc} - \alpha_{Sc} \cdot V_{Bus}) \\ C_{Sc} \cdot \frac{dV_{Bus}}{dt} = \alpha_{Sc} \cdot I_{Sc} - I_{Sc_Bus} \end{cases} \quad (2.5)$$

Les valeurs de k et α_{Sc} dépendent du mode de fonctionnement du convertisseur. Le mode survolteur correspond à $k=1$ et un rapport cyclique égal à $(1-\alpha_{Sc})$. Le mode dévolteur correspond à $k=-1$ et un rapport cyclique égal à α_{Sc} . Le modèle moyen du convertisseur présenté par l'équation (2.5) présente un comportement non linéaire du au produit de la variable de commande α_{Sc} et les variables d'état (V_{Bus} et I_{Sc}).

2.4.4 Modèle du convertisseur survolteur entrelacé

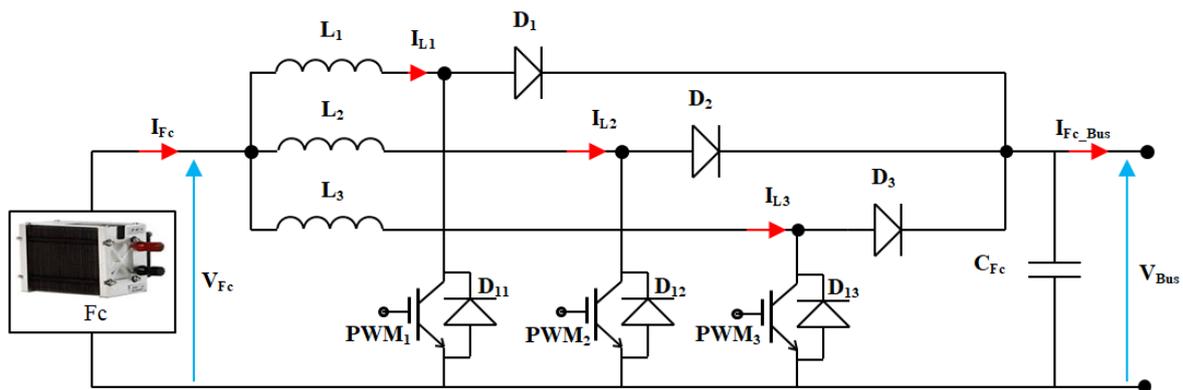


Figure 2. 10: Convertisseur survolteur entrelacé.

Le convertisseur Boost entrelacé à trois phases est une variante du convertisseur Boost. La mise en parallèle de trois cellules de commutation permet d'augmenter la puissance du convertisseur et d'améliorer la forme d'onde du courant de la pile. Grâce au partage du courant entre les trois phases, la contrainte en courant dans les transistors de puissance et dans

les inductances est réduite de trois en comparaison avec le convertisseur Boost de base. L'entrelacement des courants est bénéfique pour le dimensionnement des filtres du convertisseur car l'ondulation du courant de la source sera réduite en comparaison avec l'ondulation des courants des trois canaux [44]. Au niveau de la commande et afin de tirer profit de la présence des trois cellules de commutation, les signaux de commandes PWM₁, PWM₂ et PWM₃ sont déphasés de 120° (Figure 2.11). L'équation (2.6) présente le modèle moyen du convertisseur entrelacé à trois canaux.

$$\begin{cases} L_1 \cdot \frac{dI_{L1}}{dt} = V_{Fc} - (1 - \alpha_1) \cdot V_{Bus} \\ L_2 \cdot \frac{dI_{L2}}{dt} = V_{Fc} - (1 - \alpha_2) \cdot V_{Bus} \\ L_3 \cdot \frac{dI_{L3}}{dt} = V_{Fc} - (1 - \alpha_3) \cdot V_{Bus} \end{cases} \quad (2.6)$$

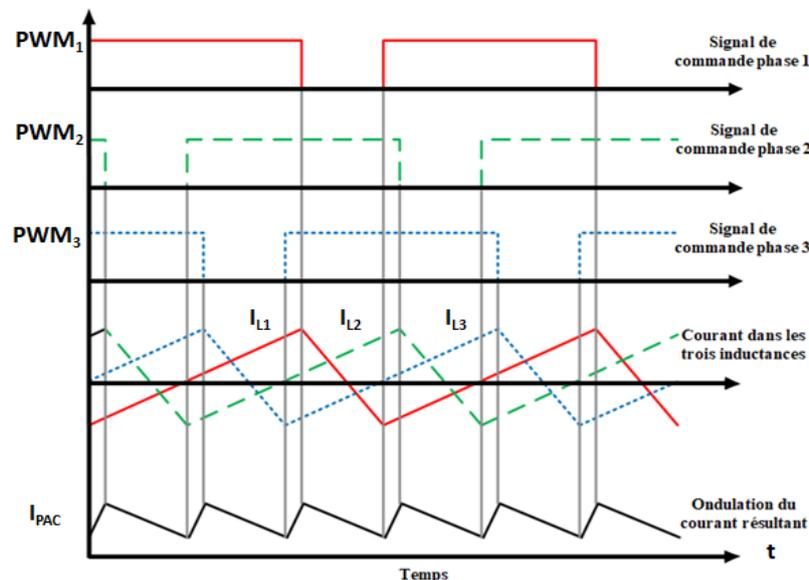


Figure 2. 11: Signaux de commande et courants pour un Boost entrelacé à trois canaux [45].

Le rapport entre l'ondulation du courant d'entrée et l'ondulation du courant dans une inductance est souvent utilisé comme critère de comparaison entre les différentes topologies entrelacées [43].

2.5 Modélisation des éléments de la chaîne de traction/propulsion

Cette partie sera consacrée à l'étude et la modélisation de l'onduleur triphasé à deux niveaux ainsi que le moteur de traction/propulsion qui est dans le cas de cette étude un moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) [46][47][48].

Dans le but d'extraire le modèle de l'onduleur triphasé à deux niveaux, les fonctions d'état de chaque cellule de commutation seront présentées. Concernant la commande de l'onduleur, deux approches de seront utilisées, à savoir : la commande intersective (MLI sinus-triangle) et la commande vectorielle [49][50]. Les détails de la commande MLI de l'onduleur seront détaillés dans le prochain chapitre. La modélisation est une étape importante dans la synthèse de la commande des machines électriques et l'étude de leur comportement. Afin de

développer un modèle mathématique simplifié de la MSAP, plusieurs hypothèses simplificatrices seront prises en compte [51][52].

2.5.1 Modèle de l'onduleur de tension triphasé

Le synchronisme entre les champs magnétiques rotorique et statorique dans une machine synchrone est la source du lien entre la vitesse et les grandeurs électriques alimentant la machine. Ainsi pour fonctionner à vitesse variable nous devons pouvoir varier la fréquence des courants d'alimentation d'où la nécessité d'un onduleur de tension triphasé. Les onduleurs de tension triphasée à deux niveaux sont largement utilisés dans l'industrie. Ils sont présents dans une variété d'applications (variateurs de vitesse industriels, chauffage par induction, alimentation sans interruption, etc.). Dans les applications de transport, les onduleurs de tension sont utilisés pour alimenter les alterno-démarrateurs et grâce à leur caractère bidirectionnel, ils sont généralement associés aux moteurs électriques au sein des VEs et des VEHs. Ils permettent d'alimenter le moteur électrique à partir d'une source de tension continue (généralement une batterie pour les applications de transport), ils sont composés de trois cellules de commutation, chaque cellule contient deux interrupteurs unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant. Cette dernière propriété est obtenue grâce aux diodes montées en antiparallèle avec les interrupteurs de puissance. La figure 2.12 présente la structure d'un onduleur de tension triphasé. Chaque bras de l'onduleur correspond à une cellule de commutation et comprend deux interrupteurs de puissance commandés à l'amorçage et au blocage. Les interrupteurs de puissance peuvent être réalisés à partir des transistors de type MOSFET, IGBT ou GTO. Pour les applications de transport, les transistors de puissance rencontrés sont généralement des IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor). Pour notre banc de test expérimental, nous utilisons des IGBTs avec une fréquence de commutation de 10kHz.

Afin d'extraire les expressions des tensions simples en fonction des signaux de commandes appliqués à l'onduleur, les hypothèses ci-dessous sont faites :

- La MSAP est couplée en étoile et considérée comme équilibrée.
- La source de tension continue est considérée comme idéale (puissance illimitée assurant une tension V_{BUS} constante).
- Chaque cellule de commutation comprend deux transistors de puissance considérés comme étant parfaits.
- Les temps morts sont négligés.
- La somme des courants du stator est nulle (le neutre du moteur n'est pas connecté au point milieu de l'onduleur).

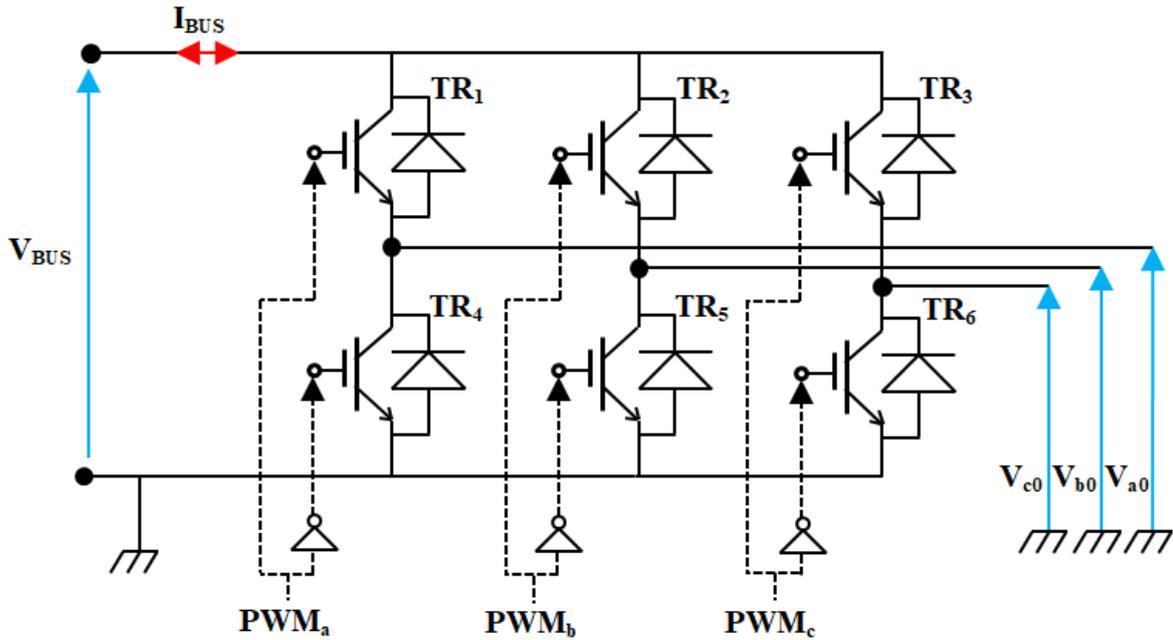


Figure 2. 12: Onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

Les commandes des deux interrupteurs (TR_i et $TR_{(i+3)}$) d'une même cellule de commutation sont complémentaires. Seule deux possibilités sont envisageables : 1^{ère} configuration : TR_i passant et $TR_{(i+3)}$ bloqué, 2^{ème} configuration : TR_i bloqué et $TR_{(i+3)}$ passant. Un temps mort est toujours pris en compte dans la commande des transistors d'une même cellule de commutation afin d'éviter d'éventuel court-circuit. Les temps morts sont assurés par les drivers associés à l'unité de contrôle des transistors de puissance.

Les deux configurations décrites ci-dessus peuvent être présentées à l'aide d'une seule variable binaire S_i (en négligeant le temps mort). Cette variable est définie comme suit :

$$S_i = \begin{cases} 1 & (T_{Ri} \text{ passant}, T_{R(i+3)} \text{ bloqué}) \\ 0 & (T_{Ri} \text{ bloqué}, T_{R(i+3)} \text{ passant}) \end{cases} \quad (2.7)$$

Le rôle d'un onduleur triphasé est la conversion d'une tension continue en tensions triphasés alternatives de fréquence et amplitude variable. Les ordres de commande des différents interrupteurs sont généralement assurés par une modulation de largeur d'impulsion (MLI). Chaque cellule de commutation fonctionne suivant deux états ($S_i=1$ ou $S_i=0$), les tensions simples par rapport à la masse (V_{a0} , V_{b0} , V_{c0}) peuvent donc prendre deux valeurs suivant la valeur prise par la variable S_i , ces équations sont présentées par l'équation (2.8).

$$\begin{pmatrix} V_{a0} \\ V_{b0} \\ V_{c0} \end{pmatrix} = V_{Bus} \cdot \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

Les tensions V_{a0} , V_{b0} et V_{c0} peuvent prendre deux valeurs V_{Bus} ou 0. Grâce aux ordres des commandes générés par la modulation de largeur d'impulsion (Pulse Width Modulation en anglais), nous pouvons obtenir en valeur moyenne sur une certaine durée n'importe quelle valeur entre 0 et V_{Bus} . La MSAP dont nous disposons dans notre laboratoire est câblée en étoile, nous admettons que cette machine est équilibrée. La tension simple V_{in} (phase-neutre)

de la phase i peut être obtenue en utilisant l'équation (2.9) ou V_{n0} est la tension du point neutre (équation (2.10)).

$$V_{in} = V_{i0} - V_{n0} \quad (2.9)$$

$$V_{n0} = \frac{V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}}{3} \quad (2.10)$$

En combinant les équations (2.7), (2.8), (2.9) et (2.10), nous obtenons :

$$V_{in} = V_{Bus} \cdot S_i - \frac{V_{Bus}}{3} \cdot (S_1 + S_2 + S_3) \quad (2.11)$$

Finalement les tensions simples aux bornes de la MSAP ont pour expression :

$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = \frac{V_{Bus}}{3} \cdot \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

2.5.2 Modèle de la Machine Synchrones à Aimants Permanents (MSAP)

Une machine synchrone est le type de machine dont la vitesse de rotation de la partie tournante (Rotor) est égale à la vitesse de rotation du champ tournant créé par les enroulements de la partie fixe (Stator). Le champ magnétique du rotor est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation, sa position est fixe par rapport au rotor ce qui explique l'égalité des vitesses entre le champ magnétique du stator et la partie tournante. La famille des moteurs synchrones regroupe plusieurs types de machines (Alternateur, moteur pas à pas, moteur Brushless (BLDC), etc.). Cependant la structure et le principe de fonctionnement sont relativement identiques. Le stator est généralement composé de trois enroulements triphasés afin que les forces électromotrices (FEM) générées par la rotation du champ magnétique soient trapézoïdales ou sinusoïdales. Du côté du rotor, il existe trois types d'architectures assurant la génération du champ d'induction : le rotor à pôles saillants, le rotor à pôles lisses et le rotor à aimants permanents [53].

Le grand développement du domaine de l'électronique de puissance, de la commande numérique ainsi que l'apparition des aimants permanents de haute densité d'énergie sont les principaux facteurs de l'essor des machines synchrones à aimants permanents. Ce type de machine est utilisé dans une variété d'applications de hautes performances à savoir : les sources d'énergie renouvelable (éolienne, hydrolienne, etc.), les machines-outils, les équipements de soin médicaux, les équipements domestiques, les véhicules, l'aérospatiale et les applications robotiques. Pour les applications de transport, les constructeurs des véhicules électriques préfèrent généralement les MSAP par rapport autres types de machines électriques, cela est dû aux multiples avantages qu'accorde ce type de machine. Nous présentons à titre de rappel quelques avantages et inconvénients de la MSAP. Comme avantages, nous pouvons citer :

- ✓ L'absence des enroulements au niveau du rotor élimine les pertes joules rotoriques.

- ✓ Le couple volumique élevé et la puissance massique importante permettent une meilleure compacité.
- ✓ L'absence des contacts glissants (collecteurs et balais) simplifie la construction et l'entretien.
- ✓ La densité du flux élevé dans l'entrefer accorde de très bonnes performances dynamiques notamment en accélération et en freinage.
- ✓ Une grande fiabilité et possibilité de fonctionnement en survitesse.
- ✓ Une grande robustesse (possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes).

Comme inconvénients du MSAP, nous citons :

- Le coût élevé de ce type de machine (principalement dû au coût élevé des aimants).
- L'influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine.
- La diminution logarithmique de l'aimantation en fonction du temps.

Hypothèses simplificatrices :

Comme tout autre système, l'étude de la commande d'une MSAP nécessite dans un premier temps l'établissement d'un modèle mathématique. L'objectif de cette thèse n'est pas la construction d'un modèle complet qui tient compte de tous les phénomènes électromagnétiques de la machine. Néanmoins, le modèle doit être en mesure de bien reproduire le comportement électrique et mécanique de la machine. Pour ces raisons et dans le but de faciliter la modélisation, des hypothèses simplificatrices ci-dessous seront prises en compte :

- ✓ La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- ✓ Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligeable.
- ✓ La distribution des forces électromotrices le long de l'entrefer est supposée sinusoïdale.
- ✓ Au niveau du stator, les trois phases sont symétriques, leurs résistances et inductances sont identiques.
- ✓ La distribution du champ d'induction créé par l'aimant est purement sinusoïdale.
- ✓ La machine synchrone à aimants permanents est supposée symétrique et linéaire.
- ✓ L'interaction magnétique entre les aimants et les encoches est supposé négligeable.

A l'instar des autres types de machines électriques, une MSAP est gouvernée par trois types d'équations : les équations magnétiques (relation entre courants et flux), les équations électriques (relation entre courants et tensions) et les équations mécaniques (conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique ou l'inverse dans le cas de fonctionnement génératrice). Dans un premier, nous présentons la mise en équation de la machine dans le repère triphasé lié au stator, ensuite nous entamons la mise en équation dans le repère diphasé dq. La figure 2.13 illustre une représentation simplifiée d'une MSAP dans le repère triphasé (abc) et le repère diphasé (dq).

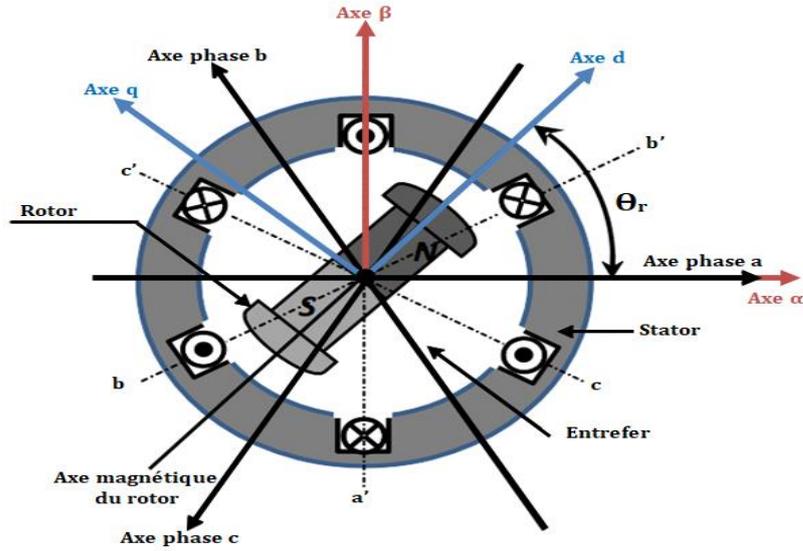


Figure 2. 13: Représentation d'une MSAP [51].

2.5.3 Mise en équation d'une MSAP

Les équations de tension dans un repère fixe lié au stator sont décrites par l'équation (2.13).

$$\begin{cases} V_a = R_s \cdot I_a + L_s \cdot \frac{dI_a}{dt} + e_a \\ V_b = R_s \cdot I_b + L_s \cdot \frac{dI_b}{dt} + e_b \\ V_c = R_s \cdot I_c + L_s \cdot \frac{dI_c}{dt} + e_c \end{cases} \quad (2.13)$$

Dans l'équation (2.13), V_i et I_i désignent respectivement la tension et le courant aux bornes de l'enroulement i , R_s et L_s sont respectivement la résistance et l'inductance cyclique par phase. Les forces électromotrices des enroulements statoriques ont pour expression :

$$\begin{cases} e_a = \frac{d\phi_a}{dt} = -p \cdot \Omega \cdot \phi_r \cdot \sin(p \cdot \theta_r) \\ e_b = \frac{d\phi_b}{dt} = -p \cdot \Omega \cdot \phi_r \cdot \sin\left(p \cdot \theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ e_c = \frac{d\phi_c}{dt} = -p \cdot \Omega \cdot \phi_r \cdot \sin\left(p \cdot \theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2.14)$$

Dans cette équation, ϕ_i désigne le flux magnétique totale dans l'enroulement d'indice i , p désigne le nombre de paire de pôles, ϕ_r est le flux des aimants permanents du rotor, Ω et θ_r sont respectivement la vitesse et la position mécanique. Comme les enroulements statoriques sont couplés en étoile à neutre isolé, la somme des courants instantanés statoriques est nulle, de sorte qu'il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou de flux, elle n'intervient pas dans le couple. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes. Pour simplifier le système, nous utilisons un modèle dans le repère de Park, ce qui transforme les grandeurs sinusoïdales

triphasées en grandeurs continues diphasées (V_d, V_q et I_d, I_q). Le repère de Park est en fait un repère diphasé, équivalent au repère triphasé, plus simple à manipuler car les grandeurs électriques évoluent comme des grandeurs continues. Le passage d'un repère à un autre repère peut se faire à l'aide de la transformation de Park décrites par les équations (2.15) et (2.16), où $P(\theta)$ est la matrice de passage appelée matrice de Park [54].

$$\begin{cases} V_{dq} = [P(\theta)] \cdot [V_{abc}] \\ I_{dq} = [P(\theta)] \cdot [I_{abc}] \end{cases} \quad (2.15)$$

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Après le développement des équations (2.13), (2.14), (2.15) et (2.16) nous obtenons les équations de tension de la MSAP dans le repère diphasé dq décrites dans l'équation (2.17).

$$\begin{cases} V_d = R_s \cdot I_d + L_d \cdot \frac{dI_d}{dt} - p \cdot \Omega \cdot L_q \cdot I_q \\ V_q = R_s \cdot I_q + L_q \cdot \frac{dI_q}{dt} + p \cdot \Omega \cdot (L_d \cdot I_d + \phi_r) \end{cases} \quad (2.17)$$

I_d, I_q sont les courants statoriques dans le repère de Park. V_d, V_q sont les tensions statoriques dans le repère de Park, L_d et L_q sont les inductances cycliques statoriques dans le repère de Park. Les équations des flux et des FEM dans le repère de Park sont données par le système d'équations (2.18).

$$\begin{cases} e_{rd} = -p \cdot \Omega \cdot \phi_q = -p \cdot \Omega \cdot L_q \cdot I_q \\ e_{rq} = -p \cdot \Omega \cdot \phi_d = p \cdot \Omega \cdot (L_d \cdot I_d + \Phi_r) \end{cases} \quad (2.18)$$

L'expression du couple moteur est représentée comme suit :

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\phi_d \cdot I_q - \phi_q \cdot I_d) = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\phi_r - (L_q - L_d) \cdot I_d) \cdot I_q \quad (2.19)$$

La MSAP étant à pôles lisses ($L_d=L_q$), l'expression du couple moteur devient :

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \phi_r \cdot I_q \quad (2.20)$$

La deuxième loi de Newton nous permet d'obtenir l'équation du mouvement qui traduit la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique (ou l'inverse dans le cas d'un fonctionnement génératrice), l'équation mécanique de la MSAP est présentée par l'équation (2.21).

$$J \cdot \frac{d\Omega}{dt} + f_v \cdot \Omega = C_e - C_r \quad (2.21)$$

Où C_e et C_r sont respectivement le couple moteur fourni par la machine et le couple résistant, f_v est le coefficient de frottement visqueux, J est le moment d'inertie du rotor et la charge associée et Ω est la vitesse mécanique. L'expression qui relie la vitesse mécanique avec la vitesse électrique ω est donnée dans l'équation (2.22).

$$\Omega = \frac{\omega}{p} \quad (2.22)$$

2.6 Modélisation de la pile et unités de stockage d'énergie électrique

2.6.1 Technologies de piles à combustible

Les piles à combustibles sont généralement classées selon leur température de fonctionnement ou le type d'électrolyte utilisé. Le choix d'une pile à combustible dépend du cahier des charges qui impose les critères. Dans la majorité des cas, les critères de sélection sont [55] :

- ✓ La température de fonctionnement : la température est en relation directe avec le temps de démarrage désiré. Les piles à haute température mettront plusieurs dizaines de minutes pour atteindre la température nominale de fonctionnement. Les piles basses température nécessiteront moins de temps (quelques minutes).
- ✓ La durée de vie : les piles à base d'électrolyte liquide sont plus exposées aux corrosions. Les piles à base d'électrolyte solide ont des durées de vie plus élevées.
- ✓ Le poids et l'encombrement : les contraintes du poids et de l'encombrement sont déterminantes surtout pour les applications de transport par exemple.
- ✓ Le coût : en comparaison avec les unités de stockage d'énergie, les piles à combustibles sont relativement très onéreuses.

En résumé, les piles à combustibles à haute température sont beaucoup plus adaptées aux applications stationnaires (production de l'énergie électrique, cogénération). Pour le cas des applications de transport comme le cas de cette étude, ce sont les piles à basse température qui sont plus adaptées en l'occurrence les piles à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Elles bénéficient d'un temps de démarrage réduit, un coût abordable, une bonne durée de vie, un bon rendement et une densité de courant élevée. Pour toutes ces raisons, la PEMFC est depuis longtemps le meilleur choix pour les applications de transport plus précisément les véhicules à usage particulier et les véhicules lourds. Elles ont été adoptées par plusieurs constructeurs de véhicules électriques hybrides [55]. Le tableau 2.1 présente les caractéristiques des différentes technologies de piles à combustibles. Il est à noter que cette liste est non exhaustive.

Tableau 2. 1: Caractéristiques des différentes technologies de piles à combustibles.

Caractéristiques	Pile alcaline (AFC)	Pile à membrane échangeuse de proton (PEMFC)	Pile au méthanol direct (DMFC)	Pile à acide phosphorique (PAFC)	Pile à carbonate fondu (MCFC)	Pile à Oxyde solide (SOFC)
Température de fonctionnement	Basse température			Haute température		
	50 à 250 °C	70 à 100 °C	70 à 90 °C	150 à 220 °C	600 à 800 °C	700 à 1050 °C
Electrolyte	Potasse liquide (KOH)	Membrane en polymère solide	Membrane en polymère solide	Acide phosphorique liquide	Sel de carbonate fondu liquide	Céramique solide
Gamme de puissance	1W à 100KW	10mW à 1MW	10mW à 1MW	200KW à 10MW	1KW à 10MW	1KW à 10MW
Domaine d'application	Spatiale, défense, équipements portatifs	Transport, stationnaire, spatiale, équipements portatifs	Transport, équipements portatifs	Transport, stationnaire, cogénération	Stationnaire, cogénération	Stationnaire, cogénération
Rendement électrique	55 – 60%	30 – 45%	30 – 45%	35 – 45% 75% en cogénération	50 – 60%	50 – 55% 70% en cogénération

La PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) trouve son application dans plusieurs domaines. Elle peut être utilisée comme générateur de secours dans les hôpitaux ou en plus de l'énergie électrique, la chaleur générée peut aussi être exploitée (cogénération). Le même système peut être adopté pour les applications sur sites isolés (Antennes de relais, base de télécommunications, etc.) [56].

Grâce à leur grande énergie massique, les piles à combustibles de type PEM sont largement exploités dans les applications de transport (fluvial, maritime, ferroviaire, aéronautique, véhicules de manutention, etc.). Néanmoins leur réelle application se manifeste dans les véhicules terrestres où elles sont généralement assistées par une source secondaire de type supercondensateurs ou de batteries à densité de puissance élevée. Les dispositifs portatifs (lampe, ordinateur portable, etc.) peuvent aussi utiliser des PEMFC, dans ce cas le combustible est stockée dans des petites recharges [56]. Enfin, les piles à combustibles sont aussi envisagées pour les contextes des réseaux de distribution, des micro-réseaux ruraux isolés et des systèmes autonomes de production d'énergie électrique [57]. En outre, les PEMFC sont fortement envisageables pour le stockage de l'énergie provenant des champs d'éoliennes [58]. Le marché de développement des piles à combustibles est en grande expansion, surtout pour les applications de transport (véhicules de manutention et véhicules à usage particulier) où l'objectif principal est la réduction de la consommation des produits pétroliers et les émissions de gaz à effet de serre, mais le coût élevé des PEMFC en comparaison avec les moteurs à combustion reste un grand obstacle à surmonter.

La courbe de polarisation d'une PEMFC est présentée par la figure 2.14. La réponse en tension d'une PEMFC est la somme de quatre termes : la tension thermodynamique réversible (tension à vide), la surtension d'activation, la surtension ohmique et la surtension de concentration [59][60]. La tension aux bornes de la PEMFC diminue au fur et à mesure que le courant augmente.

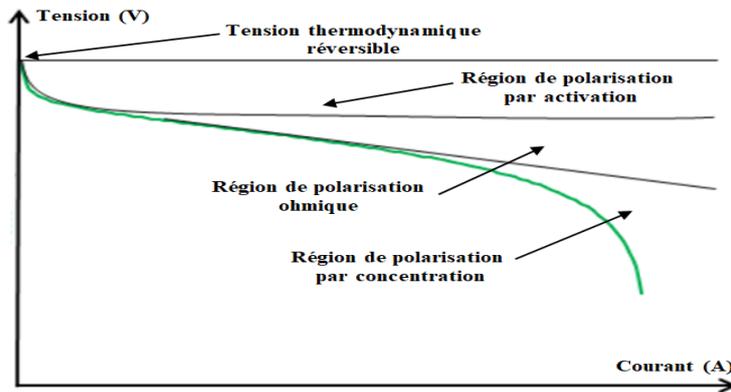


Figure 2. 14: Caractéristique tension-courant d'une PEMFC [61].

Trois types de pertes sont responsables de cette chute de tension :

- Les pertes d'activation : le démarrage des réactions chimiques au niveau de l'anode et la cathode est responsable des pertes d'activation. En effet le transfert des électrons nécessite des surtensions ce qui diminue le potentiel de la cellule. Les pertes d'activation sont principalement dues aux réactions au niveau de la cathode.
- Les pertes ohmiques : la chute de tension ohmique est due à la résistance des électrodes et des plaques bipolaires qui s'oppose au passage des électrons et des protons. Les pertes ohmiques sont proportionnelles au courant traversant la cellule.
- Les pertes par concentration : ce type de perte entre en jeu lorsque la pression des gaz à travers les couches de diffusion est insuffisante par rapport au courant demandé. Ce phénomène est observé pour les densités de courant élevées.

Les piles à combustibles de type PEM sont des convertisseurs d'énergie propre et performant, lorsqu'elles sont associées à un moteur électrique, elles peuvent remplacer les moteurs à combustion interne en termes d'autonomie (énergie spécifique). Cependant, la densité de puissance des ICE reste largement supérieure à celle des piles à combustible. L'intégration des PEMFC dans les applications de transport a fait l'objet de plusieurs applications et travaux de recherche [61][62][63].

2.6.2 Modèle de la PAC

L'électricité d'une PEMFC est générée par une réaction électrochimique. La tension de sortie V_{Cell} d'une cellule est donnée par l'équation (2.23), où E_{Nernst} est le potentiel thermodynamique de la cellule qui dépend de la température de la cellule T_{Fc} , de la pression partielle de l'hydrogène P_{H_2} et de la pression partielle de l'oxygène P_{O_2} , sa valeur est obtenue à partir de l'équation (2.24).

$$V_{Cell} = E_{Nernst} - V_{Act} - V_{Ohm} - V_{Conc} \quad (2.23)$$

$$E_{Nernst} = 1,229 - 0,85 \cdot 10^{-3} \cdot (T_{Fc} - 298,15) + 4,3085 \cdot 10^{-5} \cdot [\ln(P_{H_2}) + 0,5 \cdot \ln(P_{O_2})] \quad (2.24)$$

La surtension d'activation V_{Act} du côté de l'anode et de la cathode peut être déduite en utilisant l'équation (2.25).

$$V_{Act} = -\left[\xi_1 + \xi_2 \cdot T_{Fc} + \xi_3 \cdot T_{Fc} \cdot \ln(C_{O_2}) + \xi_4 \cdot T_{Fc} \cdot \ln(I_{Fc}) \right] \quad (2.25)$$

Où ξ_i ($i \in \{1, 2, 3, 4\}$) sont les coefficients d'ajustement, I_{Fc} est le courant de la pile. C_{O_2} désigne la concentration d'oxygène, elle est calculée par l'équation (2.26).

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5,08 \cdot 10^6 \cdot e^{\frac{-498}{T_{Fc}}}} \quad (2.26)$$

La chute de tension ohmique V_{Ohm} est donnée par l'équation (2.27). R_C est une valeur constante, R_M est la résistance équivalente de la membrane, sa valeur est calculée via l'équation 2.28.

$$V_{Ohm} = (R_C + R_M) \cdot I_{Fc} \quad (2.27)$$

$$R_M = \frac{\rho_M \cdot l}{A} \quad (2.28)$$

Dans l'expression de R_M , ρ_M désigne la résistivité spécifique de la membrane qui peut être obtenue par l'équation suivante :

$$\rho_M = \frac{181,6 \cdot \left[1 + 0,03 \cdot \left(\frac{I_{Fc}}{A} \right) + 0,062 \cdot \left(\frac{T_{Fc}}{303} \right)^2 \cdot \left(\frac{I_{Fc}}{A} \right)^{2,5} \right]}{\left[\lambda_M - 0,634 - 3 \cdot \left(\frac{I_{Fc}}{A} \right) \right] \cdot e^{\left[4,18 \cdot \left(T_{Fc} - \frac{303}{T_{Fc}} \right) \right]}} \quad (2.29)$$

l et A représentent respectivement l'épaisseur de la membrane et la surface active de la cellule. λ_M est la teneur moyenne en eau dans la membrane. La chute de tension de concentration V_{Conc} est donnée par l'équation (2.30), où j désigne la densité du courant.

$$\begin{cases} V_{Conc} = \frac{R \cdot T_{Fc}}{2 \cdot F} \cdot \ln \left(1 - \frac{j}{j_{Max}} \right) \\ j = \frac{I_{Fc}}{A} \end{cases} \quad (2.30)$$

Des nombreuses études proposent des modèles dynamiques de la PEMFC. Pour le modèle présenté dans la référence [60], le circuit équivalent à double couche variable est utilisé pour simuler le phénomène de transitoire électrochimique de la PEMFC, où la capacité variable est calculée via l'équation (2.31),

$$C_{Act} = \frac{1}{\zeta_5 \cdot R_{Act}} \quad (2.31)$$

Où ζ_5 est une constante, R_{Act} est la résistance de polarisation d'activation donnée par l'équation (2.32).

$$R_{Act} = \frac{V_{Act}}{I_{Fc}} \quad (2.32)$$

La surtension d'activation V_{Act} est remplacée par la tension de condensateur V_C qui est définie par l'équation (2.33).

$$\frac{dV_C}{dt} = \frac{1}{C_{Act}} \cdot \left(I_{Fc} - \frac{V_C}{R_{Act}} \right) \quad (2.33)$$

Par conséquent, le modèle dynamique de la cellule peut être exprimé par l'équation (2.34). La tension de sortie V_{FC} de la pile est finalement obtenue par l'équation (2.35), où N_{S_Fc} est le nombre de cellules en série.

$$V_{Cell} = E_{Nerst} - V_C - V_{Ohm} - V_{Conc} \quad (2.34)$$

$$V_{Fc} = N_{S_Fc} \cdot V_{Cell} \quad (2.35)$$

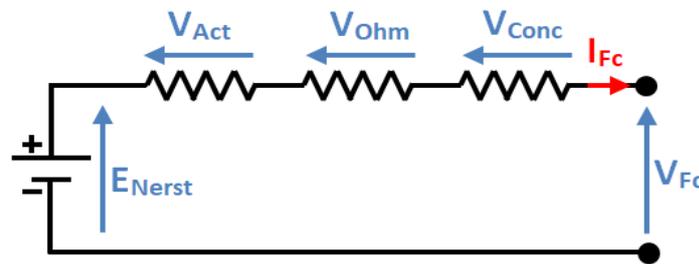


Figure 2. 15: Schéma électrique simplifié d'une pile à combustible.

La figure 2.15 illustre le schéma électrique équivalent d'une PEMFC. Les paramètres du modèle de la PEMFC utilisé dans cette étude sont présentés dans le tableau 2.2. Les résultats de simulations et de validation expérimentale de la PEMFC Horizon H-100 montrent que le modèle obtenu est précis [60]. La tension de la PEMFC et sa courbe de puissance sont présentées par la figure 2.16.

Tableau 2. 2: Paramètres du modèle de la PEMFC Horizon H-100.

Paramètre	Symbole	Valeur
Température	T_{Fc}	333.15K
Pression partielle de l'hydrogène	P_{H2}	2atm
Pression partielle de l'oxygène	P_{O2}	0.21atm
Résistance ohmique	R_C	20.5mΩ
Epaisseur de la membrane	l	0.0178cm
Surface active de la cellule	A	22.5cm ²
Teneur moyen en eau de la membrane	λ_M	11
Constante de gaz parfaits	R	8.3145J/(mol.K)
Constante de Faraday	F	96.485C/mol
Densité maximale du courant	j_{max}	0.622A/cm ²
Nombre de cellules en série	N_{S_Fc}	20
Coefficients d'ajustement	$\xi_1, \xi_2, \xi_3, \xi_4, \xi_5$	-1.09, 3.48×10^{-3} , 5.8×10^{-5} , -9×10^{-5} , 20
Densité de puissance	ρ_{PFc}	59W/Kg

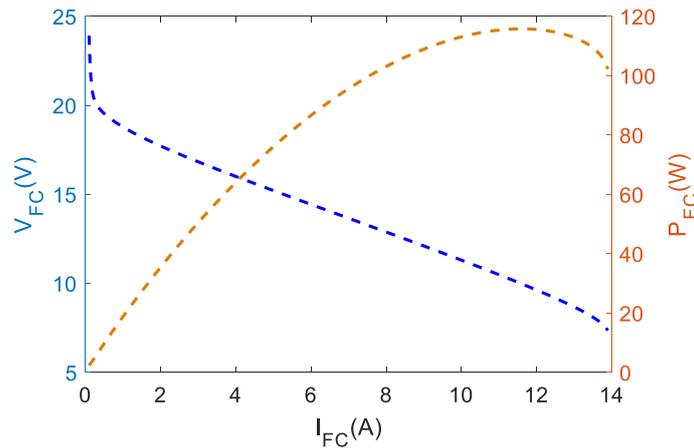


Figure 2. 16: Tension et puissance du modèle de la PAC Horizon H-100 [60].

2.6.3 Modélisation comportementale des batteries

L'élaboration d'un modèle adapté aux problématiques de gestion d'énergie est très importante car le modèle permettra de tester les lois de commandes et les stratégies de gestion d'énergie au niveau de l'environnement de simulation avant d'entamer l'étape de la validation expérimentale. Pour les électrotechniciens, seul le comportement électrique de l'élément de stockage est déterminant. Néanmoins si la modélisation prend en compte les phénomènes physiques, le modèle sera beaucoup plus précis. Il faut noter que la prise en compte des phénomènes physiques n'est pas toujours une tâche aisée, c'est la raison pour laquelle nous nous limiterons au comportement électrique des SSE. Nous développerons donc un modèle de type 'circuit électrique équivalent' adapté aux besoins des ingénieurs électriciens et qui ne prend pas en compte tous les phénomènes physico-chimiques. Cependant son usage est relativement commode et satisfaisant pour la validation des lois de commandes et des stratégies de gestion d'énergie pour les systèmes multi-sources.

En plus des modèles de type circuit électrique équivalent, la littérature scientifique présente d'autres approches de modélisation des SSE à savoir les modèles électrochimiques et les modèles de type boîte noire. Les modèles électrochimiques sont connus pour leur complexité car ils décrivent avec précision les phénomènes électrochimiques liés à la génération de l'énergie au sein des SSE. Le modèle mathématique résultant est dans la majorité des cas, un système d'équations aux dérivées partielles couplées. Ce type de modèle est donc capable de reproduire avec une grande précision le comportement de l'unité de stockage mais en revanche, il nécessite un temps de calcul très important. Cela empêche l'utilisation de ce type de modèle pour les simulations « off line » et temps réel. Les modèles de type boîte noire sont des modèles où la connaissance des phénomènes électrochimiques n'est pas indispensable. Ces modèles peuvent reproduire le comportement de l'élément de stockage grâce à une phase préalable d'apprentissage. Afin de bien entraîner le modèle pour simuler le comportement du SSE, la phase d'apprentissage est réalisée avec des données réelles à savoir l'état de charge, le courant, la tension, la température etc. Ces données sont appelées données d'entraînement du modèle. Les performances de ce type de modèle dépendent principalement de l'expérience acquise lors de la phase d'apprentissage autrement dit, la précision de ces modèles dépend des données et de la méthode d'entraînement. Comme les modèles électrochimiques, les modèles de type boîte noire ne sont pas adaptés pour notre

étude. Ils sont généralement utilisés pour l'estimation de l'état de charge (SoC) et l'état de santé des batteries (SoH). Avant d'entamer la démarche de modélisation, il faut choisir la topologie visée (nombre de branches) ainsi que la méthode d'identification des paramètres. Il est à noter que le nombre de branches contenues dans la topologie est synonyme de précision. Plus le nombre de branches est élevé plus le modèle est précis mais par contre le modèle devient plus complexe.

2.6.4 Maturité et performances des technologies des batteries

La figure 2.17 révèle les principales caractéristiques ainsi que le niveau de maturité et des performances des technologies des batteries [63][25]. Les technologies les plus matures sont : les batteries au Plomb, les batteries nickel-cadmium et les batteries nickel-hydrure métallique. Cependant ces technologies ne sont pas adaptées aux exigences des systèmes de traction électrique. En fait leurs performances sont très faibles pour ce type d'application. Les batteries à base de lithium sont plus performantes que celles citées précédemment. Le niveau de maturité des batteries lithium n'est pas encore satisfaisant, cela n'empêche pas qu'elle soit le premier choix pour les constructeurs des VE et des VEHs. Les performances des batteries lithium nécessitent des améliorations surtout en ce qui concerne le prix, la sécurité d'usage, les densités de puissance et le degré d'autonomie. Actuellement ce type de batterie n'est pas en mesure de satisfaire tous ces critères ce qui impacte le prix des VE et des VEHs, le nombre des véhicules vendus et le degré de satisfaction vis-à-vis de leur utilisation. D'autres technologies peuvent intéresser les constructeurs du secteur automobile à savoir : les batteries Li-S (lithium-Soufre) et les batteries Li-Air (lithium-air). Les performances de ces batteries sont nettement plus attrayantes que les batteries lithium-ion, cependant leur niveau de maturité empêche une utilisation immédiate dans les applications embarquées.

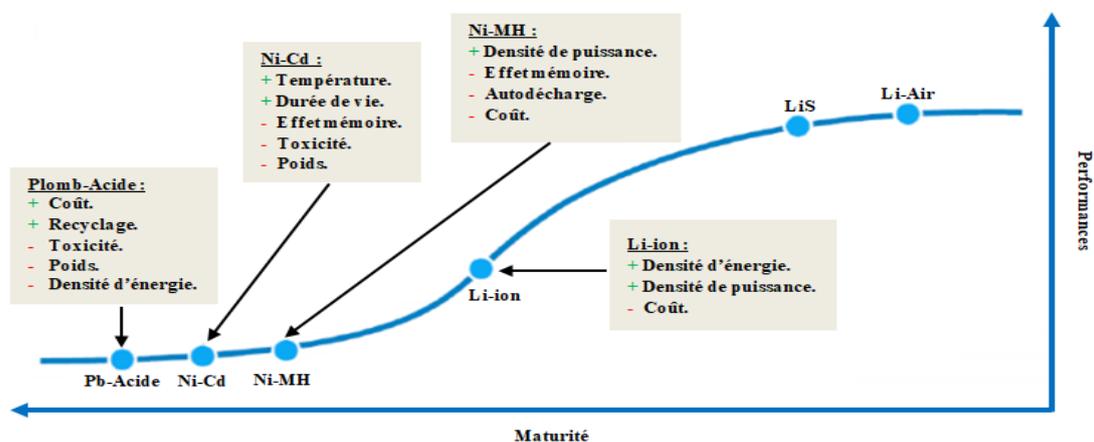


Figure 2. 17: Caractéristiques et niveau de maturité des différentes technologies de batteries.

Le mode fonctionnement des batteries au lithium repose sur une réaction électrochimique où l'élément principal est le lithium. Ce métal possède la propriété de céder facilement un électron, il devient donc un Ion, d'où l'appellation 'batterie lithium-ion'. Durant la phase de décharge de la batterie, les électrons circulent de l'anode vers la cathode à travers un circuit électrique externe, en même temps les ions circulent de l'anode vers la cathode par l'intermédiaire de l'électrolyte. Durant la phase de charge, l'écoulement des ions et des électrons est inversé et s'effectue de la cathode vers l'anode. Malgré les bonnes performances de ce type de batterie, le coût élevé d'investissement est un réel obstacle devant son

épanouissement. Actuellement, il existe plusieurs types de batteries lithium, elles se différencient suivant le type du matériau utilisé dans la cathode (électrode positive). Le type de la batterie est désigné suivant les performances visées par l'application souhaitée. Pour les applications de transport, les performances recherchées dans une batterie sont : le coût raisonnable, un usage et fonctionnement sécuritaire, une très bonne autonomie, une durée de vie élevée et une possibilité de recyclage. Ces critères sont utilisés pour comparer les technologies de batteries. Suivant le type de la cathode, il existe trois types de batteries lithium ion : les batteries aux cathodes à base de dioxyde de métal, les batteries aux cathodes dites 'spinelles' et les batteries utilisant des cathodes à base des métaux de transition. Le tableau 2.3 présente une liste non exhaustive des avantages et des inconvénients des batteries à base de lithium [64][65].

Tableau 2. 3: Avantages et inconvénients des différentes technologies de batteries lithium.

Type de batteries	Avantages	Inconvénients
Batterie Lithium Cobalt Oxide (LiCoO ₂)	- Energie spécifique élevée.	- Durée de vie relativement courte. - Faible stabilité thermique. - Capacité de charge limitée (puissance spécifique).
Batterie Lithium Manganese Oxide (LiMn ₂ O ₄)	- Résistance interne plus faible et une meilleure gestion du courant. - Stabilité thermique élevée et une bonne sécurité d'usage.	- Le nombre de cycle et la durée de vie sont limités.
Batterie Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide (LiNiMnCoO ₂ ou NMC)	- Ce type de batterie peut être adapté pour servir des cellules énergétiques ou des cellules de puissance. - Un taux d'auto-échauffement faible. - Une faible résistance interne.	- Coût élevé. - Durée de vie relativement faible.
Batterie Lithium Fer Phosphate (LiFePO ₄)	- Une faible résistance interne. - Un fort courant nominal et une longue durée de vie. - Une bonne stabilité thermique. - Une bonne sécurité d'usage.	- Autodécharge plus élevée que les autres batteries à base de Lithium. - Energie spécifique limitée.
Batterie Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide (LiNiCoAlO ₂)	- Une énergie spécifique élevée. - Une puissance spécifique raisonnablement bonne. - Une grande durée de vie.	- La sécurité d'usage et moins bonne en comparaison avec les autres technologies. - Le coût est relativement élevé.
Batterie Lithium Titanate (Li ₄ Ti ₅ O ₁₂)	- Recharge rapide. - Courant de décharge élevé. - un nombre de cycle élevé. - une bonne stabilité thermique à haute température et de bonnes caractéristiques de décharge à basse température.	- Coût très élevé en comparaison avec les autres technologies de batterie Lithium. - Energie spécifique relativement faible.

Dans le laboratoire GREAH, nous disposons de la technologie Lithium Fer Phosphate (100Ah, 3.2V) pour valider expérimentalement les approches de gestion d'énergie développées. Mais avant et dans le but de valider les stratégies de gestion d'énergie au niveau de l'environnement de simulation, nous proposons dans le prochain paragraphe un modèle à base de circuit électrique équivalent pour la batterie LFP.

2.6.5 Modèle de la batterie LiFePO4 à deux constantes de temps

De nombreux travaux de recherches ont été menés afin de trouver des modèles électriques capables de décrire le comportement dynamique tout en évitant la complexité de la modélisation des interactions électrochimiques au sein des batteries lithium-ion. Pour des raisons de simplicité, ces modèles contiennent dans la majorité des cas une source de tension modélisant la tension en circuit ouvert en série avec une résistance modélisant les pertes ohmiques à l'intérieur de la batterie. Les paramètres de ces modèles sont généralement fixes. Il s'agit dans ce cas d'un modèle de base de la batterie autrement dit modèle constructeur. Ces modèles ne reproduisent pas de façon précise le comportement des batteries surtout dans les phases transitoires de leur fonctionnement et ne tiennent pas compte du phénomène d'hystérésis (différence entre le comportement en charge et en décharge de la batterie). Pour les simulations des systèmes multi-sources, ces modèles ne seront pas en mesure de reproduire le comportement réel des batteries. Dans le but de remédier aux inconvénients des modèles sans constante de temps des modèles plus sophistiqués sont utilisés.

Dans les modèles à une constante de temps, une branche RC est ajoutée en série avec la source de tension $V_{OC}(SoC)$ et la résistance série du modèle de base. L'objectif étant de se rapprocher du comportement dynamique de la batterie dans les phases de charge et décharge [65][66][67]. Néanmoins, l'ajout d'une branche RC ne reproduit pas totalement le comportement dynamique de la batterie avec une très grande précision. En effet si l'application en question nécessite la reproduction du modèle de la batterie avec une très grande précision, il est nécessaire d'ajouter d'autres branches. L'inconvénient de cette démarche est que le modèle devient beaucoup plus compliqué. Certes, le nombre de branches contenus dans un modèle à circuit électrique équivalent est synonyme de précision mais il est aussi synonyme de complexité du modèle surtout au niveau de la mise en œuvre dans le logiciel de simulation et dans l'identification des paramètres.

Pour ce travail, nous avons choisis un modèle à deux constantes de temps [68]. C'est en effet, le type de modèle le plus utilisé pour les batteries lithium. Ce type de modèle reproduit bien le comportement des batteries lithium en régimes transitoires, il est donc adapté pour les simulations de gestion d'énergie des systèmes multi-sources. En outre, la mise en équation de ce modèle n'est pas compliquée ce qui motive son utilisation pour notre étude. En plus de la résistance interne de la batterie R_{SBat} et de la source de tension $V_{OC}(SoC)$, le modèle proposé contient deux branches RC permettant de prendre en compte le comportement de la batterie à court terme (interaction dynamique de la batterie) et à long terme (durant la phase du repos de la batterie après la coupure du courant). Il s'agit donc d'un modèle à deux constantes de temps (deux branches RC).

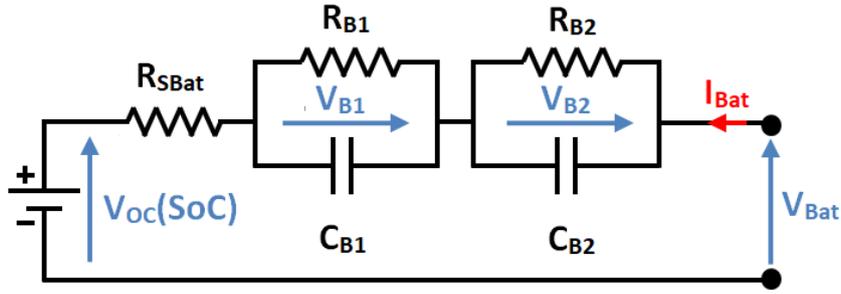


Figure 2. 18: Circuit électrique équivalent à deux constantes de temps.

La figure 2.18 illustre le schéma équivalent du modèle à deux constantes de temps, où $V_{OC}(SoC)$ et R_{SBat} sont respectivement la tension en circuit ouvert et la résistance série de la batterie. R_{B1} et C_{B1} sont respectivement la résistance et la capacité de la 1^{ère} branche RC décrivant le comportement de la batterie à court terme. R_{B2} et C_{B2} sont respectivement la résistance et la capacité de la 2^{ème} branche RC décrivant le comportement de la batterie en moyen et long terme. Même si les valeurs des résistances et des capacités des deux branches varient en fonction de $V_{OC}(SoC)$, les constantes de temps respectives à savoir : $\tau_{B1}=R_{B1}\cdot C_{B1}$ et $\tau_{B2}=R_{B2}\cdot C_{B2}$ restent inchangées (lorsque les résistances R_{B1} et R_{B2} diminuent les capacités C_{B1} et C_{B2} augmentent et vice-versa). Les expressions de $V_{OC}(SoC)$ et R_{SBat} diffèrent selon le mode de fonctionnement de la batterie (phase de charge ou décharge). Les expressions analytiques régissant le fonctionnement de ce modèle sont présentées par l'équation (2.36). Les paramètres sont identifiés à partir des données expérimentales obtenues à température ambiante sur des cellules de batterie LiFePO4 avec une tension maximale de 3,8V et une capacité nominale de 100Ah [63]. Pour de plus amples informations sur la procédure d'identification des paramètres du modèle, le lecteur se réfèrera aux travaux publiés dans les références [69][70][71][72][73][74][75][76]. Le tableau 2.4 résume les coefficients des expressions de la tension en circuit ouvert $V_{OC}(SoC)$ durant les phases de charge et décharge. Le tableau 2.5 contient l'ensemble des paramètres d'une cellule de batterie LiFePO4 (SP-LFP100AHA/3.2V). Il est à noter que lors des simulations du système multi-sources, le nombre de cellules en série et en parallèle résultant du dimensionnement sont pris en compte dans les expressions du modèle de la batterie.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 SoC = SoC_0 - \int_0^t \frac{I_{Bat} \cdot dt}{3600 \cdot Q_{cell}} \\
 \tau_{B1,B2} = R_{B1,B2} \cdot C_{B1,B2} \\
 V_{OC}(SoC) = -a_5 \cdot SoC^5 + a_4 \cdot SoC^4 - a_3 \cdot SoC^3 + a_2 \cdot SoC^2 + a_1 \cdot SoC + a_0 \quad (\text{si } I_{Bat} < 0) \\
 V_{OC}(SoC) = -a_5 \cdot SoC^5 + a_4 \cdot SoC^4 - a_3 \cdot SoC^3 + a_2 \cdot SoC^2 - a_1 \cdot SoC + a_0 \quad (\text{si } I_{Bat} \geq 0) \\
 V_{B1,B2} = R_{B1,B2} \cdot \left(I_{Bat} - C_{B1,B2} \cdot \frac{dV_{B1,B2}}{dt} \right) \\
 V_{Bat} = V_{OC}(SoC) + R_{SBat_Ch/Dch} \cdot I_{Bat} + V_{B1} + V_{B2} \\
 C_{B1,B2} = K_{LFP} \cdot V_{OC}(SoC)
 \end{array} \right. \quad (2.36)$$

Tableau 2. 4: Coefficients des expressions du VOC(SoC) en charge et décharge.

Mode de fonctionnement	a_0	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5
Charge de la batterie ($I_{Bat} < 0$)	1,13	9,89	12,21	27,03	65,21	33,64
Décharge de la batterie ($I_{Bat} \geq 0$)	2,54	13,72	82,41	189,51	194,6	72,97

Tableau 2. 5: Paramètres du modèle de la batterie LiFePO4 (SP-LFP100AHA/3.2V).

Paramètre	Symbole	Valeur
Plage de fonctionnement en tension	V_{Batmin} à V_{Batmax}	2,8V à 3,8V
Résistance de la batterie en mode charge	R_{SBat_Ch}	0,83m Ω
Résistance de la batterie en mode décharge	R_{Sbat_Dch}	0,69m Ω
Constante de temps correspondante à la branche 1	τ_{B1}	8s
Constante de temps correspondante à la branche 2	τ_{B2}	160s
Capacité spécifique de la batterie	K_{LFP}	9500F/V
Densité de puissance	ρ_{PBat}	310W/Kg
Densité d'énergie	ρ_{EBat}	102Wh/Kg

2.6.6 Validation expérimentale du modèle de la batterie à deux constantes de temps

Dans le but de tester les performances du modèle développé, la batterie est soumise au courant de charge/décharge illustré par la figure 2.19. La fréquence des fluctuations est égale à 0.5 Hz avec un taux d'ondulation de 17% de la valeur moyenne du courant continu de 30A. Les résultats de simulations et d'expérimentation sont présentés sur la figure 2.20, où les courbes sont proches. Le modèle proposé reproduit de manière satisfaisante le comportement dynamique de la batterie lors des phases de charge et décharge. La figure 2.21 présente l'écart entre la mesure et les résultats de simulations, où il ne dépasse pas 1%. La réponse du modèle à deux constantes de temps est satisfaisante et largement suffisante pour une application de gestion d'énergie électrique multi-sources.

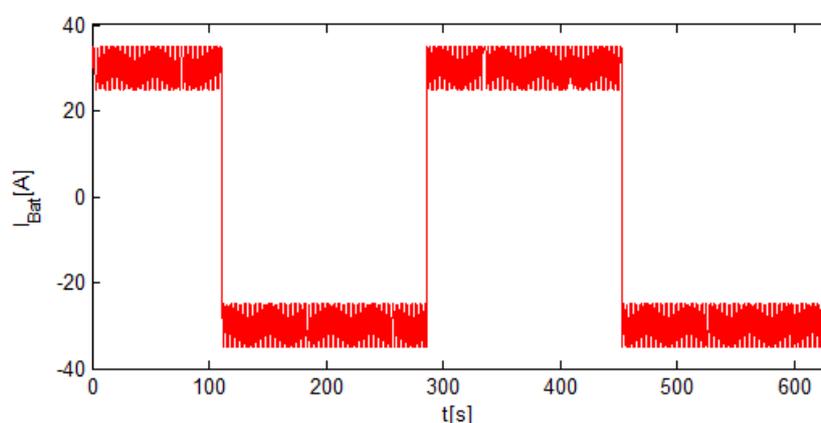


Figure 2. 19: Profil du courant de test de la batterie LFP.

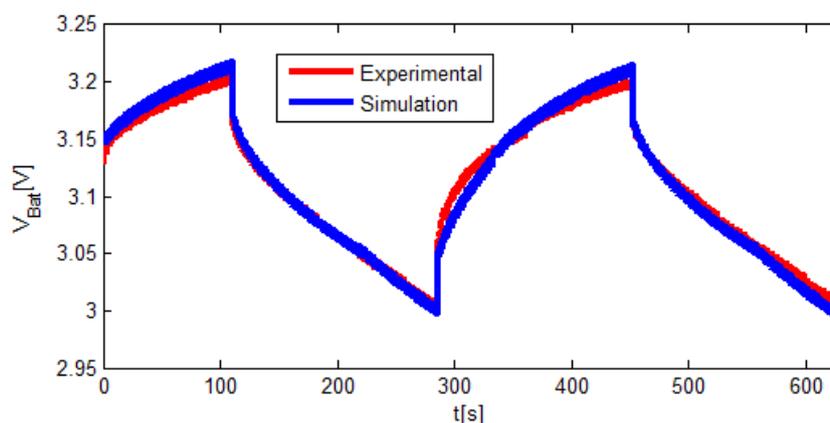


Figure 2. 20: Comparaison entre les résultats de simulation et d'expérimentation pour la batterie LFP.

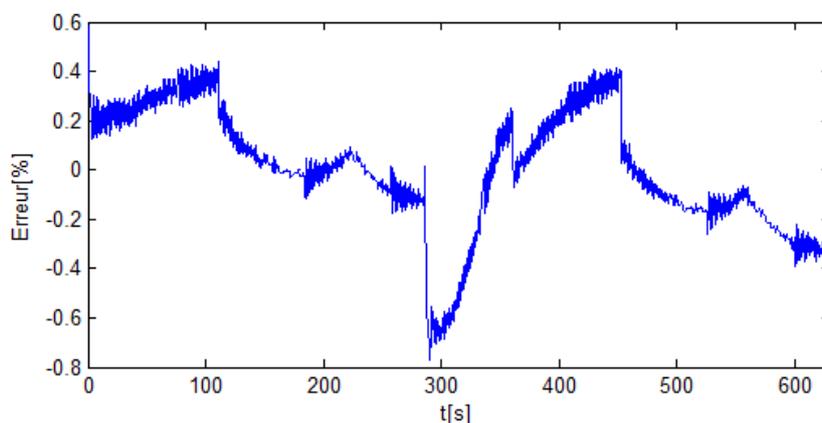


Figure 2. 21: Erreur entre le résultat expérimental et celui du modèle de simulation pour la batterie LFP.

2.7 Modélisation comportementale des supercondensateurs

Les supercondensateurs sont des éléments de stockage d'énergie électrique destinés aux applications nécessitant des appels de puissance importants. Le type de stockage de l'énergie électrique dans un supercondensateur se situe entre les deux types de stockage conventionnels : le stockage électrostatique (densité de puissance élevée et densité d'énergie faible) et le stockage électrochimique (densité de d'énergie élevée et densité de puissance faible). Cependant le stockage des charges dans un supercondensateur est principalement basé sur le stockage électrostatique des charges. Les supercondensateurs possèdent donc une densité de puissance plus importante que celle des batteries et une densité d'énergie plus grande que celle des condensateurs classiques. Actuellement, la technologie des supercondensateurs la plus répandue est celle où les électrodes sont à base de charbon actif. Vu que le stockage des charges électriques est principalement électrostatique, l'absence de véritables réactions chimiques permet une dynamique rapide ainsi qu'une durée de vie élevée (plus de 100 000 cycles) [77][31].

Dans la majorité des cas, les supercondensateurs sont utilisés comme une source tampon de puissance. Ils permettent le stockage et la restitution de l'énergie sur des courts horizons, ce qui est très utile lors des phases d'accélération et de freinage d'un véhicule électrique par exemple. Grâce à leur grande durée de vie, les supercondensateurs sont généralement associés à des sources à faible densité de puissance (batteries ou piles à combustibles), cela permet d'augmenter l'autonomie énergétique du système tout en évitant les profondes décharges lors des appels de puissance. Les principaux domaines d'application des supercondensateurs sont :

les alimentations sans interruption, les véhicules électriques et les véhicules électriques hybrides, les véhicules à usage spécifique (chariot élévateur, grues), les télécommunications, etc [29][31].

L'objectif de cette partie est l'établissement d'un modèle comportemental pour les supercondensateurs Boost-Cap (3000F/2.7V) qui repose sur un circuit électrique équivalent pas trop complexe et permettant de reproduire fidèlement le comportement d'un supercondensateur. Dans les prochains paragraphes, nous présenterons une liste non exhaustive des modèles des supercondensateurs ainsi que le modèle retenu pour la suite de ce travail de thèse.

2.7.1 Modèle constructeur et modèle à plusieurs branches

Le modèle de base des supercondensateurs contient une seule résistance et une seule capacité [78][79][80][81]. Ce modèle reproduit le comportement du supercondensateur en phase de charge et de décharge. Cependant, il est moins précis car il ne prend pas en compte la variation de la capacité en fonction de la tension et le phénomène de redistribution des charges après les phases de charge et de décharge.

Si l'on souhaite prendre en compte les aspects négligés dans le modèle constructeur (variation de la capacité en fonction de la tension et le phénomène de redistribution des charges), le modèle à trois branches RC (Figure 2.22) peut être une solution. Ce modèle est proposé par R.Bonert et L.Zubieta [81]. Le circuit électrique modélisant le supercondensateur contient trois branches RC en parallèle. Chaque branche représente un phénomène physique et possède donc sa propre constante de temps. La première branche qualifiée de branche principale reproduit les phénomènes de charge et de décharge du supercondensateur. Cette branche est composée d'une résistance R_i en série avec deux condensateurs en parallèle C_{i0} et C_{i1} . La capacité C_{i0} est indépendante de l'évolution de la tension tandis que C_{i1} varie en fonction de la tension du supercondensateur. La constante de temps de la branche principale est de l'ordre de la seconde. Le phénomène de redistribution des charges correspond à la deuxième branche. Cette branche est composée d'une résistance R_{rc} en série avec un condensateur C_{rc} , elle présente une constante de temps de l'ordre quelques minutes. La troisième branche composée d'une résistance R_1 en série avec un condensateur C_1 modélise le phénomène d'autodécharge. Sa constante de temps se rapproche de quelques dizaines de minutes. Dans la majorité des cas, la première et la deuxième branche sont suffisantes pour reproduire le comportement d'un supercondensateur en vue de son intégration dans les simulations des systèmes multi-sources. Le phénomène de l'autodécharge est négligeable car les supercondensateurs sont utilisés dans le but de répondre aux demandes instantanées de la charge alors que la constante de temps de la branche modélisant le phénomène de l'autodécharge est de l'ordre des dizaines de minutes.

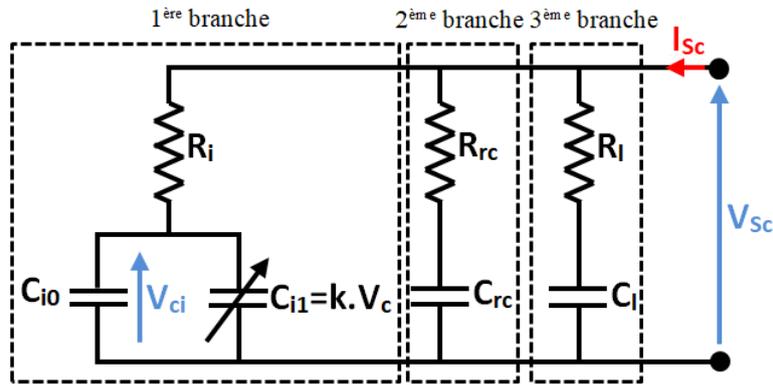


Figure 2. 22: Modèle de Zubieta et Bonert d'un supercondensateur.

2.7.2 Modèle de supercondensateurs Boost-Cap (3000F/2.7V) retenu pour la gestion d'énergie électrique

Plusieurs améliorations du modèle constructeur ont été proposées dans la littérature. Dans la majorité des cas, plus le modèle est précis, plus il est difficile à mettre en équation. En outre, un modèle précis prend en compte plus de phénomènes physiques et contient plus de paramètres. L'identification de ces derniers peut s'avérer difficile. Comme indiqué dans les paragraphes précédents, notre étude vise le développement d'une stratégie optimale de gestion d'énergie pour un système multi-sources (véhicule électrique). Ce type d'application n'exige pas un modèle sophistiqué, un modèle prenant en compte l'échange rapide de l'énergie pendant les phases de charge et décharge suffit. C'est la raison pour laquelle, nous ne cherchons pas à établir un modèle sophistiqué tenant en compte de tous les phénomènes physiques, la stratégie de gestion d'énergie n'exige pas un tel modèle. En effet les phénomènes physiques tels que : l'autodécharge et le phénomène de redistribution des charges sont omis car supposés non pertinents pour les applications multi-sources. L'élaboration d'un modèle comportemental tenant compte de tous les phénomènes physiques du supercondensateur est une tâche très difficile. Dans cette étude nous utilisons un modèle simplifié qui reproduit bien le comportement électrique du supercondensateur en phase de charge et décharge. Le modèle retenu pour les supercondensateurs BoostCap (3000F/2.7V) est illustré par la figure 2.23. Ce modèle contient une résistance équivalente et une capacité équivalente. La résistance équivalente réunit deux types de résistances : la résistance série notée R_{Sc} propre à l'élément de stockage et la résistance R_W due au câblage. La capacité équivalente quant à elle incorpore deux composantes : une composante constante notée C_0 en plus d'une capacité qui varie linéairement en fonction de la tension $V(t)$. Cette dernière composante est notée $\beta \cdot V(t)$, où β représente la capacité spécifique du supercondensateur. La composante constante représente environ 80% de la capacité nominale du supercondensateur. Le modèle analytique du supercondensateur est donné par l'équation (2.38). Les paramètres de simulations sont présentés dans le tableau 2.6. Pour de plus amples informations sur les procédures de caractérisation des différents paramètres du modèle des supercondensateurs, le lecteur se référera aux références [82][83][84][85].

$$V_{Sc} = V_{t0} - \int_0^t \frac{I_{Sc} \cdot dt}{C_0 + \beta \cdot V(t)} - (R_W + R_{Sc}) \cdot I_{Sc} \quad (2.38)$$

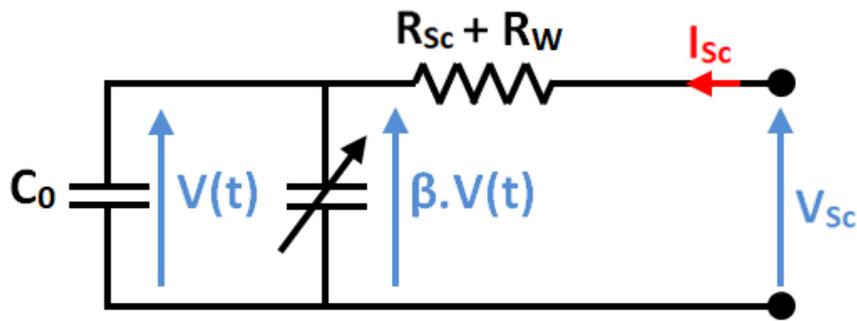


Figure 2. 23: Modèle retenu pour le Boost-Cap (3000F/2.7V).

Tableau 2. 6: Paramètres d'une cellule de supercondensateurs Boost-Cap (3000F/2.7V).

Paramètre	Symbole	Valeur
Résistance série	R_{SC}	0,428m Ω
Résistance de câblage	R_W	0,497m Ω
Composante constante de la capacité	C_0	2573F
Composante spécifique de la capacité	β	60F/V
Densité de puissance	ρ_{PSC}	5,9KW/Kg
Densité d'énergie	ρ_{ESC}	6Wh/Kg

2.7.3 Validation du modèle de Boost-Cap (3000F/2.7V)

Dans le but d'évaluer les performances du modèle de supercondensateurs, la présente section est dédiée à la comparaison entre le résultat de simulation et celui d'expérimentation. L'évolution des tensions aux bornes du supercondensateur est observée en réponse au profil de courant présentée par la figure 2.24. La fréquence des ondulations du courant continu est de 1Hz. Nous avons choisi ce profil, car dans la majorité des cas les supercondensateurs assurent la composante fluctuante (composante haute fréquence) de la demande de la charge. Nous constatons d'après la figure 2.25, que l'évolution de la tension provenant du modèle de simulations est proche de celle issue de la mesure expérimentale. Ce constat est valable pour la phase de charge et de décharge. L'écart entre la courbe expérimentale et la réponse du modèle ne dépasse pas 1% comme le montre la figure 2.26. Nous pouvons donc conclure que le modèle des supercondensateurs présenté ci-dessus est suffisant pour les simulations des stratégies de gestion d'énergie appliquées au système multi-sources.

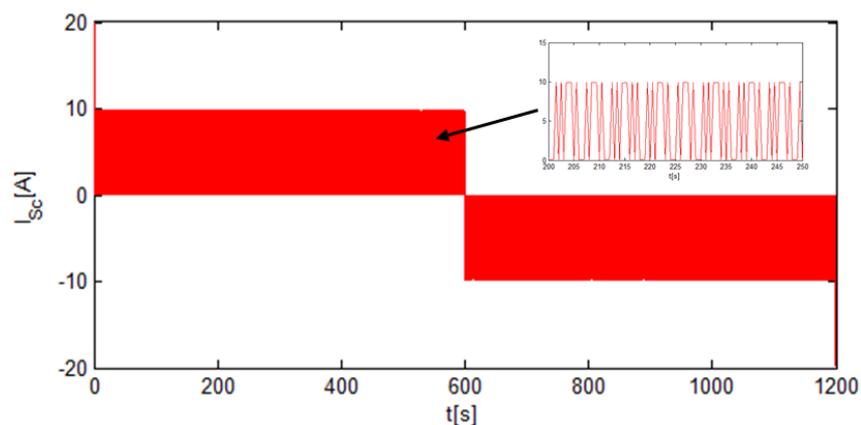


Figure 2. 24: Courant de charge/décharge du supercondensateur.

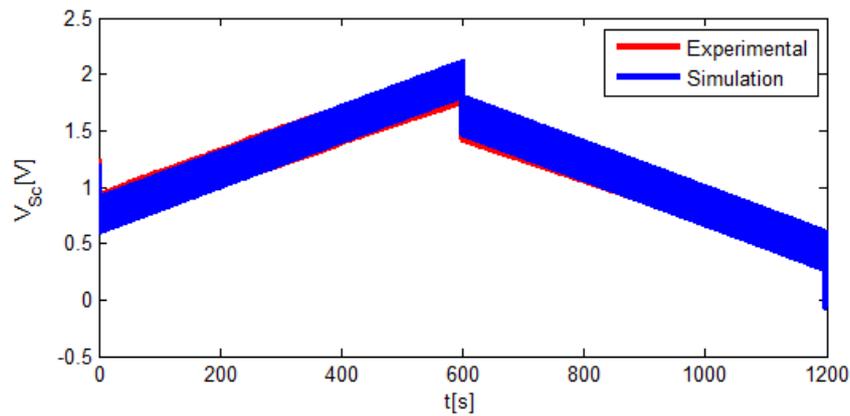


Figure 2. 25: Comparaison entre résultats d'expérimentation et de simulations.

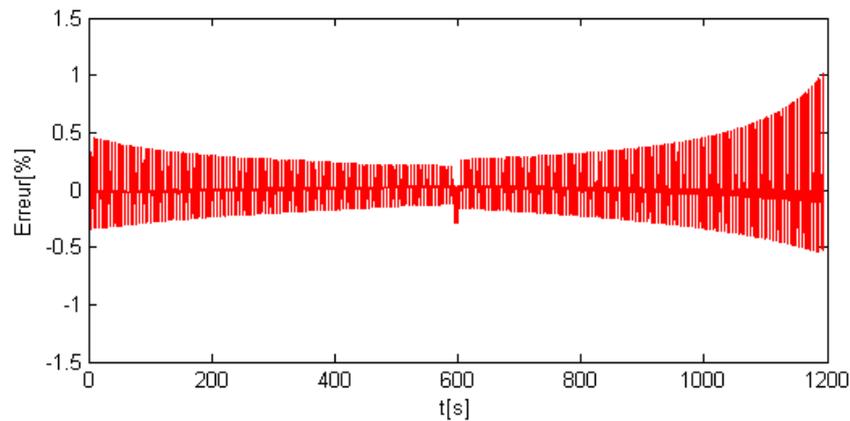


Figure 2. 26: Ecart entre la tension expérimentale et celle simulée.

2.8 Conclusion

La modélisation des différentes composantes du système multi-sources a fait l'objet de ce chapitre. Dans un premier temps, nous avons présenté les différentes architectures de couplage des systèmes de stockage d'énergie électrique. A l'issue de cette présentation, nous avons abordé les architectures des systèmes sur lesquels nous travaillerons. Par la suite, nous avons décrit les modèles des éléments du système multi-sources à savoir : les convertisseurs statiques, la machine électrique et les sources d'énergie électrique. Les modèles développés dans ce chapitre seront utilisés dans les prochains chapitres afin de simuler les stratégies de gestion d'énergie développées.

Chapitre 3 : Dimensionnement des sources d'énergie électrique et commande des convertisseurs statiques.

**“Le génie est fait d'un pour cent d'inspiration et de quatre-vingt-dix-neuf pour cent de transpiration.”
Thomas Edison.**

3.1 Introduction

Le dimensionnement des différentes sources d'énergie et la commande des convertisseurs statiques liés à ces sources et à la machine de traction feront l'objet du présent chapitre. Ces deux parties sont primordiales pour la validation par simulation de la gestion d'énergie électrique basée sur la décomposition fréquentielle.

La première partie de ce chapitre porte sur le modèle dynamique du véhicule électrique permettant de calculer les besoins en énergie et en puissance pour un cycle de conduite donné. Les valeurs des énergies et des puissances obtenues permettent de calculer les dimensions des sources d'énergie électrique. La procédure de dimensionnement basée sur la décomposition fréquentielle est abordée dans la deuxième partie. Nous présentons par la suite la commande de la machine de traction/propulsion et le contrôle des convertisseurs d'interfaçage des sources d'énergie. Le contrôle de la machine et des convertisseurs statiques est basée sur les régulateurs RST.

3.2 Modèle dynamique du véhicule électrique

3.2.1 Représentation mathématique du modèle dynamique du VE

Le dimensionnement des sources d'énergie embarquées dans un véhicule électrique repose sur l'estimation préalable des niveaux de puissance et la quantité d'énergie nécessaire pour tracter/propulser le véhicule et accomplir le cycle de mission. Le calcul des paramètres de dimensionnement (principalement l'énergie et la puissance) se fait par l'intermédiaire du modèle mécanique du véhicule en tenant en compte de plusieurs paramètres tels que: le poids, la surface frontale, la vitesse du vent, les force extérieures, etc... [18][21][86].

Dans un véhicule électrique, le système de traction se compose de plusieurs éléments : les sources d'énergie et leurs convertisseurs d'interfaçage avec le bus continu (dans certains cas, la source d'énergie est directement liée au bus continu), un moteur à courant alternatif associé à un onduleur (ou plusieurs moteurs dans le cas des moteurs-roues). En outre, la partie mécanique contient les roues, un pont différentiel et enfin le châssis qui supporte tous les éléments constituant le véhicule. Vu que le présent travail se concentre sur le partage optimal des énergies et des puissances pour les différentes sources mises en jeu. Le véhicule y compris tous les éléments qui le constitue sera assimilé à un point situé en son centre de gravité de même masse.

Par souci de simplification, le modèle du véhicule est considéré comme étant longitudinal, les mouvements latéraux et les mouvements de suspensions ne sont pas pris en compte. Le bilan des forces exercées sur le centre de gravité du véhicule est présenté par la figure 3.1, où \vec{F}_{tract} est la force motrice nécessaire pour tracter ou propulser le véhicule afin d'accomplir le cycle de mission. Dans les prochains paragraphes, nous expliciterons toutes les forces illustrées sur la figure 3.1 et qui entre dans le calcul de \vec{F}_{tract} .

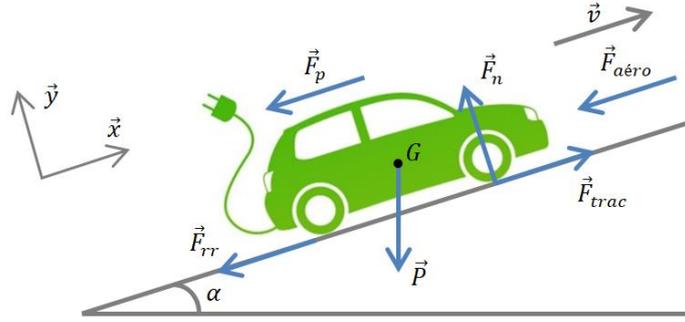


Figure 3.1: Bilan des forces exercées sur le véhicule.

Les cycles de conduites normalisés ne donnent aucune information sur les pentes rencontrées lors de la conduite. Cependant les pentes influencent les niveaux de puissance ainsi que la consommation d'énergie du VE et par conséquent le dimensionnement des éléments de stockage d'énergie. Dans cette étude, \vec{F}_p désigne la force s'opposant à l'avancement du véhicule dans une voie de pente α . Dans notre étude la valeur maximale de la pente ne dépasse pas les 10 degré. L'expression de \vec{F}_p est donnée par l'équation (3.1).

$$\begin{cases} \vec{F}_p = -M \cdot g \cdot \sin(\alpha) \cdot \vec{x} \\ \alpha \leq 10^\circ \end{cases} \quad (3.1)$$

La force de résistance au roulement \vec{F}_{rr} recouvre plusieurs effets provenant de différents phénomènes tels que : la déformation des pneus, les mouvements des suspensions et les défauts d'alignement. De manière générale, la force de résistance au roulement peut s'exprimer selon un modèle linéaire où f_r désigne le coefficient de résistance au roulement, l'expression de cette force est donnée par l'équation (3.2). La force de résistance au roulement dépend de plusieurs paramètres tels que : la structure des pneus, leur pression de gonflage et la vitesse du véhicule. Elle est d'autant plus faible si la surface de la route est dure et lisse.

$$\vec{F}_{rr} = -f_r \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot \vec{x} \quad (3.2)$$

La résistance aérodynamique est la force qui s'oppose à l'avancement du véhicule dans un fluide. Pour les véhicules, il s'agit de l'air, cette force est proportionnel à la densité volumique de l'air ρ_{air} , à la section frontale du véhicule S_f , au coefficient de pénétration dans l'air C_d et au carré de la vitesse du véhicule. L'expression de cette force est donnée par l'équation (3.3).

$$\vec{F}_{rr} = -\frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot S_f \cdot C_d \cdot v^2 \cdot \vec{x} \quad (3.3)$$

La force de traction/propulsion \vec{F}_{tract} permettant d'estimer la puissance et l'énergie demandées par le véhicule est obtenue par l'application du principe fondamental de la dynamique présentée dans l'équation (3.4), où σ est un coefficient sans dimension permettant de prendre en compte les moments d'inertie des masses tournantes, notamment la machine électrique et le pont différentiel.

$$\sigma \cdot M \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} = \sum \vec{F}_{ext} = \vec{F}_p + \vec{F}_{rr} + \vec{F}_{aéro} + \vec{F}_{tract} \quad (3.4)$$

En reportant l'équation précédente sur l'axe \vec{x} , nous obtenons l'équation (3.5). Finalement, nous obtenons l'expression de la force de traction, elle est présentée dans l'équation (3.6).

$$\sigma \cdot M \cdot \frac{d\vec{v}}{dt} \cdot \vec{x} = \left(-M \cdot g \cdot \sin(\alpha) - M \cdot g \cdot f_r \cdot \cos(\alpha) - \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot S_f \cdot C_d \cdot v^2 - F_{tract} \right) \cdot \vec{x} \quad (3.5)$$

$$F_{tract} = \sigma \cdot M \cdot \frac{dv}{dt} + M \cdot g \cdot \sin(\alpha) + M \cdot g \cdot f_r \cdot \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot S_f \cdot C_d \cdot v^2 \quad (3.6)$$

La force de traction dont l'expression est présentée par l'équation (3.6) permettra de connaître le besoin du véhicule en termes de puissance et d'énergie. Cette force est en relation directe avec le couple et par conséquent la puissance demandée par le véhicule. En effet, le couple développé par la roue du véhicule est égale à la force multiplié par le rayon de la roue. La puissance développée dans ce cas est égale au couple multiplié par la vitesse de rotation de la roue ou encore la force de traction multiplié par la vitesse linéaire du véhicule, elle est aussi égale à la variation de l'énergie par rapport au temps (autrement dit la dérivée de l'énergie par rapport au temps). Nous reviendrons en détail à ces équations plus tard dans la dernière partie de ce chapitre pour le calcul de la demande de la charge en termes de courant. Comme nous pouvons le constater, les calculs de puissance et d'énergie omettent plusieurs phénomènes (pertes mécaniques, pertes électriques, etc.) et se basent ainsi sur des équations simples. Ce choix est adopté car le but de notre travail est de développer un modèle dynamique comportemental du VE. Nous nous intéressons plutôt aux sources d'énergie électrique plus précisément la gestion d'énergie électrique au niveau de ces sources.

3.2.2 Choix de l'exemple du véhicule électrique

Dans le but de maintenir un cadre réaliste pour notre étude, nous avons choisis un modèle de véhicule électrique existant sur le marché de l'automobile, il s'agit de la Volkswagen e-UP présentée dans la figure 3.2, qui est la première voiture tout électrique commercialisé par le constructeur allemand [87]. Notre choix s'est porté sur la Volkswagen e-UP vu que la fiche technique est très complète en comparaison avec d'autres constructeurs de véhicules électriques. Cela nous a permis de construire une idée globale sur les performances et les caractéristiques du véhicule à savoir l'autonomie en énergie, les puissances requises, la vitesse maximale, la tension du bus continu, etc. Toutes ces informations nous permettrons de caler notre étude sur une application réelle. Les caractéristiques techniques de la Volkswagen e-UP sont résumées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1: Caractéristiques techniques de la Volkswagen e-UP.

Moteur électrique	
Technologie moteur électrique	Machine synchrone à aimants permanents
Puissance maximum à tr/min	60 KW de 2800 à 12000 tr/min
Puissance continue à tr/min	40 KW de 2800 à 12000 tr/min
Couple maximum à tr/min	210 Nm à 2800 tr/min
Boîte de vitesses	1 rapport
Batterie	
Type	Lithium ion
Poids	230 Kg
Localisation	Intégrée au plancher entre les essieux
Capacité nominale	18,7 KWh / 50 Ah

Nombre de cellules / modules	204 / 17
Tension totale AC/DC	374 V
Dimensions	
Poids à vide	1154 Kg
Poids totale autorisé	1530 Kg
Longueur	3,540 m
Largeur	1,645 m
Hauteur	1,492 m
Performances	
Vitesse de pointe	130 Km/h
Temps de 0 à 100 Km/h	12,4 s
Consommation par 100 Km	11,7 Kwh
Autonomie en cycle NEDC	160 Km
Autonomie en saison froide	80 à 120 Km



Figure 3.2: Volkswagen e-UP.

Dans le but d'avoir des résultats réalistes et afin de bien dimensionner les unités de stockage d'énergie, nous combinons le modèle mécanique détaillé dans la première partie avec les paramètres de la Volkswagen e-UP. Les différents paramètres utilisés dans l'expression de la force de traction sont présentés dans le tableau 3.2.

Un point très important à considérer concerne l'accélération du véhicule. Le calcul de la valeur instantanée de l'accélération du véhicule dépend du cycle de conduite. En effet, ce dernier donne les valeurs de vitesse prises par le véhicule en fonction du temps. Suivant le cycle considéré (NEDC, FTP75 ou autres), les valeurs de l'accélération peuvent dépasser largement les capacités du véhicule prescrites par le constructeur. Cela influencera directement le calcul de la valeur de la force de traction et conduira à un surdimensionnement des unités de stockage. Pour notre exemple, la Volkswagen e-UP peut passer de 0 à 100km/h en 12,4 s, ce qui correspond à une accélération maximale de $2,27 \text{ m.s}^{-2}$. La valeur de l'accélération entre en jeu au niveau de la puissance nécessaire pour faire avancer le véhicule.

Les valeurs prises par la puissance et l'énergie calculées à partir du modèle mécanique du véhicule diffèrent selon le cycle de conduite utilisé. Les figures 3.3 et 3.4 illustrent respectivement les courbes de puissance et d'énergie nécessaire à l'accomplissement du cycle NEDC. La courbe de puissance est obtenue via le produit de la force de traction/propulsion et la vitesse de roulage du véhicule, la courbe de l'énergie est obtenue en intégrant le résultat du calcul de la puissance par rapport au temps. La puissance maximale du véhicule durant ce cycle de conduite est égale à 60kW, le résultat de simulations correspond donc

approximativement à la puissance du moteur de la Volkswagen e-UP indiquée dans le tableau 3.1. L'énergie résultante de la simulation du modèle mécanique du véhicule est proche de l'énergie indiquée dans le document du constructeur afin d'accomplir le cycle NEDC (cette valeur est indiquée dans la capacité du module des batteries, elle est égale à 18,7kWh). Nous pouvons conclure que le modèle dynamique du VE ainsi que les paramètres choisis pour ce modèle reproduisent approximativement bien la demande du véhicule en termes de puissance et d'énergie. Il est à noter que ces calculs restent approximatifs et reposent sur des formules simplifiées et des hypothèses simplificatrices.

Tableau 3.2: Paramètres du modèle mécanique du véhicule.

Paramètres	Symbole	Valeur
Pois du véhicule	M	1530Kg
Constante gravitationnelle	g	9,81ms ⁻²
Densité volumique de l'air	ρ_{air}	1,205Kg ^m ⁻³
Coefficient de résistance au roulement	f_r	0,01s ² m ⁻²
Section frontale du véhicule	S_f	2,4543m ²
Coefficient de pénétration dans l'air	C_d	0,25
Coefficient sans dimension permettant de prendre en compte les moments d'inertie des masses tournantes	σ	1,05
Rayon de la roue	r	0,27m

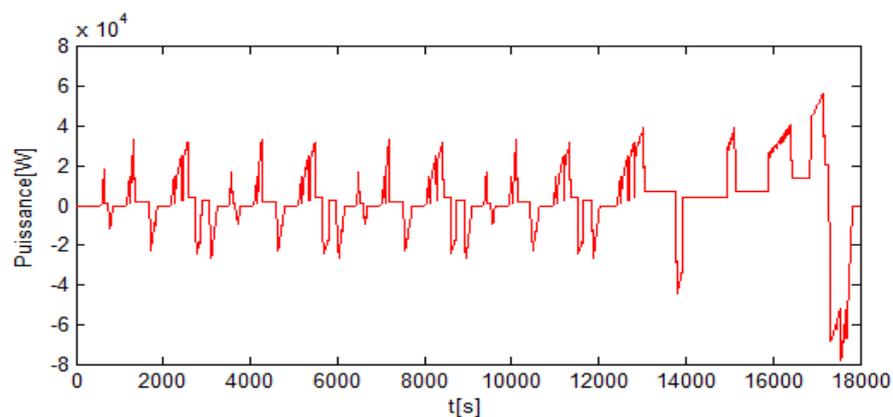


Figure 3.3: Puissance requise par le véhicule pour le cycle NEDC.

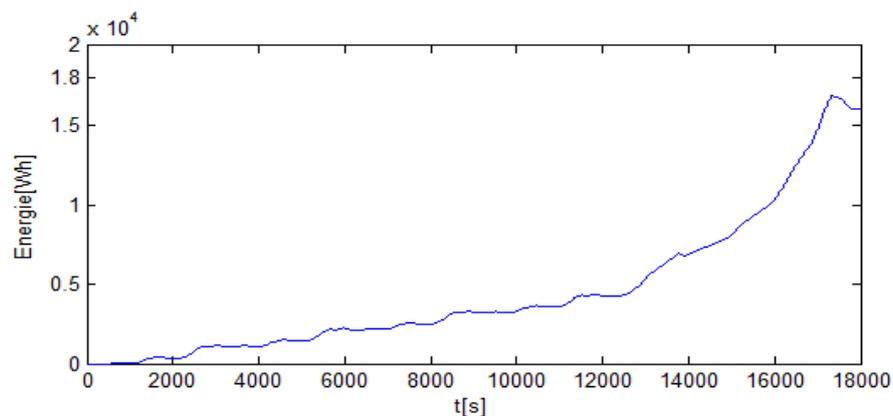


Figure 3.4: Autonomie en énergie requise pour le cycle NEDC.

En ce qui concerne les autres cycles de conduite utilisés dans cette étude, les courbes de puissance et d'énergie sont obtenues pour les mêmes paramètres du modèle mécanique du véhicule, seules les valeurs de l'accélération et de la pente changent. Il est à noter que pour avoir les résultats des figures 3.3 et 3.4 nous avons simulé le modèle mécanique du véhicule

sur une période de 18000s, ce qui correspond à la distance d'autonomie de la Volkswagen e-UP pour le cycle NEDC (160km est égale à 15 fois de la distance du cycle NEDC). Dans les résultats de simulations présentés dans la dernière partie de ce chapitre, l'énergie maximale sera plus faible car nous vérifierons la stratégie de gestion d'énergie pour des durées plus faibles (la durée d'un seul cycle de conduite), par contre les valeurs des puissances ne changeront pas vu qu'elles ne sont pas affectées par les durées de simulations.

3.3 Dimensionnement des éléments de stockage de l'énergie électrique

Après la conception du modèle dynamique du véhicule et le choix de ses paramètres de simulations. Nous passerons au dimensionnement des sources d'énergie électrique. Les résultats du dimensionnement nous permettront de choisir les nombres des cellules pour chaque source d'énergie.

Le dimensionnement proposé dans la suite de cette section n'est pas le plus optimal possible vu que l'objectif de ce travail se concentre sur la gestion de l'énergie et la répartition des puissances entre les différentes sources d'énergies. Un dimensionnement optimal prend en compte tous les aspects relatifs au système à savoir (l'autonomie, le poids, le vieillissement des sources, le coût etc.), il répond à un besoin et à un cahier de charges bien déterminé. Plusieurs travaux se sont intéressés au dimensionnement optimal des systèmes électriques hybrides, ils sont présentés dans les références [8][9][18][21][29].

Dans cette partie, nous expliquerons dans un premier temps, la méthode de dimensionnement basée sur l'approche fréquentielle, puis nous présenterons les procédures de dimensionnement pour les sources d'énergie utilisées dans ce travail à savoir : les batteries, les supercondensateurs et finalement la pile à combustible.

3.3.1 Méthode de dimensionnement basée sur l'approche de décomposition fréquentielle

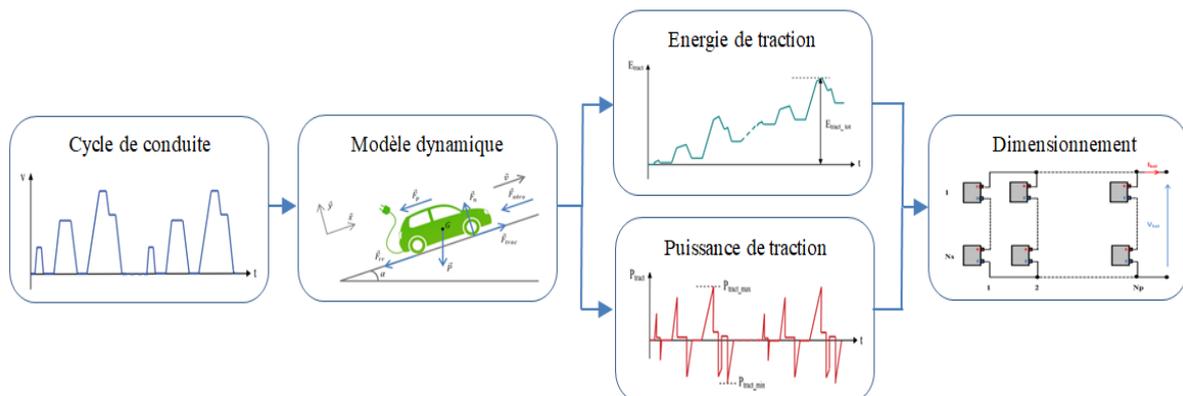


Figure 3.5: Procédure de dimensionnement des unités de stockage d'énergie.

La procédure de dimensionnement des unités de stockage d'énergie est présentée dans la figure 3.5. Le modèle dynamique du véhicule utilise les valeurs de vitesse afin de calculer la puissance et l'énergie nécessaire au véhicule pour l'accomplissement du cycle de conduite choisie. Le dimensionnement des sources est conçu à partir des valeurs maximales et minimales des courbes de puissance et d'énergie obtenue par la simulation du modèle dynamique du VE.

L'utilité de l'approche de décomposition fréquentielle dans ce cas est la décomposition des sollicitations de la charge en termes de puissances et d'énergie suivant le nombre et le type des sources d'énergie utilisées. Si par exemple, le véhicule électrique contient deux sources d'énergie : par exemple un module de batteries et un pack de supercondensateurs, l'approche fréquentielle décomposera la demande de la charge en deux composantes : une composante haute fréquence qui sera assurée par les supercondensateurs et une composante basse fréquence qui sera assurée par le module des batteries. Dans ce cas, chaque source d'énergie sera dimensionnée par rapport à la composante qui lui est assignée et non pas par rapport à la demande totale de la charge.

Suivant le nombre et la nature des sources d'énergie utilisées, les batteries peuvent jouer le rôle de source auxiliaire de puissance ou de source principale d'énergie. Elles peuvent donc être dimensionnées « théoriquement » en puissance comme elles peuvent être dimensionnées en énergie. Dans cette étude, nous calculerons les dimensionnements pour les deux cas et nous choisirons les résultats du dimensionnement le plus contraignant. Ce cas de figure est aussi valable pour les autres sources utilisées en particulier les supercondensateurs. Le principe de l'approche fréquentielle est similaire pour le dimensionnement des sources et la gestion d'énergie. Cette approche sera présentée en détail dans la partie consacrée à la gestion d'énergie.

Il est à noter que le dimensionnement des sources d'énergie dépend de plusieurs facteurs : le cycle de mission (autrement dit le cycle de conduite), l'architecture du système de stockage d'énergie (la disposition des sources d'énergie au sein de l'application : association active ou passive), et finalement le nombre et le type des ESS utilisées. En effet, ces facteurs influencent la manière dont l'approche fréquentielle décompose les sollicitations de la charge et par conséquent le résultat du dimensionnement.

3.3.2 Dimensionnement du module des batteries

Le dimensionnement du module de batteries est conditionné par trois paramètres : E_{Tract_tot} , P_{Tract_max} et P_{Tract_min} qui constituent les sorties du modèle dynamique du véhicule. La figure 3.5 permet de situer les différentes puissances et énergies utilisées dans le dimensionnement. E_{Tract_tot} est la valeur maximale de l'énergie assignée aux batteries, P_{Tract_max} et P_{Tract_min} sont respectivement les valeurs maximale et minimale de la puissance que les batteries doivent fournir tout au long du cycle de conduite.

3.3.2.1 Dimensionnement en énergie

L'énergie maximale stockée dans les batteries E_{Bat_stockE} est calculée en utilisant l'équation (3.7), où E_{Tract_tot} est l'énergie totale de traction obtenue à partir du modèle dynamique et du cycle conduite considéré, DoD_{Bat} est la profondeur de décharge maximale autorisée pour les batteries, E_{Tract_max} et E_{Tract_min} sont respectivement l'énergie maximale et celle minimale de la traction [9][21][29].

$$\begin{cases} E_{Bat_stockE} = \frac{E_{Tract_tot}}{DoD_{Bat}} \\ E_{Tract_tot} = |E_{Tract_max} - E_{Tract_min}| \end{cases} \quad (3.7)$$

3.3.2.2 Dimensionnement en puissance

Lors de la phase de décharge, la puissance maximale fournie par le module des batteries est équivalente au maximum de la puissance de traction notée P_{Tract_max} . De même lors de la charge, la puissance maximale récupérée par le module des batteries est équivalente au minimum de la puissance de traction notée P_{Tract_min} . Les courants maximaux de charge et de décharge respectivement I_{el_Ch} et I_{el_Dch} sont fixés relativement aux données du constructeur. Ils sont souvent exprimés en fonction de la capacité nominale (en Ah). Les temps de charge T_{Ch} et de décharge T_{Dch} minimales pour les batteries sous les courants I_{el_Ch} et I_{el_Dch} sont données par le système d'équations (3.8), où C_{el_Bat} (Ah) est la capacité nominale pour un élément du module des batteries [9][21][29].

$$\begin{cases} T_{Ch} = \frac{C_{el_Bat}}{I_{el_Ch}} \\ T_{Dch} = \frac{C_{el_Bat}}{I_{el_Dch}} \end{cases} \quad (3.8)$$

Pour un dimensionnement basé sur la décharge des batteries, l'énergie maximale stockée E_{Bat_stockD} est donnée par l'équation (3.9). De la même manière, pour un dimensionnement basé sur la charge des batteries, l'énergie maximale stockée E_{Bat_stockC} est donnée par l'équation (3.10).

$$E_{Bat_stockD} = P_{Tract_max} \cdot T_{Dch} \quad (3.9)$$

$$E_{Bat_stockC} = P_{Tract_min} \cdot T_{Ch} \quad (3.10)$$

Quel que soit le fonctionnement, l'énergie maximale stockée dans les batteries E_{Bat_stockP} doit vérifier le système d'inéquations (3.11).

$$\begin{cases} E_{Bat_stockP} \geq E_{Bat_stockD} \\ E_{Bat_stockP} \geq E_{Bat_stockC} \end{cases} \quad (3.11)$$

Les inéquations ci-dessus délimitent le domaine de validité du dimensionnement des batteries. Ce domaine de validité est une caractéristique énergie-puissance qui montre la région où le dimensionnement est optimal, autrement dit les résultats du dimensionnement ne dépassent pas les capacités de la batterie en termes de puissance et d'énergie. La figure 3.6 illustre cette caractéristique où la région en vert foncé couvre le domaine de validité du dimensionnement pour une batterie.

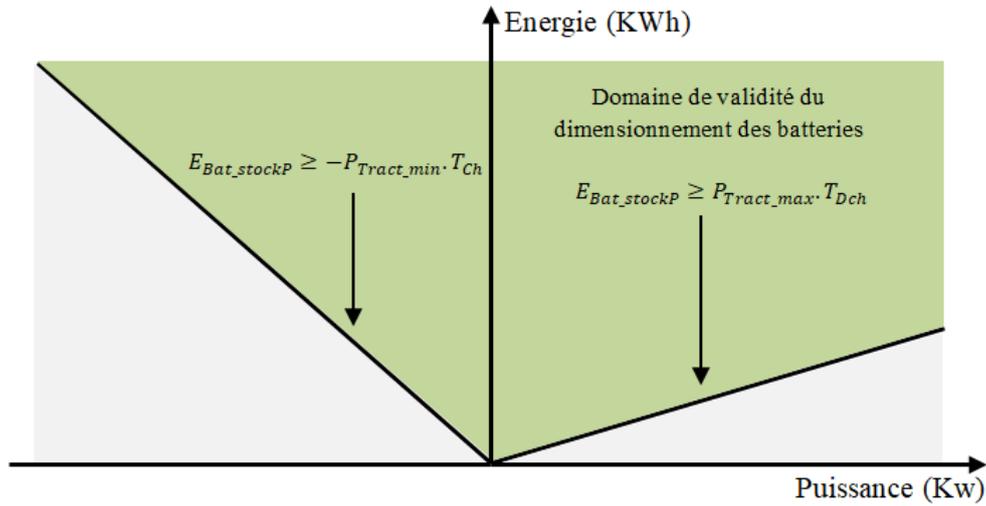


Figure 3.6: Domaine de validité du dimensionnement d'une batterie.

3.3.2.3 Calcul du nombre d'éléments du module des batteries

Le nombre de cellules en série N_{S_Bat} et en parallèle N_{P_Bat} est obtenu en considérant le dimensionnement le plus contraignant, autrement dit le calcul de N_{S_Bat} et N_{P_Bat} est réalisé en prenant la plus grande valeur des deux énergies de dimensionnement E_{Bat_stockP} ou E_{Bat_stockE} (équation (3.12)).

$$E_{Bat_stock} \geq \max(E_{Bat_stockP}, E_{Bat_stockE}) \quad (3.12)$$

Le nombre des batteries à mettre en série est calculé à partir de la tension du bus continu fixée par le cahier de charges. Dans le cas où les batteries sont connectées au bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur DC-DC, nous prenons en compte un facteur d'élévation de deux afin d'avoir un bon rendement au niveau du transfert d'énergie ainsi : $V_{Bat_max} = V_{Bus}/2$. Dans le cas où le module des batteries est lié directement au bus continu nous avons : $V_{Bat_max} = V_{Bus}$. Le calcul de N_{S_Bat} est présenté dans l'équation (3.13).

$$N_{S_Bat} = \frac{V_{Bat_max}}{V_{el_Bat}} \quad (3.13)$$

Le nombre de batteries à mettre en parallèle N_{P_Bat} dépend de la capacité maximale C_{Bat} du module des batteries demandée par la mission, ainsi que la capacité d'une cellule des batteries utilisées C_{el_Bat} . Il est calculé en utilisant l'équation (3.14).

$$C_{Bat} = N_{P_Bat} \cdot C_{el_Bat} \quad (3.14)$$

L'expression de l'énergie maximale stockée dans le module des batteries est donnée par l'équation (3.15). En utilisant cette dernière équation, nous déduisons le nombre de branche N_{P_Bat} à mettre en parallèle (équation (3.16)).

$$E_{Bat_stock} = C_{Bat} \cdot V_{Bat_max} \quad (3.15)$$

$$N_{P_Bat} = \frac{E_{Bat_stock}}{C_{el_Bat} \cdot V_{Bat_max}} \quad (3.16)$$

3.3.3 Dimensionnement du pack des supercondensateurs

L'objectif principal de l'association des supercondensateurs avec les batteries et/ou les piles à combustible est que les supercondensateurs disposent d'une densité de puissance élevée et d'une grande dynamique permettant de répondre aux pics de puissance demandés par la chaîne de traction, ainsi nous protégeons les autres sources d'énergie contre les fortes sollicitations de la chaîne de traction. Notons que le schéma de dimensionnement pour les batteries (Figure 3.5) est valable pour les supercondensateurs sauf que nous privilégions le dimensionnement en puissance du fait du rôle des supercondensateurs au sein des systèmes hybrides. En réponse à cet objectif, le pack des supercondensateurs sera dimensionné en puissance, néanmoins un dimensionnement en énergie sera effectué afin de vérifier que le dimensionnement en puissance répond aussi aux besoins énergétiques de la mission.

3.3.3.1 Dimensionnement en puissance

Dans le cadre de cette thèse, nous utilisons les supercondensateurs Boost-Cap (3000F/2.7V) fabriqués par Maxwell Technologies. Les caractéristiques techniques de ce type de supercondensateur sont présentées dans l'annexe B. D'après les spécifications du constructeur, la puissance spécifique utilisable dans un élément de supercondensateur est donnée par l'équation (3.17), où ESR_{DC} est la résistance série du supercondensateur, V_{el_Sc} est la tension nominale [9][21][29][63][88].

$$P_{el_Sc} = \frac{0,12 \cdot V_{el_Sc}^2}{ESR_{DC} \cdot masse} \quad (3.17)$$

La puissance maximale fournie par le pack des supercondensateurs (suivant le cycle de mission à accomplir) nous permet de calculer le nombre total des supercondensateurs en utilisant le système d'équations (3.18), où $P_{Sc_max_Dch}$ et $P_{Sc_max_Ch}$ sont respectivement les puissances maximales mises en jeu pendant les phases de décharge et de charge du pack des supercondensateurs. Elles sont obtenues à partir du modèle mécanique et de l'approche fréquentielle utilisée pour la décomposition des sollicitations de la charge (Figure 3.5).

$$\begin{cases} N_{Sc} = \frac{P_{Sc_max}}{P_{el_Sc}} \\ P_{Sc_max} \geq \max(|P_{Sc_max_Ch}|, |P_{Sc_max_Dch}|) \end{cases} \quad (3.18)$$

La tension maximale du pack des supercondensateurs V_{Sc_max} permet de calculer le nombre d'éléments en série, N_{S_Sc} ainsi que celui à mettre en parallèle N_{P_Sc} à travers le système d'équations (3.19).

$$\begin{cases} N_{S_Sc} = \frac{V_{Sc_max}}{V_{el_Sc}} \\ N_{Sc} = N_{S_Sc} \cdot N_{P_Sc} \end{cases} \quad (3.19)$$

Dans notre cas, le pack des supercondensateurs est lié au bus continu à travers un convertisseur DC-DC, un facteur d'élévation égale à 2 est pris en compte, la tension maximale des supercondensateurs V_{Sc_max} est alors égale à $V_{Bus}/2$.

3.3.3.2 Dimensionnement en énergie

Le pack des supercondensateurs doit disposer d'une capacité de stockage suffisante (Energie stockée) afin de répondre aux sollicitations du véhicule en termes de puissance, sans énergie suffisante les supercondensateurs ne peuvent pas répondre aux pics de puissance, c'est la raison pour laquelle en plus d'un dimensionnement en puissance, nous effectuons dans cette sous-section un dimensionnement dépendant de l'énergie stockée [9][18][21][63].

L'énergie totale E_{Sc_tot} dont doit disposer les supercondensateurs est calculée en utilisant l'équation (3.20), où E_{Sc_u} désigne l'énergie utile nécessaire pour le cycle de mission. Elle est égale à la différence entre les extrema E_{Sc_max} et E_{Sc_min} obtenues à partir du modèle dynamique du véhicule et de l'approche fréquentielle (Figure 3.5).

$$\begin{cases} E_{Sc_tot} = \frac{E_{Sc_u}}{DoD_{Sc}} \\ E_{Sc_u} = |E_{Sc_max}| - |E_{Sc_min}| \end{cases} \quad (3.20)$$

Pour une optimisation de la durée de vie des supercondensateurs ainsi que une limitation de la tension du pack, il est préférable de restreindre l'utilisation de l'énergie totale stockée dans une plage de 25% à 100% ce qui correspond à une profondeur de décharge de 75%. Selon les caractéristiques techniques, l'énergie totale stockable dans un élément est donnée par l'équation (3.21), où C_{el_Sc} et V_{el_Sc} sont respectivement la capacité nominale et la tension nominale du supercondensateur.

$$E_{el_Sc} = \frac{1}{2} \cdot C_{el_Sc} \cdot V_{el_Sc}^2 \quad (3.21)$$

Le nombre total d'éléments satisfaisant la contrainte énergétique E_{Sc_tot} est calculé à partir de l'équation (3.22).

$$N_{Sc} = \frac{E_{Sc_tot}}{E_{el_Sc}} \quad (3.22)$$

La procédure de calcul du nombre d'éléments en série N_{S_Sc} et en parallèle N_{P_Sc} est identique à celle présentée par le système d'équations (3.19).

3.3.4 Dimensionnement de la pile à combustible

La différence entre les éléments de stockage réside dans la puissance qu'ils peuvent fournir et l'énergie qu'ils peuvent stocker. Généralement si un élément est performant sur le plan de puissance, il l'est moins sur le plan énergétique et vice-versa. La pile à combustible (PAC) est toujours utilisée comme source principale, elle assure l'autonomie du véhicule, la source secondaire qui accompagne la PAC a pour objectif d'optimiser sa durée de vie en adaptant les sollicitations qui lui sont imposées. Etant une source principale, la PAC doit être dans un

premier temps dimensionnée suivant un critère énergétique ce qui revient à déterminer la masse de l'hydrogène H₂ embarquée à bord du véhicule. Dans un souci de simplicité, nous supposons que le réservoir du H₂ contient suffisamment de combustible pour assurer l'autonomie du véhicule et qu'il répond aux contraintes liées à la masse et au volume. Autrement dit, nous supposons que le système de stockage contient suffisamment d'énergie ainsi la PAC ne sera pas dimensionnée en énergie [63][86][89].

En plus de l'autonomie, la PAC doit pouvoir fournir un niveau de puissance relatif à sa participation dans la mission. Le calcul de la puissance de dimensionnement dépend de la configuration du véhicule hybride (architecture, nombre et types des éléments de stockage secondaires) et du cycle de conduite. Une PAC ne peut pas fonctionner de façon isolée, elle est accompagnée des auxiliaires assurant la compression des gaz, la ventilation, etc. Afin de prendre en considération la consommation des auxiliaires, la puissance de dimensionnement est augmentée de 15% [89]. Le dimensionnement en puissance de la PAC revient à déterminer le nombre et la surface des cellules élémentaires en utilisant les équations (3.23).

$$\begin{cases} V_{Fc} = N_{S_{Fc}} \cdot V_{Cell} \\ I_{Fc} = j \cdot S_{Fc} \\ P_{Fc} = V_{Fc} \cdot I_{Fc} \end{cases} \quad (3.23)$$

où P_{Fc} est la puissance électrique fournie (puissance utile), V_{Fc} et I_{Fc} sont respectivement la tension et le courant du stack, $N_{S_{Fc}}$ est le nombre des cellules de la pile, V_{Cell} est la tension d'une seule cellule, j (A.cm⁻²) étant la densité du courant et S_{Fc} est la surface active des cellules [89].

D'après la caractéristique $V_{Fc} = f(I_{Fc})$, si d'une part le point de fonctionnement de la cellule se trouve dans la région des tensions élevées, la densité de courant correspondante sera faible, dans ce cas, il est nécessaire d'augmenter la surface active afin de répondre aux sollicitations en courant. D'autre part, avoir des densités de puissance élevées revient à avoir des densités de courant élevées, cette condition ne permet pas d'avoir des tensions élevées en outre le rendement sera médiocre à cause des pertes thermiques au niveau du système. Il faut donc faire un compromis entre la tension d'une cellule et sa densité de courant. Pour une cellule, un point de fonctionnement raisonnable correspond à une densité de courant de 0,6 A.cm⁻² et une tension de 0,65 V [89].

3.3.4.1 Détermination du nombre et de la surface active des cellules de la PAC

Le rendement du convertisseur DC-DC est d'autant plus faible que les niveaux des tensions à l'entrée et à la sortie du convertisseur sont éloignés. Afin d'avoir des pertes énergétiques raisonnables au niveau du convertisseur (c'est-à-dire un bon rendement), le facteur d'élévation est limité à 2. Le nombre des cellules est alors calculé en utilisant l'équation (3.24), où V_{Bus} est la tension du bus continu [86][89].

$$N_{S_{Fc}} = \frac{V_{Fc}}{V_{Cell}} = \frac{V_{Bus}}{2 \cdot V_{Cell}} \quad (3.24)$$

Comme il est présenté dans le système d'équations (3.25), la surface des cellules est calculée en utilisant la puissance maximale de la PAC tenant en compte la consommation des auxiliaires. Dans cette étude, la consommation des auxiliaires est estimée à 15% de la puissance utile.

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{Fc_max_dim} = 1,15 \cdot P_{Fc_max} \\ I_{Fc_max} = \frac{P_{Fc_max}}{V_{Fc}} \\ S_{Fc} = \frac{I_{Fc_max}}{j} \end{array} \right. \quad (3.25)$$

Suivant la puissance utile demandée par le système hybride et la tension du bus continu, la surface de la pile à combustible ainsi que le nombre peuvent être élevés. Une mise en série et/ou en parallèle est nécessaire afin de tenir compte des limites technologiques des PACs existantes sur le marché.

Afin de montrer un exemple de dimensionnement basé sur l'ensemble des équations détaillées ci-dessus, l'annexe C présente un dimensionnement détaillé pour un système à trois sources : batteries, supercondensateurs et pile à combustible. Le dimensionnement utilise l'approche de répartition fréquentielle pour le choix des puissances et des énergies utilisées pour le calcul du nombre des cellules.

Remarques :

Comme nous le verrons dans la prochaine partie, la décomposition des sollicitations de la charge par approche fréquentielle dépend fortement des constantes des temps choisi pour les filtres passe-bas. Vu que nous utilisons cette méthode pour le dimensionnement, le choix des constantes des temps aura aussi un impact sur les dimensions des sources d'énergie. Il est à noter que les constantes de temps utilisées pour le dimensionnement sont semblables à ceux utilisées pour la stratégie de gestion d'énergie basée sur l'approche fréquentielle. Ces constantes de temps sont calculées à partir des valeurs de densité de puissance et d'énergie propres aux systèmes de stockage utilisés.

Après la phase de dimensionnement des unités de stockage d'énergie, nous présenterons dans les prochaines parties, les commandes des différents convertisseurs d'énergie utilisés dans les systèmes multi-sources à savoir : la machine électrique et les convertisseurs statiques.

3.4 Commande de la Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP)

Les performances du système de traction électrique dépendent fortement de la conception des méthodes de contrôle des convertisseurs statiques. Cette caractéristique motive la recherche des nouvelles stratégies de contrôle beaucoup plus efficaces. Lors du fonctionnement du véhicule électrique, les paramètres de la machine synchrone à aimants permanents (principalement la résistance et l'inductance des enroulements statoriques) subissent des variations dues à la température. Afin de limiter l'impact de ces variations sur le pilotage du moteur, plusieurs travaux se sont intéressés aux contrôleurs robustes tenant en

compte des variations paramétriques [90][91][92]. Le pilotage de la MSAP nécessite la connaissance précise de la position instantanée du rotor. L'utilisation d'un capteur de position peut être coûteux, encombrant et source de dysfonctionnement. Une commande sans capteur (sensorless) est une technique largement utilisée pour ce type d'application.

Dans cette section, nous présenterons le principe de la commande vectorielle appliquée aux machines à courants alternatifs. Nous nous intéresserons par la suite à deux types de régulateurs à savoir : les régulateurs PI et les régulateurs RST, une comparaison entre les performances des deux régulateurs sera présenté.

3.4.1 Commande vectorielle de la MSAP

3.4.1.1 Principe de la commande vectorielle

La stratégie de commande vectorielle connue sous le nom de commande à orientation du flux (FOC : Field Oriented Control) est largement utilisée pour le pilotage des machines à courants alternatifs, elle permet d'avoir des dynamiques satisfaisantes pour une multitude d'applications. Plusieurs techniques ont été utilisés pour la commande des MSAP à savoir : commande vectorielle basée sur les régulateurs PID[93], commande par mode de glissement (Sliding Mode Control) [94][95], commande par platitude (Flatness-Based Control) [96][97], commande LQR [98][99], commande prédictive (Model Predictive Control) [90][100], commande basée sur la passivité (Passivity-Based Control) [91][101], commande par Backstepping [102][103] et commande vectorielle basée sur les régulateurs RST [92][104]. Dans cette étude, la commande vectorielle basée sur les régulateurs PI et RST sera développée pour le contrôle de la MSAP.

Du fait du découplage naturel entre le couple et le flux au sein de la machine à courant continu, celle-ci est facile à contrôler. L'idée de la commande vectorielle repose sur la reproduction du comportement de la machine à courant continu pour les machines à courant alternatif. Le principe est basé sur la transformation des grandeurs électriques triphasée vers un nouveau référentiel biphasée. Dans le cas d'une MSAP, le repère généralement choisi est le repère dq tournant. La régulation des nouvelles grandeurs dans ce repère accordent un placement plus précis du champ magnétique du stator. La composante du courant suivant l'axe d permet de modifier l'état magnétique de la machine (défluxage) et minimiser les pertes joules. La composante du courant suivant l'axe q permet de contrôler le couple.

La figure 3.7 illustre la structure de la commande vectorielle. La mise en œuvre de cette commande nécessite deux régulateurs de courants, un régulateur de vitesse, une mesure de la vitesse mécanique du rotor à travers un encodeur et les transformations de Park directe et inverse pour le changement du référentiel. Dans les applications sans capteur de vitesse, un estimateur de la position rotorique est nécessaire pour l'entraînement de la MSAP. Les consignes pour les courants I_d et I_q sont fixés suivant les objectifs de la commande vectorielle.

3.4.1.2 Réglage des consignes des courant I_d et I_q

La valeur de consigne du courant I_q est ajustée en fonction de la valeur du couple souhaité (sortie du régulateur de vitesse). La valeur de référence du courant I_d est choisie dans le but

d'avoir un rendement maximal. Les expressions des puissances électrique et mécanique sont données par l'équation (3.26).

$$\begin{cases} P_{elec} = \frac{3}{2} \cdot (V_d \cdot I_d + V_q \cdot I_q) \\ P_{meca} = C_e \cdot \Omega \end{cases} \quad (3.26)$$

En remplaçant les expressions des courants, des tensions et du couple, nous obtenons le système d'équation (3.27).

$$\begin{cases} P_{elec} = \frac{3}{2} \cdot \left[R_s \cdot (I_d^2 + I_q^2) + I_d \cdot \frac{d\phi_d}{dt} + I_q \cdot \frac{d\phi_q}{dt} + p \cdot \Omega \cdot (\phi_d \cdot I_q - \phi_q \cdot I_d) \right] \\ P_{meca} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot I_q \cdot [\phi_r - (L_q - L_d) \cdot I_d] \end{cases} \quad (3.27)$$

Le rendement du moteur à pertes près est défini comme le ratio entre la puissance électrique d'entrée et la puissance mécanique de sortie, ou l'inverse dans le cas d'une génératrice. Le rendement en fonctionnement moteur est donné par l'équation (3.28). La valeur du rendement maximal est obtenue en dérivant l'expression du rendement par rapport au courant I_d (équation (3.29)).

$$\eta = \frac{P_{mec}}{P_{elec}} \quad (3.28)$$

$$I_d = \frac{p \cdot \Omega \cdot I_q \cdot (L_q - L_d)}{2 \cdot R_s} \quad (3.29)$$

Pour une machine synchrone à pôles lisses, les inductances L_d et L_q sont identiques, ainsi pour avoir un rendement maximal, il est préférable que la consigne de courant I_d soit maintenue à zéro. En maintenant $I_d=0$, le couple développé dans ce cas est présenté dans l'équation (3.30).

$$C_e = \frac{3}{2} \cdot p \cdot \phi_r \cdot I_q \quad (3.30)$$

Pour obtenir un couple maximal, il faut maximiser le courant I_q et maintenir le courant I_d à zéro afin d'obtenir un rendement maximal.

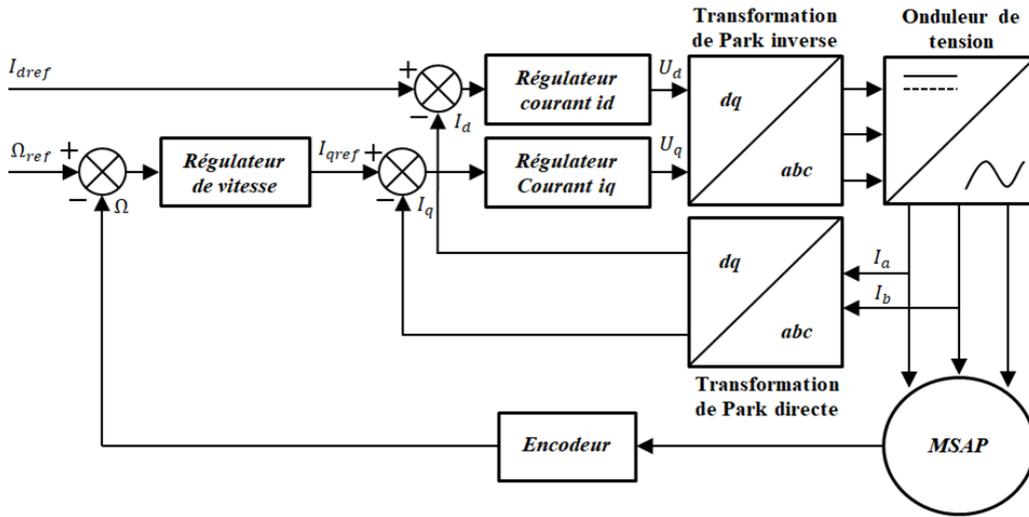


Figure 3.7: Commande vectorielle de la MSAP.

3.4.1.3 Découplage entre les axes d et q

Au niveau des équations du modèle de la MSAP présenté dans les équations (2.17) et (2.18), il existe des termes de couplages entre les axes d et q. Dans le but d'écrire les équations de la machine et des régulateurs d'une manière plus commode ainsi que de calculer plus aisément les coefficients des régulateurs, un découplage entre les axes d et q est généralement effectué. Les équations électriques pour chaque axe comprennent des termes qui font intervenir les courants de l'autre axe et vice-versa. Le découplage entre les deux axes d et q est réalisé en définissant deux termes considérés comme des termes de commande, il s'agit des grandeurs U_d et U_q présentées dans le système d'équations (3.31). Nous obtenons donc des équations différentielles du premier ordre (systèmes d'équations (3.32)). En utilisant la transformée de Laplace, nous obtenons des fonctions de transfert du premier ordre, ainsi le système devient linéaire et simple à contrôler. La figure 3.8 montre la mise en œuvre des boucles de contrôle des courants I_d et I_q et la méthode de découplage utilisée pour les équations électriques de la MSAP.

$$\begin{cases} U_d = V_d + p \cdot \Omega \cdot L_q \cdot I_q = R_s \cdot I_d + L_d \cdot \frac{dI_d}{dt} \\ U_q = V_q - p \cdot \Omega \cdot (L_d \cdot I_d + \phi_r) = R_s \cdot I_q + L_q \cdot \frac{dI_q}{dt} \end{cases} \quad (3.31)$$

$$\begin{cases} \frac{dI_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} \cdot I_d + \frac{1}{L_d} U_d \\ \frac{dI_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} \cdot I_q + \frac{1}{L_q} U_q \end{cases} \quad (3.32)$$

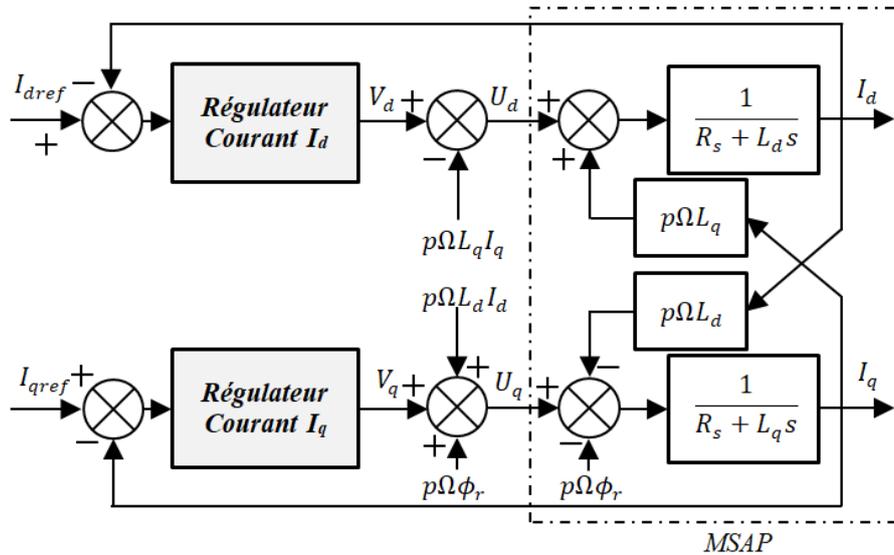


Figure 3.8: Découplage des composantes d et q pour une MSAP.

Les paramètres de la machine synchrone à aimants permanents utilisés dans ce mémoire sont résumés dans le tableau 3.3. La méthode d'identification des paramètres de la MSAP est présentée dans l'annexe A.

Tableau 3.3: Paramètres de la MSAP.

Paramètres	Symbole	Valeur
Puissance nominale	P_n	2,26 kW
Résistance d'une phase statorique	R_s	1,95 Ω
Inductance d'une phase statorique	$L_q = L_d$	13,6 mH
Flux des aimants du rotor	ϕ_r	0,234 Wb
Nombre de paires de pôles	p	3
Moment d'inertie	J	$9,3 \cdot 10^{-4}$ kg/m ²
Coefficient de frottement visqueux	f_v	$6,24 \cdot 10^{-6}$ Nms/rad

3.4.2 Commande vectorielle basée sur les correcteurs PI (FOC-PI)

Les équations différentielles présentées par les équations (3.32) et (2.21) sont ramenées au domaine de Laplace afin d'avoir les fonctions de transfert des boucles de courant et de vitesse qui permettent de calculer les coefficients des régulateurs PI. La boucle de courant est une boucle de contrôle interne, elle doit répondre à certaines spécifications notamment en ce qui concerne la bande passante. Les coefficients des régulateurs des courants I_d et I_q présentés par l'équation (3.33) sont déterminés à partir des performances souhaitées en boucle fermée (Identification paramétrique avec un système du deuxième ordre), où ξ_c et ω_c représentent respectivement le coefficient d'amortissement et la bande passante du régulateur de courant.

$$\begin{cases} K_{pc} = 2 \cdot \xi_c \cdot \omega_c \cdot L_s - R_s \\ K_{ic} = \omega_c^2 \cdot L_s \end{cases} \quad (3.33)$$

Les signaux de commande sont appliqués au moteur via un onduleur alimenté par une source de tension continue, U_d et U_q ne pouvant pas dépasser la valeur maximale de la tension de la source CC, c'est-à-dire que les valeurs des signaux de commande doivent être saturées.

Cette saturation produit une grande amplitude transitoire du terme intégral. Pour résoudre ce problème, la saturation est associée à un anti-windup.

Une fois la boucle de courant validée, il est alors possible de configurer en cascade la boucle de vitesse souhaitée. La possibilité de mise en cascade se justifie par le fait que les constantes de temps électriques et mécaniques ont un rapport supérieur à 10 (cas de la majorité des moteurs électriques). Les coefficients du régulateur de vitesse présentés par l'équation (3.34) sont déterminés à partir des caractéristiques souhaitées en boucle fermée (Identification paramétrique avec un système du deuxième ordre), où ξ_v et ω_v représentent respectivement le coefficient d'amortissement et la bande passante de la boucle de régulation de la vitesse. Le tableau 3.4 contient les différents paramètres du contrôle FOC-PI.

$$\begin{cases} K_{pv} = \frac{2}{3 \cdot p \cdot \phi_r} \cdot (2 \cdot J \cdot \xi_v \cdot \omega_v - f_v) \\ K_{iv} = \frac{2 \cdot J \cdot \omega_v^2}{3 \cdot p \cdot \phi_r} \end{cases} \quad (3.34)$$

Tableau 3.4: Paramètres de la commande vectorielle FOC-PI.

Paramètres	Symbole	Valeur
Coefficient d'amortissement	ξ	1
Bande passante du courant	ω_c	628,31 rad/s
Bande passante de la vitesse	ω_v	62,831 rad/s
Coefficient proportionnel du régulateur du courant	K_{pc}	15,14
Coefficient intégral du régulateur du courant	K_{ic}	$5,36 \cdot 10^3$
Coefficient proportionnel du régulateur de la vitesse	K_{pv}	0,01
Coefficient intégral du régulateur de la vitesse	K_{iv}	0,36

Les figures 3.9, 3.10 et 3.11 présentent respectivement les résultats de contrôle pour la vitesse et les courants I_q et I_d . Nous appliquons une consigne de couple égale à 1Nm pour une vitesse de 100tr/min. Nous remarquons que pour le cas de la vitesse, la mesure suit bien la consigne imposée, cependant nous remarquons la présence d'un dépassement quand la consigne de la vitesse atteint la valeur de 200 tr/min, ce dépassement sera d'autant plus élevé dans le cas d'un échelon de vitesse. En ce qui concerne les mesures de courants I_d et I_q , nous remarquons que les mesures sont proches des consignes avec la présence de quelques fluctuations.

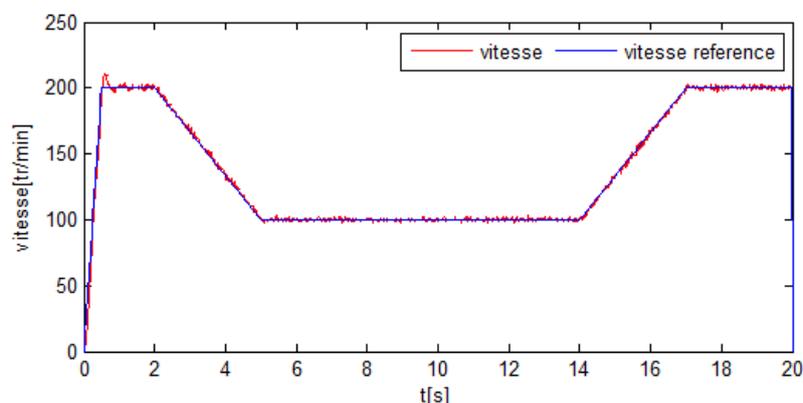


Figure 3.9: Résultat du contrôle de la vitesse pour la commande FOC-PI.

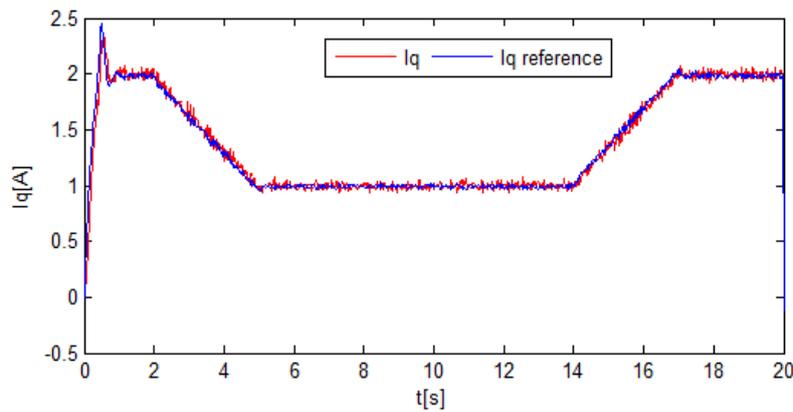


Figure 3.10: Résultat du contrôle du courant I_q pour la commande FOC-PI.

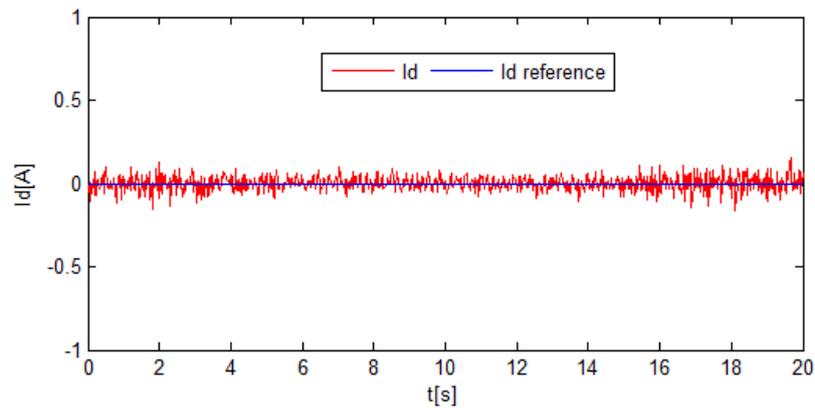


Figure 3.11: Résultat du contrôle du courant I_d pour la commande FOC-PI.

3.4.3 Commande vectorielle basée sur les correcteurs RST (FOC-RST)

Le contrôleur RST repose sur le placement robuste des pôles. La structure se base sur trois polynômes nommés respectivement R, S et T. Le régulateur RST permet de définir indépendamment le temps de montée et le dépassement de la mesure, il permet de spécifier la dynamique de poursuite mise à part de la dynamique de rejet des perturbations. La synthèse de ce type de régulateur prend en compte les retards purs ainsi que la nature des perturbations et des consignes. Finalement, le régulateur RST offre une robustesse vis-à-vis des variations paramétriques [105][106][107]. En comparaison avec d'autres contrôleurs tels que le contrôleur PI, le contrôleur polynomial RST semble offrir une meilleure alternative. Cela permet un bon compromis entre dynamique et précision. Il est basé sur la théorie du placement des pôles, et il est possible d'imposer des pôles en boucle fermée et d'exécuter séparément les objectifs de poursuite et de rejet des perturbations. Dans la littérature, il existe deux types de contrôleurs RST: le contrôleur RST classique et le contrôleur RST pour des références spécifiques (références de rampe et de référence sinusoïdale) [101]. Pour le contrôle de la vitesse des entraînements électriques, le régulateur RST classique et le régulateur RST pour une référence en rampe sont les plus utilisés.

Comme le montre les figure 3.12 et 3.13, le contrôleur RST se compose de trois polynômes R, S et T. La conception du contrôleur repose sur un placement de pôles robuste. Dans sa forme générale, un régulateur RST est composé de trois polynômes où l'ordre de chaque polynôme est fonction de l'ordre du système à contrôler.

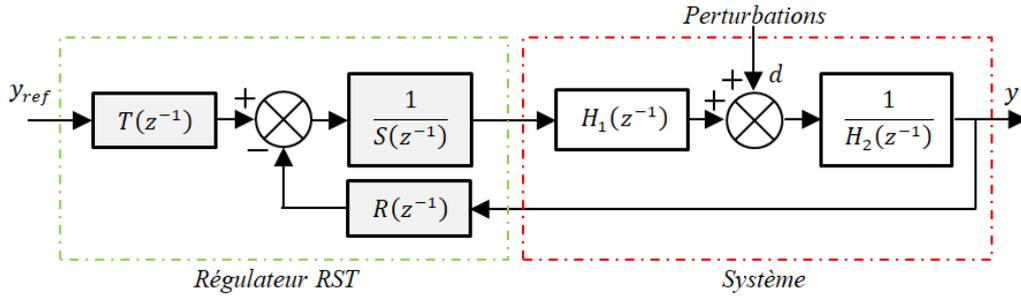


Figure 3.12: Régulateur RST sans Anti-windup.

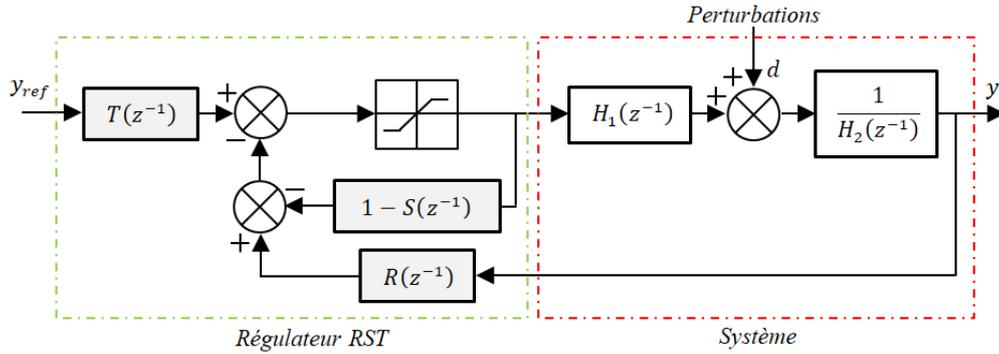


Figure 3.13: Régulateur RST avec Anti-windup.

La fonction de transfert en boucle fermée du système est donnée par l'équation (3.37), où y est la sortie, y_{ref} est le point de consigne et d représente les différentes perturbations. $R(z^{-1})$ et $S(z^{-1})$ sont les solutions de l'équation diophantienne présentée par l'équation (3.38) obtenue par une stratégie de placement des pôles.

$$y = \frac{H_1(z^{-1})T(z^{-1})}{H_2(z^{-1}) \cdot S(z^{-1}) + H_1(z^{-1}) \cdot R(z^{-1})} y_{ref} + \frac{S(z^{-1})}{H_2(z^{-1}) \cdot S(z^{-1}) + H_1(z^{-1}) \cdot R(z^{-1})} d \quad (3.37)$$

$$H_2(z^{-1}) \cdot S(z^{-1}) + H_1(z^{-1}) \cdot R(z^{-1}) = D_m(z^{-1}) \quad (3.38)$$

$D_m(z^{-1})$ est conçu en fonction du choix de la dynamique en boucle fermée. Pour obtenir un gain statique unitaire entre la mesure et la consigne avec une rejection des perturbations en régime permanent, les deux conditions présentées par l'équation (3.39) doivent être remplies. $T(z^{-1})$ est un polynôme qui permet d'imposer la réponse souhaitée au système en boucle fermée. Pour concevoir un correcteur causal, les degrés des polynômes $R(z^{-1})$ et $S(z^{-1})$ doivent satisfaire les conditions prescrites par le système d'équations (3.40).

$$\begin{cases} R(1) = T(1) \\ S(1) = 0 \end{cases} \quad (3.39)$$

$$\begin{cases} \deg(S) = \deg(H_2) + 1 \\ \deg(R) = \deg(H_2) \\ \deg(D_m) = \deg(S) + \deg(R) \end{cases} \quad (3.40)$$

Grâce à la méthode de découplage utilisée pour les équations électriques de la MSAP (Figure 3.11). Le système étudié est composé uniquement des fonctions de transfert de premier ordre présenté par l'équation (3.41). Dans ce cas, la représentation temporelle discrète est donnée par l'équation (3.42).

$$H(p) = \frac{H_1(p)}{H_2(p)} = \frac{K}{p + p_0} \quad (3.41)$$

$$H(z^{-1}) = \frac{H_1(z^{-1})}{H_2(z^{-1})} = \frac{\frac{K}{p_0} \cdot (1 - \exp(-p_0 \cdot T_e)) \cdot z^{-1}}{1 - \exp(-p_0 \cdot T_e) \cdot z^{-1}} \quad (3.42)$$

Pour les fonctions de transfert du premier ordre, le degré du dénominateur $\deg(H_2)$ est égal à 1. $R(z^{-1})$ et $S(z^{-1})$ sont exprimés par le système d'équations (3.43).

$$\begin{cases} R(z^{-1}) = r_0 + r_1 \cdot z^{-1} \\ S(z^{-1}) = (s_0 + s_1 \cdot z^{-1}) \cdot (1 - z^{-1}) \end{cases} \quad (3.43)$$

Les pôles du système en boucle fermée sont imposés dans le domaine temporel discret au sein du cercle unitaire pour assurer la stabilité. Selon la valeur du coefficient d'amortissement ξ deux cas sont possibles. Dans le premier cas les trois pôles sont réels. Dans le second cas, un pôle est réel et les deux autres sont strictement imaginaires (systèmes d'équations (3.44)).

$$\begin{cases} p_1 = \exp(-\xi \cdot w_0 + j \cdot w_0 \cdot \sqrt{1 - \xi}) \cdot T_e \\ p_2 = \exp(-\xi \cdot w_0 - j \cdot w_0 \cdot \sqrt{1 - \xi}) \cdot T_e \\ p_3 = \exp(-w_0 \cdot T_e) \end{cases} \quad (3.44)$$

L'équation (3.45) représente le polynôme $D_m(z^{-1})$ appelé équation de diophantienne. En utilisant les équations (3.38) et (3.39), les polynômes $R(z^{-1})$ et $S(z^{-1})$ peuvent être identifiés. Le polynôme $T(z^{-1})$ est calculé en utilisant l'équation (3.46) ou $F(z^{-1})$ est un polynôme contenant les pôles sélectionnés pour être compensés afin d'imposer une dynamique en boucle fermée souhaitée. Pour la conception du contrôleur RST de référence de rampe, la procédure est la même que celle détaillée ci-dessus, la différence réside dans la détermination du polynôme T .

$$D_m(z^{-1}) = (1 - p_1 \cdot z^{-1}) \cdot (1 - p_2 \cdot z^{-1}) \cdot (1 - p_3 \cdot z^{-1}) \quad (3.45)$$

$$T(z^{-1}) = \frac{R(1)}{F(1)} \cdot F(z^{-1}) \quad (3.46)$$

D'après la modélisation de la MSAP et la technique de découplage et en utilisant la transformée de Laplace, nous déduisons que les fonctions de transfert de la MSAP peuvent être représentées par les équations (3.47) et (3.48).

$$\frac{I_{d,q}}{U_{d,q}} = \frac{\frac{1}{L_{d,q}}}{p + \frac{R_s}{L_{d,q}}} \quad (3.47)$$

$$\frac{\Omega}{I_q} = \frac{\frac{p \cdot \phi_r}{J}}{p + \frac{f_v}{J}} \quad (3.48)$$

Nous remarquons que les précédentes fonctions de transfert ont la même expression que la fonction de transfert de l'équation (3.41). Par conséquent, la démarche décrite ci-dessus peut s'appliquer aux fonctions de transfert de la MSAP afin de concevoir les régulateurs RST pour le contrôle du couple et de la vitesse. Les résultats de la commande FOC-RST sont illustrés dans les figures 3.14, 3.15 et 3.16. Comme pour la commande FOC-PI, nous appliquons 1N.m de couple de charge pour chaque 100 tr/min de vitesse. Les résultats de la commande RST sont très satisfaisants, nous remarquons que pour le résultat du contrôle de la vitesse, la mesure suit parfaitement la consigne, nous remarquons aussi l'absence du dépassement pour la valeur maximale de la vitesse rencontré dans le cas de la commande PI. Le contrôle des courants I_q et I_d répond bien aux consignes imposées, nous remarquons que les mesures oscillent autour des consignes avec moins de fluctuations. Le tableau 3.5 contient les différents paramètres de la commande vectorielle FOC-RST.

Les deux commandes FOC-PI et FOC-RST sont satisfaisantes en termes de temps de réponse et de dépassement, néanmoins pour le cas de la vitesse, la commande FOC-RST présente moins de dépassement par rapport à la commande FOC-PI. En outre les mesures des courants I_d et I_q sont moins fluctuantes dans les cas de la commande RST.

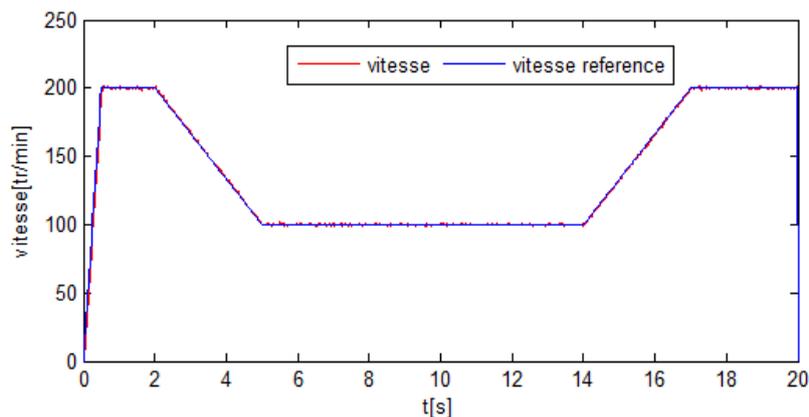


Figure 3.14: Résultat du contrôle de la vitesse pour la commande FOC-RST.

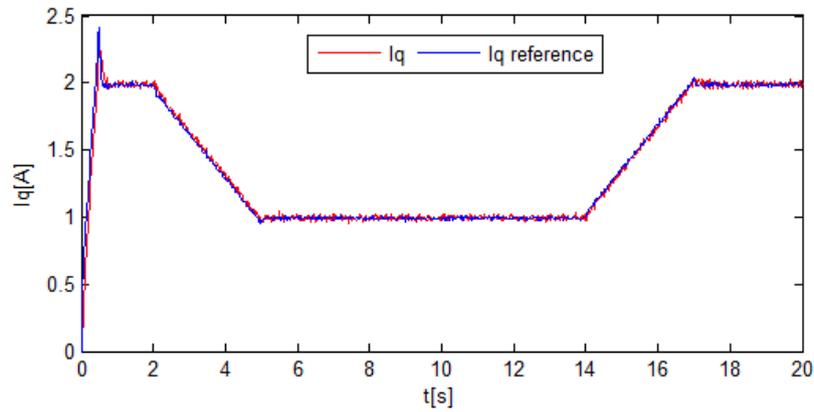


Figure 3.15: Résultat du contrôle du courant I_q pour la commande FOC-RST.

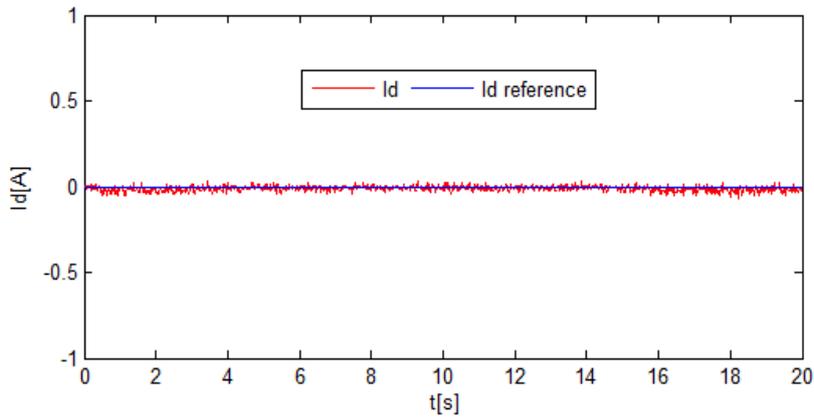


Figure 3.16: Résultat du contrôle du courant I_d pour la commande FOC-RST.

Tableau 3.5: Paramètres de la commande vectorielle FOC-RST.

Paramètres	Symbole	Valeur
Coefficient d'amortissement	ξ	1
Bande passante des courants I_d et I_q	$\omega_q = \omega_d$	3000 rad/s
Bande passante de la vitesse	ω_v	30 rad/s
Polynôme $S(z^{-1})$ pour le contrôle de courants	$S_{d,q}(z^{-1})$	$z^{-2} - 1.1701*z^{-1} + 0.1701$
Polynôme $R(z^{-1})$ pour le contrôle de courants	$R_{d,q}(z^{-1})$	$34,17*z^{-1} - 27.83$
Polynôme $S(z^{-1})$ pour le contrôle de la vitesse	$S_v(z^{-1})$	$z^{-2} - 1.7269*z^{-1} + 0.7269$
Polynôme $R(z^{-1})$ pour le contrôle de la vitesse	$R_v(z^{-1})$	$0.0088*z^{-1} - 0.0083$

Vu ses performances la commande RST est retenu pour la contrôle de la machine synchrone à aimants permanents, en outre nous proposons un test afin de vérifier la robustesse de cette commande vis-à-vis du changement des paramètres de la MSAP. Le test de robustesse est effectué selon les conditions opératoires suivantes : une augmentation de 50 % sur la résistance, une augmentation de 50% sur l'inductance L_d et une diminution de 50 % sur l'inductance L_q . Les mêmes conditions en termes de temps de réponse, d'amortissement et de période d'échantillonnage sont utilisées (Tableau 3.5). Le test de robustesse est effectué dans les mêmes conditions que le test normal. D'après les figures 3.17, 3.18 et 3.19, nous constatons que la réponse en vitesse et de couple ne sont pas affectées par la modification des paramètres de la machine, les mesures de vitesse et de couple suivent bien les consignes imposées. Nous concluons que le résultat de la commande RST reste très satisfaisant malgré le changement des paramètres internes de la MSAP.

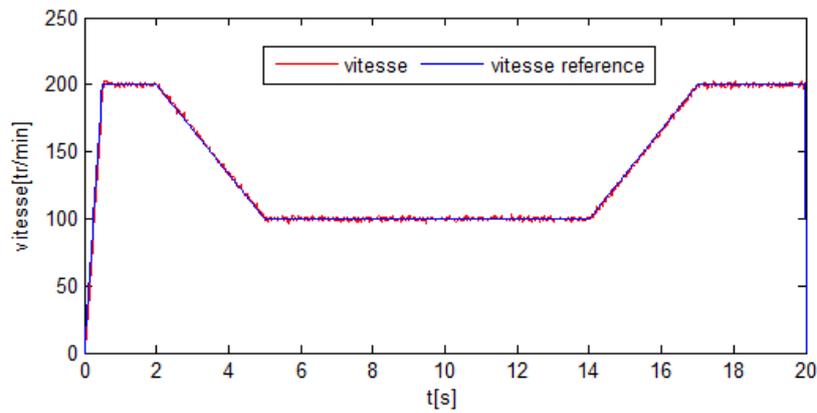


Figure 3.17: Résultat du test de robustesse pour la vitesse de la MSAP.

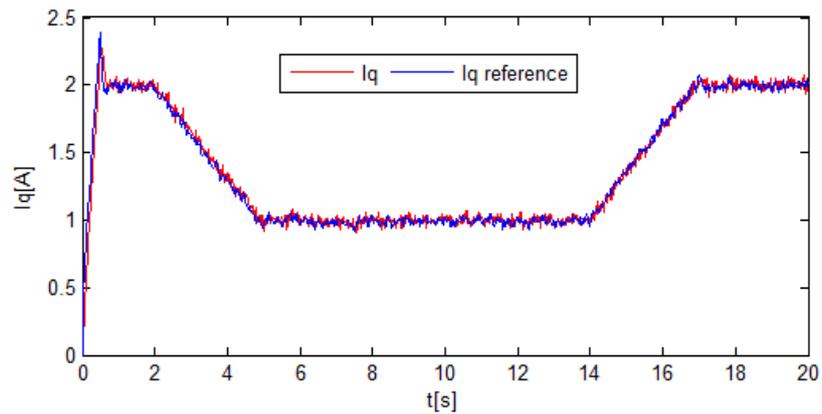


Figure 3.18: Résultat du test de robustesse pour le courant I_q .

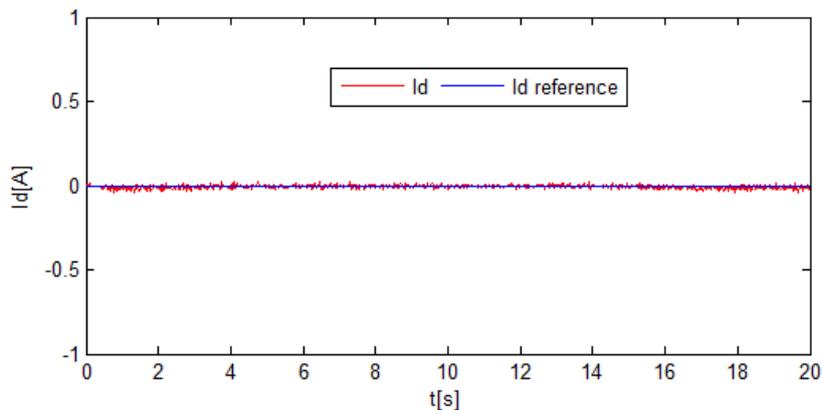


Figure 3.19: Résultat du test de robustesse pour le courant I_d .

3.5 Contrôle des convertisseurs d'interfaçage des sources d'énergie

3.5.1 Contrôle des contributions en courant des sources d'énergie

Les unités de stockage d'énergie électrique sont connectées au bus continu via des convertisseurs DC-DC bidirectionnels. Les consignes des courants des batteries et des supercondensateurs sont obtenues à partir de l'approche de gestion d'énergie électrique implémentée (l'approche fréquentielle dans le cas de cette thèse) et du bilan de puissance lié au convertisseur (équation (3.49)). Le calcul des consignes de la contribution en courant des sources est illustré dans les figures 4.2 et 4.3 et dans les équations (3.49) et (3.53). Ces références sont calculées en supposant un rendement unitaire pour les convertisseurs Buck-Boost. Cette hypothèse n'est pas vraie dans le cas des applications réelles, mais elle permet de

conserver la tendance du transfert de puissance. Les figures 3.20 et 3.21 illustrent respectivement le principe du contrôle RST pour le courant du module des batteries et le courant du pack des supercondensateurs.

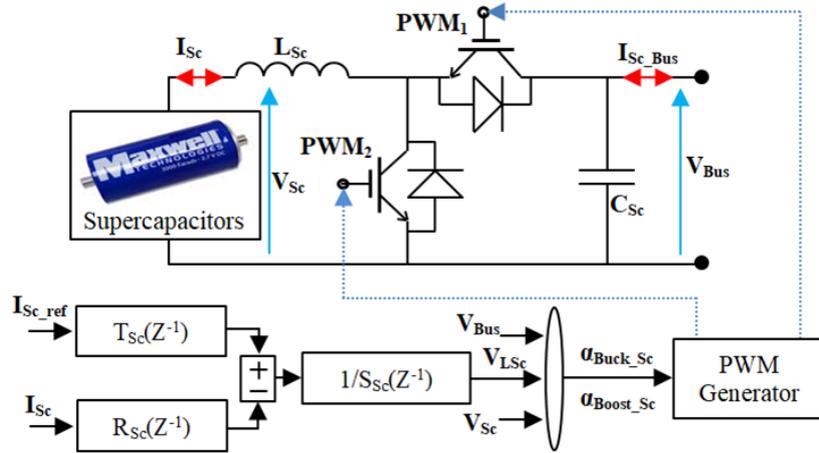


Figure 3.20: Régulateur RST pour le contrôle du courant des supercondensateurs.

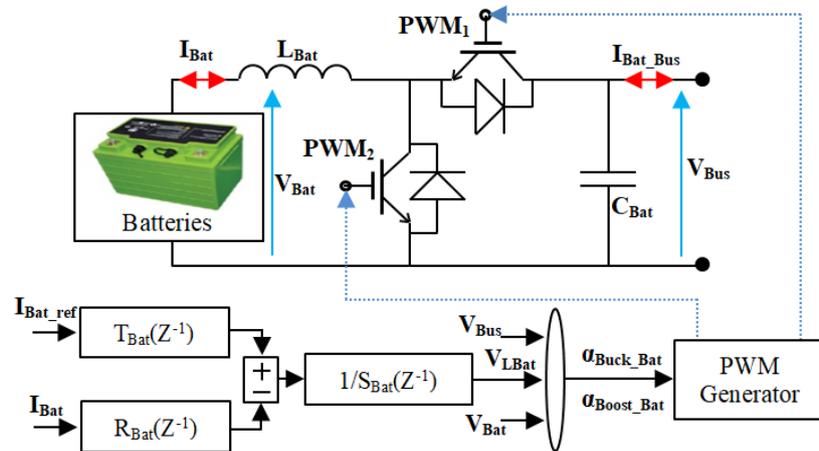


Figure 3.21: Régulateur RST pour le contrôle du courant des batteries.

Dans le but d'obtenir une erreur statique minimale avec rejet des perturbations, les polynômes $R_{Sc,Bat}(z^{-1})$, $T_{Sc,Bat}(z^{-1})$ et $S_{Sc,Bat}(z^{-1})$ présentés par le système d'équations (3.50) sont utilisés pour le contrôle des convertisseurs Buck-Boost. Les paramètres du contrôle des courants des supercondensateurs et des batteries sont calculés à l'aide du système d'équations (3.51), où $L_{Sc,Bat}$ représentent respectivement les inductances de lissage des courants des supercondensateurs et des batteries, T_e est la période d'échantillonnage, ω_{Sc} et ω_{Bat} présentent respectivement les bandes passantes pour le contrôle des courants des supercondensateurs et des batteries, f_d est la fréquence de découpage des convertisseurs statiques Buck-Boost. Pour contrôler le courant des sources d'énergie, nous utilisons les lois de commande présentées par le système d'équations (3.52). Ces lois de commande calculent instantanément les rapports cycliques, ces derniers sont comparées à une porteuse triangulaire afin de générer les signaux de commande PWM pour les convertisseurs.

$$\begin{cases} I_{Sc} = \frac{V_{Bus}}{V_{Sc}} \cdot I_{Sc_Bus} \\ I_{Bat} = \frac{V_{Bus}}{V_{Bat}} \cdot I_{Bat_Bus} \end{cases} \quad (3.49)$$

$$\begin{cases} S_{Bat/Sc}(z^{-1}) = 1 - z^{-1} \\ T_{Bat/Sc}(z^{-1}) = R_{Bat/Sc}(z^{-1}) = t_{0Bat/Sc} + t_{1Bat/Sc} \cdot z^{-1} \end{cases} \quad (3.50)$$

$$\begin{cases} t_{0Bat/Sc} = 2 \cdot (1 - e^{-\omega_{Bat/Sc} \cdot T_e}) \cdot \frac{L_{Bat/Sc}}{T_e} \\ t_{1Bat/Sc} = (e^{-2 \cdot \omega_{Bat/Sc} \cdot T_e} - 1) \cdot \frac{L_{Bat/Sc}}{T_e} \\ \omega_{Sc} = 2 \cdot \pi \cdot f_d; \quad \omega_{Bat} = \frac{\omega_{Sc}}{2} \end{cases} \quad (3.51)$$

$$\begin{cases} \alpha_{Buck_Bat/Sc} = \frac{V_{Bat/Sc} + V_{LBat/Sc}}{V_{Bus}} \\ \alpha_{Boost_Bat/Sc} = 1 - \frac{V_{Bat/Sc} - V_{LBat/Sc}}{V_{Bus}} \end{cases} \quad (3.52)$$

Vu que le pack des supercondensateurs fournit la composante haute fréquence extraite des sollicitations de la charge, la dynamique du contrôleur qui lui est associé est plus rapide que celui du module des batteries. C'est la raison pour laquelle la bande passante du contrôleur de la batterie est choisie égale à la moitié de celui du contrôleur des supercondensateurs. Il est à noter que le fonctionnement Boost correspond à une décharge de la source d'énergie, la mesure du courant dans ce cas est positive. Le fonctionnement Buck correspond à une charge de la source d'énergie, la mesure du courant est dans ce cas inférieure à 0.

3.5.2 Contrôle de la tension du bus continu

Généralement, le contrôle de la tension du bus continu nécessite deux boucles en cascade. La boucle interne contrôle le courant tandis que la boucle externe contrôle la tension. Dans ce travail, nous nous limitons à une seule boucle de contrôle (Figure 3.22). En effet, le courant de la source principale n'est pas contrôlé, il est déduit à partir de la loi des nœuds décrite par l'équation (3.53). La consigne du courant de la source principale est égale au courant de la charge au quel nous soustrairons les contributions des sources de stockage (batteries et supercondensateurs dans le cas du système à trois sources). Le courant de la source principale est donc imposé par l'évolution du système autrement dit l'évolution de la demande la charge et l'évolution des contributions des sources auxiliaires.

Dans un véhicule électrique, la tension du bus continu est dans la plupart des cas une constante. Dans cette étude, nous varions cette consigne afin de tester le bon fonctionnement de la boucle de contrôle de V_{Bus} . En outre, c'est toujours le convertisseur lié à la source

principale (celle ayant la plus grande densité d'énergie) qui contrôle V_{Bus} . Ce choix est justifié par le fait que d'une part la source principale est une source à grande densité d'énergie, elle ne peut pas restituer de la puissance puisque cela n'est pas compatible avec sa dynamique. D'autre part, nous ne pouvons pas contrôler la tension du bus continu et garantir la sollicitation en courant imposée par l'approche fréquentielle à la source principale.

$$\begin{cases} I_{Fc_Bus} = I_{Bus} - I_{Bat_Bus} - I_{Sc_Bus} \\ I_{Fc} = \frac{V_{Bus}}{V_{Fc}} \cdot I_{Fc_Bus} \end{cases} \quad (3.53)$$

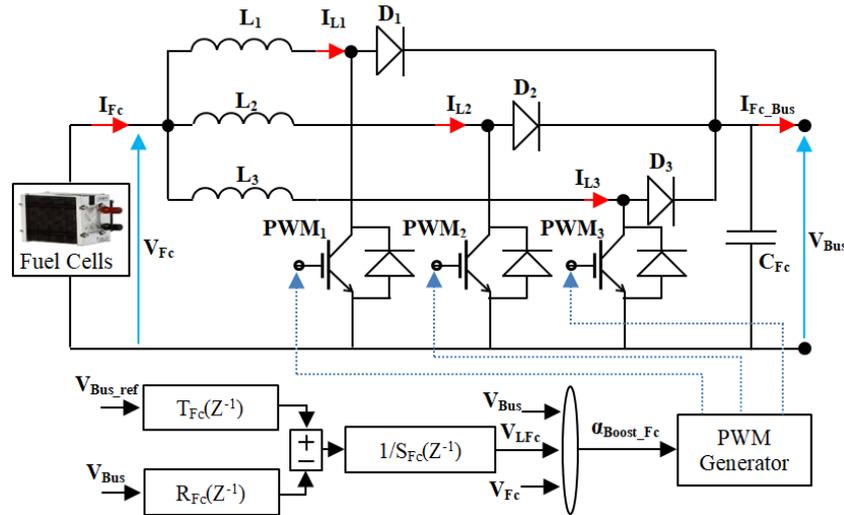


Figure 3.22: Régulateur RST pour le contrôle de la tension du bus continu.

Dans le but d'obtenir une erreur statique minimale avec un rejet de perturbation, les polynômes R, S et T utilisés pour le contrôle de la tension du bus continu sont présentés par le système d'équations (3.54). Les coefficients du contrôleur sont déduits à partir de l'analyse en boucle fermée, ils sont donnés par l'équation (3.55), où C_T est la somme des capacités présentes sur le bus continu, T_e est la période d'échantillonnage, ω_{Fc} est la bande passante du contrôleur de V_{Bus} , f_d présente la fréquence des signaux PWM.

$$\begin{cases} S_{Fc}(z^{-1}) = 1 - z^{-1} \\ T_{Fc}(z^{-1}) = R_{Fc}(z^{-1}) = t_{0Fc} + t_{1Fc} \cdot z^{-1} \end{cases} \quad (3.54)$$

$$\begin{cases} t_{0Fc} = 2 \cdot (1 - e^{-\omega_{Fc} \cdot T_e}) \cdot \frac{C_T}{T_e} \\ t_{1Fc} = (e^{-2 \cdot \omega_{Fc} \cdot T_e} - 1) \cdot \frac{C_T}{T_e} \\ C_T = C_{Bus} + C_{Bat} + C_{Sc} + C_{Fc} \\ \omega_{Fc} = \frac{\omega_{Sc}}{100} \end{cases} \quad (3.55)$$

La dynamique de la boucle de tension est généralement lente par rapport à celle des boucles de courant. La bande passante de la boucle de contrôle de V_{Bus} est supposée 100 fois

plus lente que celle de la boucle de contrôle du courant des supercondensateurs. Les valeurs des différents paramètres des régulateurs RST pour le contrôle des convertisseurs DC-DC sont contenues dans le tableau 3.6. La procédure de calcul des régulateurs RST pour le contrôle des courants des sources et celui de la tension du bus continu est présentée dans les références [31][38][39][108].

Tableau 3.6: Paramètres des régulateurs RST pour le contrôle des convertisseurs DC-DC.

Paramètres	Symbole	Valeur
Capacité au niveau du Bus continu	$C_{Sc}=C_{Bat}=C_{Fc}=C_{Bus}$	3300 μ F
Inductance à l'entrée des convertisseurs	$L_{Sc} = L_{Bat} ; L_{Fc}$	12mH ; 50 μ H
Paramètres du contrôle de I_{Sc}	$t_{0Sc} ; t_{1Sc}$	110.27; 59.60
Paramètres du contrôle de I_{Bat}	$t_{0Bat} ; t_{1Bat}$	85.84; 55.13
Paramètres du contrôle de V_{Bus}	$t_{0Fc} ; t_{1Fc}$	3.27; 3.23
Fréquence de contrôle des convertisseurs	f_d	2kHz

3.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons eu l'occasion de présenter une procédure de dimensionnement des sources d'énergie électrique basée sur la décomposition fréquentielle des sollicitations de la charge. Nous avons aussi présenté la commande des convertisseurs statiques liées aux différentes sources d'énergie ainsi que la commande de la MSAP à travers l'onduleur de tension triphasé. Le prochain chapitre sera dédié à la présentation de la stratégie de gestion d'énergie et à sa validation au niveau de l'environnement de simulation Matlab/Simulink.

Chapitre 4 : Stratégie de gestion d'énergie par approche fréquentielle et simulations comportementales du système hybride

“La connaissance s'acquiert par l'expérience, tout le reste n'est que de l'information”.
Albert Einstein.

4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté les dimensionnements des sources d'énergie électrique et les contrôles des différents convertisseurs de puissance utilisés dans les systèmes multi-sources proposés. A ce stade, nous avons tous les outils nécessaires afin de valider la stratégie de gestion d'énergie. Dans ce chapitre, Nous présenterons dans un premier temps le principe de la stratégie de gestion d'énergie basée sur l'approche fréquentielle, puis nous présenterons les résultats des simulations obtenues pour les deux types de systèmes étudiés à savoir : les systèmes à deux sources et les systèmes à trois sources. La validation de l'approche fréquentielle est réalisée à travers des simulations comportementales en utilisant l'environnement Matlab/Simulink.

4.2 Approche de répartition fréquentielle des sollicitations de la charge

4.2.1 Principe de l'approche fréquentielle

Généralement, les stratégies de gestion d'énergie visent avant tout la protection et l'amélioration de la réponse dynamique des sources d'énergie vis-à-vis des sollicitations de la charge (accélérations, décélérations et freinages dans le cas d'un véhicule). En comparaison avec les différentes approches de gestion d'énergie électrique proposées dans la littérature, la particularité de l'approche fréquentielle réside dans la prise en compte des forces et faiblesses des sources d'énergie en partageant la demande de la charge suivant les densités de puissance et d'énergie de chacune des sources mises en jeu.

En effet, les densités de puissance et d'énergie entrent dans le calcul des constantes de temps des filtres permettant la décomposition de la demande de la charge en plusieurs composantes. Ainsi, suivant les performances de chacune des sources et suivant leur nombre, cette approche partage judicieusement la demande de la charge entre les sources interconnectées. Si par exemple, le véhicule électrique contient trois sources : une pile à combustible, un module de batteries et un pack des supercondensateurs. L'approche fréquentielle décomposera les sollicitations de la chaîne de traction/propulsion en trois composantes : une composante basse fréquence qui sera attribuée à la pile à combustible, le module des batteries assurera la composante moyenne fréquence. Tandis que les supercondensateurs, vu leurs performances en terme de dynamique garantiront la composante haute fréquence.

Les algorithmes de gestion d'énergie ont pour objectif d'assurer la répartition optimale des consignes de puissance/énergie (les sollicitations de la charge) entre les différentes sources pendant les régimes de fonctionnement du véhicule tout en répondant aux besoins attendus par le conducteur. En fonction des entrées de commande, l'algorithme de gestion d'énergie doit être en mesure de déterminer la contribution de chaque source à tout instant afin de répondre aux prescriptions du cahier de charge tout en protégeant et assurant un fonctionnement optimal pour les systèmes de stockage d'énergie mises en jeu [8][9][10][11][12][13][109].

Le but de la gestion d'énergie basée sur l'approche fréquentielle est d'assurer une bonne gestion d'énergie électrique en partageant de façon optimale la demande énergétique du

véhicule entre les différentes sources d'énergie embarquées [33][34]. Le principe consiste à décomposer la puissance (ou le courant vu que la tension du bus continu est généralement constante) en plusieurs composantes. Le nombre de composantes extraites des sollicitations de la charge est égal aux nombres de sources d'énergie électrique disponibles à bord du véhicule. Admettons qu'un véhicule électrique embarque deux sources d'énergie électrique, un module de batteries et un pack des supercondensateurs, dans ce cas la demande de la charge sera décomposée en deux composantes : une composante haute fréquence assurée par le pack des supercondensateurs, une composante basse fréquence fournie par le module des batteries. La mise en œuvre de cette méthode passe par le contrôle des convertisseurs DC-DC liant les différentes sources d'énergie à la chaîne de traction/propulsion par l'intermédiaire du bus continu [35][36][109][110].

Pour un fonctionnement effectif de l'approche fréquentielle, les composantes extraites à partir des sollicitations de la charge doivent respecter les performances des unités de stockage en termes de puissance et d'énergie. C'est en effet, le choix des constants de temps des filtres qui détermine le contenu fréquentielle des composantes assignées aux sources. Ce choix malgré sa difficulté et sa dépendance des plusieurs paramètres doit être minutieusement étudié.

Afin de comparer les performances énergétiques des différentes solutions de stockage d'énergie électrique et dans le but d'avoir une idée sur le choix des sources d'énergie et les constantes de temps des filtres de l'approche fréquentielle, le diagramme de Ragone (Figure 1.15) est généralement utilisé. Il s'agit d'un diagramme à axes logarithmiques qui place les systèmes de stockage dans un plan densité de puissance, densité d'énergie. En fonction de l'architecture du système de traction, le cycle de conduite et les performances attendus en termes de puissance et d'énergie, le diagramme de Ragone permet d'avoir une idée sur le ou les éléments de stockage pouvant assurer la mission. En plus des indications sur les densités de puissance et d'énergie, le diagramme de Ragone donne une idée sur les constantes de temps adaptées à chaque unité de stockage. Les piles à combustibles sont plus adaptées pour les applications à constante de temps allant de quelques dizaines de minutes à quelques heures, les batteries fonctionnent de façon optimal si elles sont utilisées sur un horizon temporel situé entre des dizaines de secondes et quelques minutes. Les supercondensateurs ont une forte densité de puissance et peuvent donc assurer des missions à constante de temps de l'ordre de quelques de secondes voir moins. Afin de bien distinguer le contenu fréquentielle adapté à chaque source d'énergie, nous projetons le diagramme de Ragone sur un axe fréquentiel (Figure 4.1), nous obtenons les intervalles de fonctionnement optimal des différentes unités de stockage. Dans un ordre croissant de fréquence, les unités peuvent être classées comme suit : Pile à combustible, batteries et supercondensateurs.

En résumé, le diagramme de Ragone permet d'avoir une idée sur les performances en termes de puissance et d'énergie pour une source donnée, il permet aussi d'avoir une idée sur le contenu fréquentielle adapté (constante de temps du filtre) à la source en question. Cependant, les informations fournies par ce diagramme ne sont pas précises car pour chaque solution de stockage d'énergie, il existe plusieurs types, par exemple pour les batteries lithium il existe plusieurs technologies (lithium polymère, lithium ion, lithium fer phosphate, etc.). En outre, ce diagramme ne donne pas une indication précise sur la constante de temps à

choisir, mais plutôt un intervalle où la constante de temps peut varier. Le choix de la constante de temps sera discuté dans la prochaine sous-section.

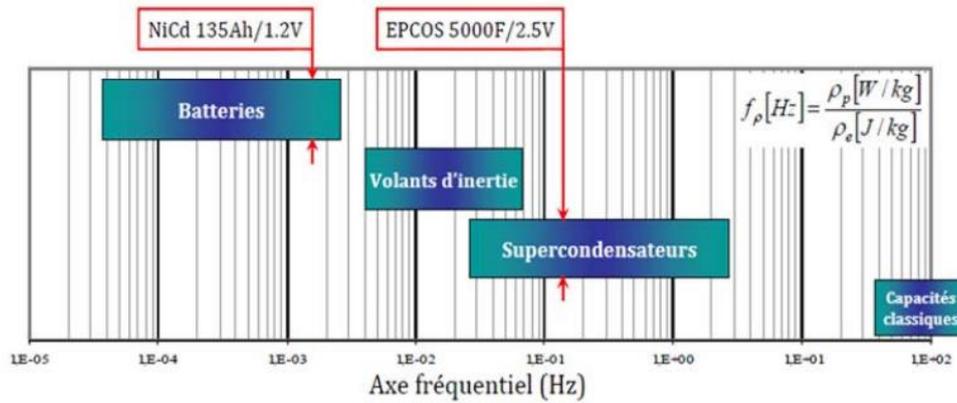


Figure 4.1: Exemple de projection du diagramme de Ragone sur un axe fréquentiel [38][111].

Les figures 4.2 et 4.3 illustrent respectivement le principe de l'approche fréquentielle pour un système deux sources et un système trois sources. Cette approche repose sur l'utilisation des filtres passe-bas afin d'extraire les différentes composantes à partir de la demande totale de la charge. Généralement, pour N sources d'énergie différentes, il est nécessaire d'avoir (N-1) filtres afin de répartir la demande de la charge sur toutes les sources. Les composantes estimées via l'approche fréquentielle correspondent aux contributions des sources au niveau du bus continu. Comme il est indiqué dans les figures 4.2 et 4.3, pour avoir les contributions directes des sources, une conservation de puissance entre l'entrée et la sortie du convertisseur a été adoptée (rendement convertisseur = 100%). Dans le cas réel, le fonctionnement d'un convertisseur statique entraîne toujours des pertes électriques (rendement convertisseur < 100%).

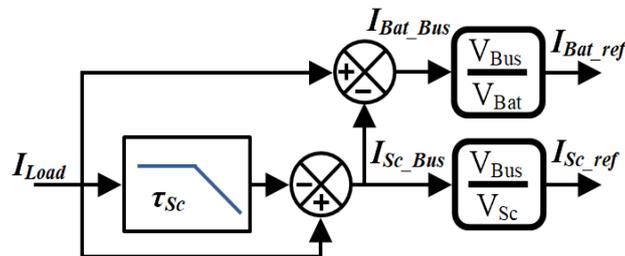


Figure 4.2: Décomposition fréquentielle pour un système à deux sources d'énergie.

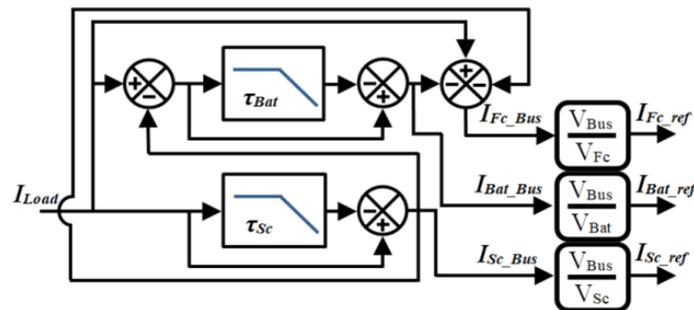


Figure 4.3: Décomposition fréquentielle pour un système à trois sources d'énergie.

En conclusion, l'approche fréquentielle assure le fonctionnement des unités de stockage dans des plages de fréquence adaptées à leurs performances, le rendement et la durée de vie de ces sources sont ainsi améliorés. Néanmoins, le choix de la constante de temps adapté aux

sources semble être une tâche difficile, car il est responsable du contenu fréquentielle assurée par la source.

4.2.2 Choix des constantes de temps des filtres

Le ratio de la densité de puissance sur la densité d'énergie est équivalent à une fréquence, cette dernière est une indication caractérisant chaque technologie de stockage d'énergie. Tandis que le ratio de la densité d'énergie sur la densité de puissance est équivalent au temps et c'est ce que nous appelons constante de temps (équation (4.1)) [33][34][35][36][38].

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{(Fc,Bat,Sc)} \approx \frac{\rho_{P(Fc,Bat,Sc)} [W / kg]}{\rho_{E(Fc,Bat,Sc)} [Ws / kg]} \\ \tau_{(Fc,Bat,Sc)} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{(Fc,Bat,Sc)}} \end{array} \right. \quad (4.1)$$

Les filtres passe-bas à utiliser sont les éléments les plus importants dans l'approche fréquentielle, ils sont responsables de la répartition de la demande de la charge sur les différentes sources d'énergie mises en jeu. Ces filtres effectuent les répartitions suivant les constantes de temps choisies. Généralement les constantes de temps sont fixes, mais comme les performances de la source en termes de puissance et d'énergie peuvent se détériorer avec le temps, il est possible que les constantes de temps ne soient plus adaptées aux sources.

Le choix des constantes de temps des filtres est très important car c'est ce choix qui indique les composantes assignées aux sources d'énergie. En outre c'est un choix extrêmement difficile car il dépend de deux paramètres la densité de puissance et la densité d'énergie. C'est deux paramètres peuvent changer en fonction de l'état de santé et du vieillissement des sources ce qui complique la détermination de la bonne constante de temps en fonction de l'usure de la source. Dans ce travail, nous calculons les constantes de temps à partir des valeurs des densités de puissance et d'énergie indiquées par les documents constructeurs des sources d'énergies présentés dans les références [88][112] et dans l'annexe B. L'équation (4.2) présente le calcul des constantes de temps pour les batteries LFP et les supercondensateurs Boost-Cap (3000F/2.7V). Dans le dernier chapitre de ce mémoire, nous présenterons une stratégie de gestion d'énergie adaptative qui permet de varier la constante de temps des filtres en fonction de l'état de santé des sources d'énergie.

$$\left\{ \begin{array}{l} \tau_{Sc} \approx \frac{\rho_{ESc}}{2 \cdot \pi \cdot \rho_{PSc}} = \frac{6 \cdot 3600Ws / kg}{2 \cdot \pi \cdot 5,9 \cdot 1000W / kg} = 0,58s \\ \tau_{Bat} = \frac{\rho_{EBat}}{2 \cdot \pi \cdot \rho_{PBat}} = \frac{102,24 \cdot 3600Ws / kg}{2 \cdot \pi \cdot 309,68W / kg} = 189s \end{array} \right. \quad (4.2)$$

Avant d'entamer les simulations comportementales pour les systèmes à deux sources et à trois sources, nous présenterons deux parties indispensables au bon fonctionnement des simulations. La première partie s'intéresse au contrôle de la MSAP qui émule le fonctionnement de la chaîne de traction du véhicule qui représente la charge de notre système

multi-sources. La deuxième partie concerne la commande des convertisseurs de puissance liés aux différentes sources d'énergies.

4.3 Simulations comportementales du véhicule par approche fréquentielle

Dans cette section, nous présenterons les résultats des simulations pour un système à deux sources et un système à trois sources en utilisant différents cycles de conduite. Pour le système à trois sources, nous présenterons les résultats de la gestion d'énergie électrique par approche fréquentielle pour deux cycles de conduite à savoir le FTP-75 et le WLPT. Dans un véhicule électrique, V_{Bus} est généralement constante, dans nos simulations nous varions cette consigne afin de montrer la robustesse du contrôle de la tension du bus continu.

Il est à noter que les sollicitations de la chaîne de traction en termes de courant sont calculées en utilisant trois paramètres : la vitesse du véhicule, le couple nécessaire pour faire avancer le véhicule et la tension instantanée du bus continu. Dans les équations ainsi que les figures, le courant de la charge et le courant du bus continu sont similaires, ils sont désignés par I_{Bus} ou I_{Load} . Ce courant est calculé par l'intermédiaire de l'équation (4.3) ou encore l'équation (4.4). Les deux dernières équations sont équivalentes, où F_{tract} est la force totale nécessaire pour tracter le véhicule, sa valeur est obtenue en utilisant l'équation (3.6).

$$I_{Bus} [A] = \frac{Vitesse[rad \cdot s^{-1}] * Couple[N \cdot m]}{V_{Bus} [V]} \quad (4.3)$$

$$I_{Bus} [A] = \frac{Vitesse[m \cdot s^{-1}] * F_{tract} [N]}{V_{Bus} [V]} \quad (4.4)$$

Les équations (4.3) et (4.4) font l'équivalence entre la puissance électrique à l'entrée de l'onduleur et la puissance mécanique à la sortie du moteur (ou le cas inverse quand la machine fonctionne en génératrice). Cette équivalence repose sur une hypothèse de pertes nulles. Dans le cas réel, cette équivalence est erronée car il existe toujours des pertes électriques au niveau de l'onduleur et le moteur électrique et des pertes mécaniques au niveau de l'arbre de transmission, mais l'erreur commise ne modifie pas la tendance du bilan de puissance.

4.3.1 Système à deux sources d'énergie (batteries et supercondensateurs)

La stratégie globale de contrôle du système à deux sources est illustrée par la figure 4.4. La stratégie de gestion d'énergie basée sur l'approche fréquentielle prend en entrée le courant de la charge (I_{Bus}) et la constante de temps du filtre de répartition. En sortie elle calcule la contribution en courant du pack des supercondensateurs ($I_{Sc_Bus_ref}$). La contribution en courant du module des batteries est déduite du courant de la charge et du courant des supercondensateurs.

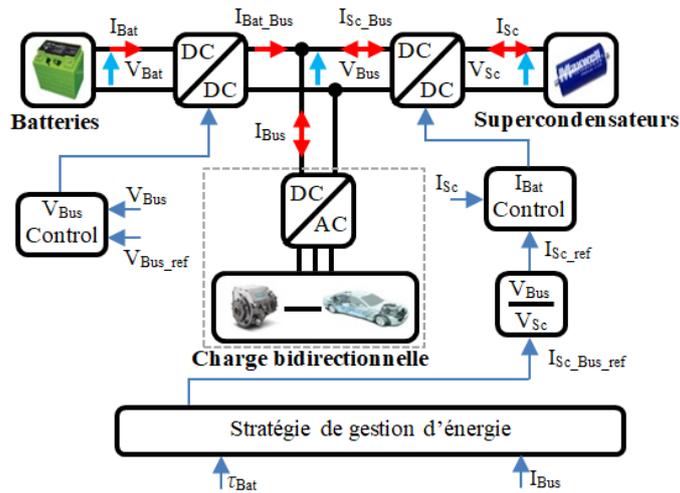


Figure 4.4: Stratégie du contrôle globale pour un système deux sources.

Comme il a été mentionné dans les sections précédentes, le calcul du courant de la charge est obtenu en utilisant les mesures du couple et de la vitesse du véhicule ainsi que la mesure de la tension du bus continu. Pour le cycle NEDC, le contrôle de la machine en termes de couple et de vitesse est illustré respectivement par les figures 4.5 et 4.6. Nous remarquons que les contrôles de la vitesse et du couple sont satisfaisants vu que les mesures suivent bien les consignes. Les contrôles du couple et de la vitesse sont réalisés à l'échelle d'une petite machine dont la puissance est égale à 2,26kW. Les valeurs à l'échelle du véhicule sont obtenues en multipliant les valeurs obtenues par un facteur de remise à échelle (dans notre cas, le facteur d'échelle est égale à 50).

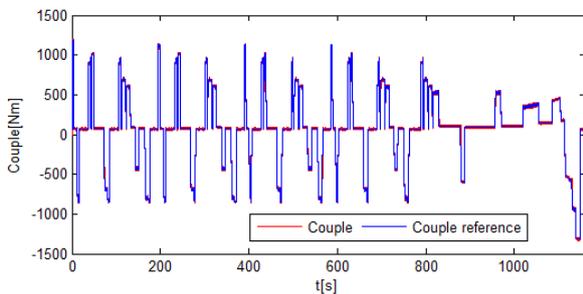


Figure 4.5: Résultat du contrôle du couple pour le Cycle NEDC.

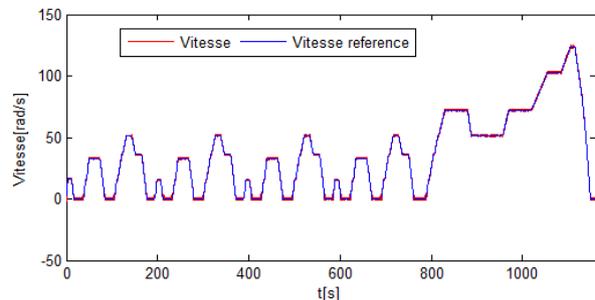


Figure 4.6: Résultat du contrôle de la vitesse pour le Cycle NEDC.

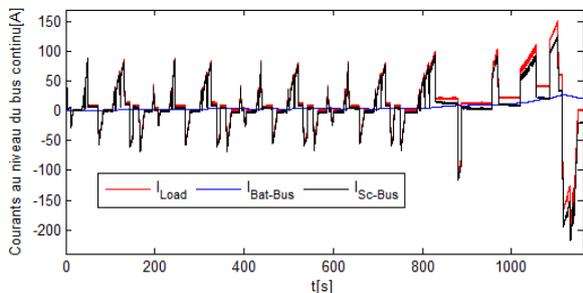


Figure 4.7: Contribution des deux sources au niveau du bus continu (Cycle NEDC).

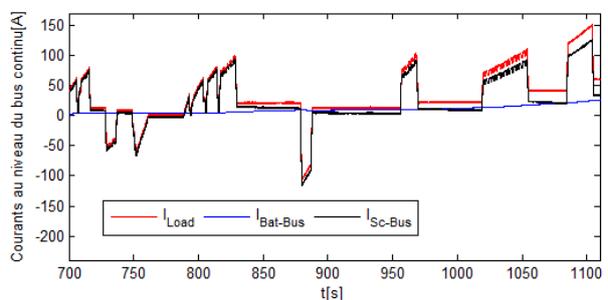


Figure 4.8: Zoom sur la contribution des sources au niveau du bus continu (Cycle NEDC).

Pour le système à deux sources, le courant de la charge est partagé en deux composantes : une composante haute fréquence assurée par la source ayant une densité de puissance élevée et une composante basse fréquence attribuée à la source ayant une densité d'énergie élevée.

Dans notre cas, un module de batterie LFP constitue la source d'énergie principale, le pack des supercondensateurs joue le rôle de la source auxiliaire du système multi-sources. La figure 4.7 rassemble les contributions en courant au niveau du bus continu des sources ainsi que la demande en courant de la charge. Nous constatons que la majorité des fluctuations sont assurées par le pack des supercondensateurs. La demande en courant à faible variations est compensée par le module des batteries LFP. Un zoom sur les contributions des sources et la demande de la charge est illustré par la figure 4.8.

Les figures 4.9 et 4.10 illustrent respectivement les contributions du pack des supercondensateurs et du module des batteries LFP. Nous constatons que les mesures suivent parfaitement les consignes imposées par la stratégie de gestion d'énergie électrique. Les variations rapides du courant sont garanties par les supercondensateurs tandis que les batteries LFP assurent le reste des sollicitations de la chaîne de traction du véhicule. Les sollicitations assurées par la source d'énergie principale ont un faible contenu fréquentielle, cela correspond bien aux performances du module des batteries qui possèdent dans ce cas une densité de puissance beaucoup plus faible que celle des supercondensateurs.

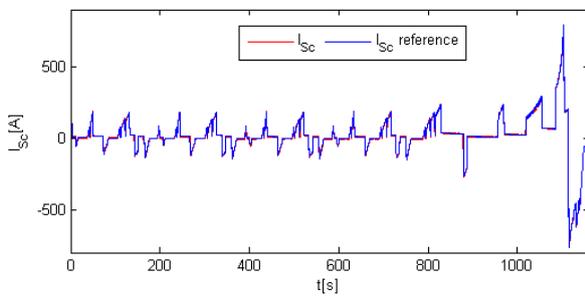


Figure 4.9: Contribution en courant du pack des supercondensateurs (Cycle NEDC).

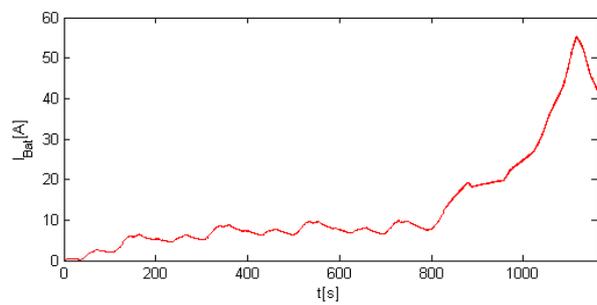


Figure 4.10: Contribution en courant du module des batteries (Cycle NEDC).

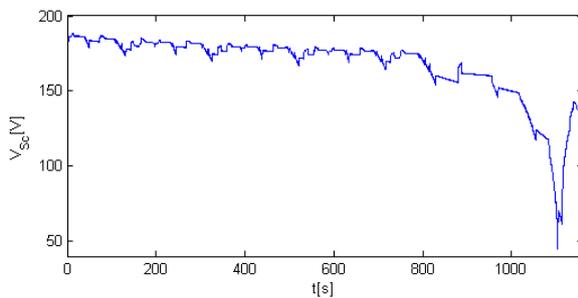


Figure 4.11: Tension aux bornes du pack des supercondensateurs (Cycle NEDC).

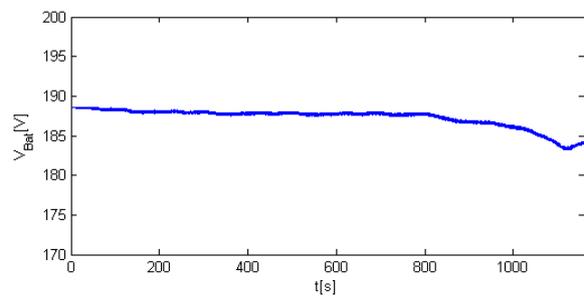


Figure 4.12: Tension aux bornes du module des batteries (Cycle NEDC).

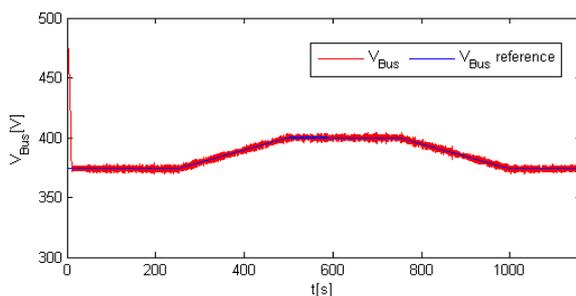


Figure 4.13: Résultat du contrôle de la tension du bus continu (Cycle NEDC).

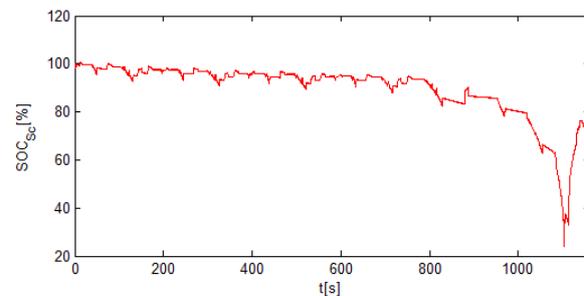


Figure 4.14: Etat de charge du pack des supercondensateurs (Cycle NEDC).

Le module des batteries constitue notre source d'énergie principale. La courbe de tension des batteries illustrée par la figure 4.12 ne contient pas des variations rapides car comme nous l'avons déjà mentionné les batteries assurent la composante basse fréquence de la demande de la chaîne de traction, sans oublier la grande capacité du modèle des batteries (100Ah), ce qui fait que la tension ne bouge pas. Par contre, la tension des supercondensateurs (S_c) illustrée par la figure 4.11 fluctuent énormément vu que leur courant varie considérablement et change constamment de signe suivant le mode de fonctionnement du véhicule électrique (accélération, décélération, freinage). Le résultat du contrôle de la tension du bus continu est présenté par la figure 4.13, ce contrôle est très satisfaisant car la mesure suit bien le changement de la consigne.

A l'issue des simulations pour le système deux sources, nous pouvons conclure que la répartition des énergies et des puissances respectent bien les performances des sources d'énergie mises en jeu. Le contrôle RST implémenté est performant vu que les mesures suivent bien les consignes imposées par l'approche de la gestion d'énergie. Bien que l'approche fréquentielle protège les sources ayant de faible densité de puissance, elle ne prend pas en compte l'état de charge des sources auxiliaires (Figure 4.14). En outre, elle ne suit pas l'état de santé et le vieillissement des sources en temps réel. Du fait que la constante de temps du filtre est constante, les mêmes sollicitations sont imposées à la source quel que soit son état de charge.

4.3.2 Système à trois sources d'énergie (PAC, batteries et S_c)

4.3.2.1 Simulations du système à trois sources pour le cycle FTP-75

Le schéma de la stratégie de commande globale du système multi-sources est illustré dans la figure 4.15.

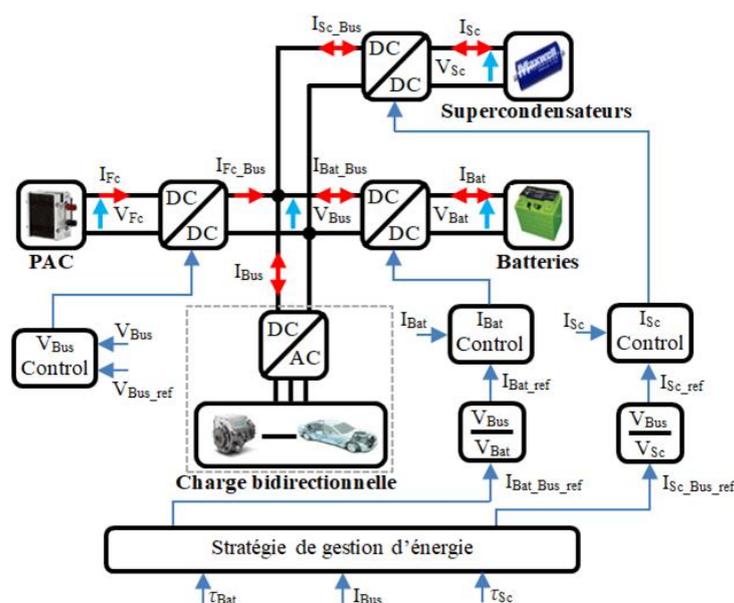


Figure 4.15: Stratégie du contrôle globale pour un système trois sources.

Avant de présenter les résultats de l'approche fréquentielle pour ce système, nous présenterons dans un premier temps les résultats du contrôle de la vitesse et du couple pour le cycle FTP-75. Le couple et la vitesse de la machine ainsi que la tension du bus continu

permettront de calculer les sollicitations de la charge I_{Load} . Pour le cycle FTP-75, le contrôle du couple et de la vitesse sont illustrés respectivement par les figures 4.16 et 4.17. Le contrôle RST de la MSAP est satisfaisant vu que les mesures du couple et de la vitesse sont très proches des références obtenues à partir du modèle dynamique du véhicule.

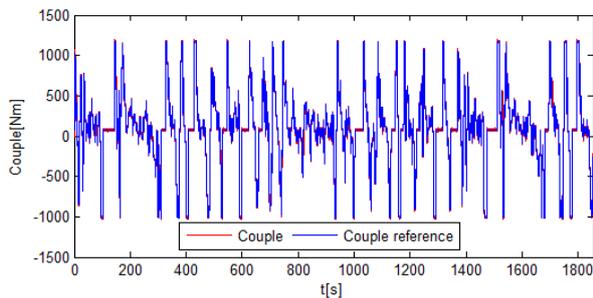


Figure 4.16: Résultat du contrôle du couple pour le cycle NEDC.

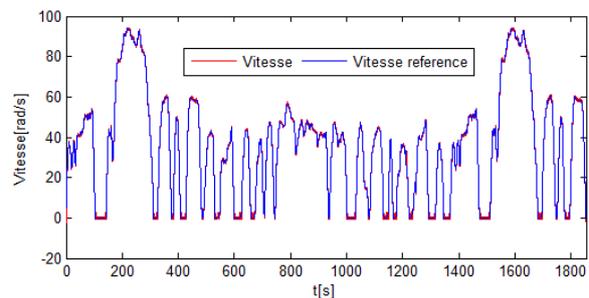


Figure 4.17: Résultat du contrôle de la vitesse pour le cycle FTP-75.

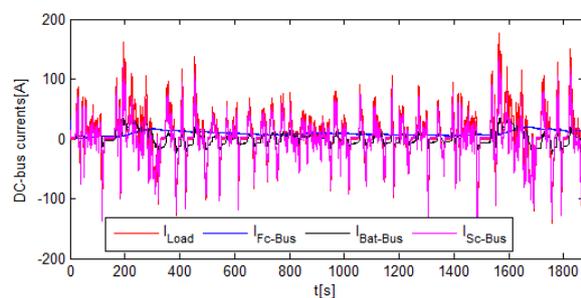


Figure 4.18: Contribution des sources au niveau du bus continu (Cycle FTP-75).

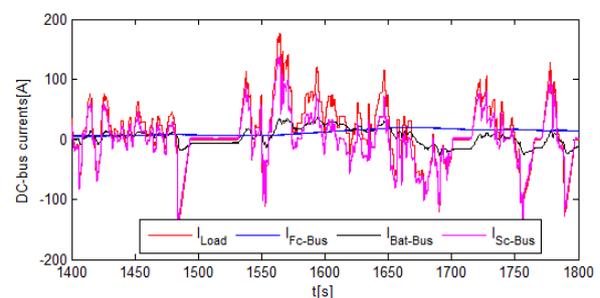


Figure 4.20: Zoom sur les contributions des sources au niveau du bus continu (Cycle FTP-75).

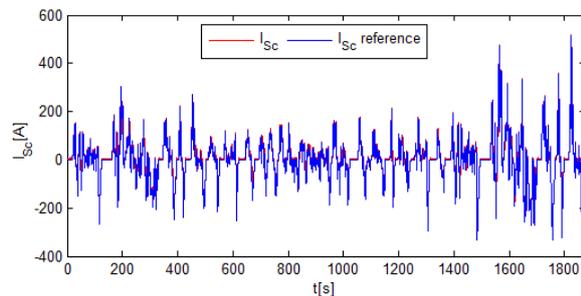


Figure 4.19: Contribution en courant du pack des supercondensateurs (Cycle FTP-75).

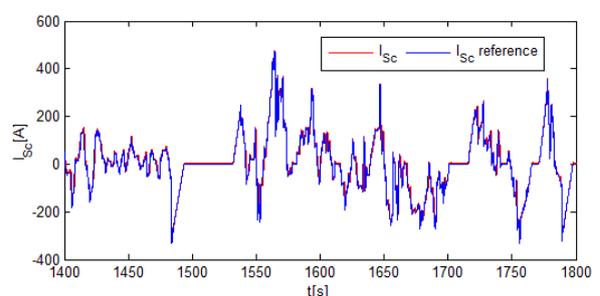


Figure 4.21: Zoom sur la contribution en courant du pack des supercondensateurs (Cycle FTP-75).

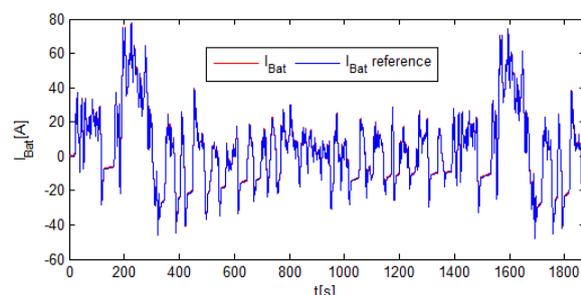


Figure 4.22: Contribution en courant du module des batteries (Cycle FTP-75).

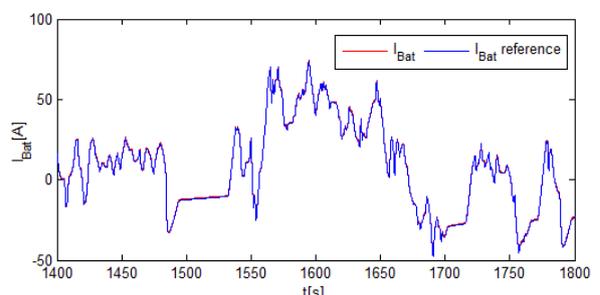


Figure 4.23: Zoom sur la contribution en courant du module des batteries (Cycle FTP-75).

Pour le système à trois sources d'énergie, le courant de la charge est partagé en trois composantes : une composante haute fréquence assurée par la source ayant une densité de puissance élevée et une composante basse fréquence attribuée à la source ayant une densité d'énergie élevée. La composante moyenne fréquence est accordée à une source pouvant

supporter des demandes en puissance relativement élevée tout en ayant une densité d'énergie suffisante. Dans notre cas, la pile à combustible est notre source d'énergie principale. Le module des batteries assurera la composante moyenne fréquence. Les supercondensateurs constituent la source à forte densité de puissance. Les figures 4.18 et 4.20 regroupent les contributions en courant au niveau du bus continu pour les sources d'énergie ainsi que la demande en courant de la charge. Nous constatons que la majorité des fluctuations sont assurées principalement par le pack des supercondensateurs et dans la deuxième place le module des batteries. La demande en courant à faible fréquence est compensée par la PAC.

Les figures 4.21 et 4.23 attestent que les courants du pack des supercondensateurs et celui du module des batteries sont très proches de leurs consignes. Nous constatons aussi que la majorité des fluctuations du courant de la charge sont assurées par ces deux sources (Figures 4.19 et 4.22). La finalité de l'approche fréquentielle est donc bien vérifiée. Elle permet de réduire l'impact des fluctuations du courant sur la source principal d'énergie. La composante basse fréquence du courant de la charge assignée à la PAC est présentée sur la figure 4.24. L'allure de la demande est adaptée aux faibles performances dynamiques de la pile à combustible.

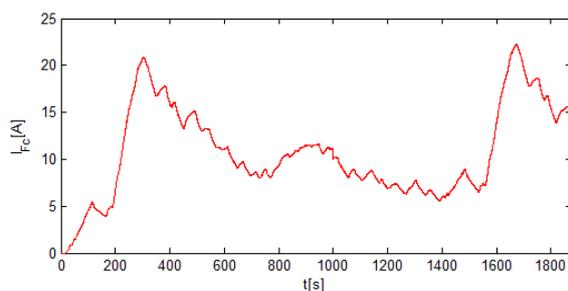


Figure 4.24: Contribution en courant de la PAC (Cycle FTP-75).

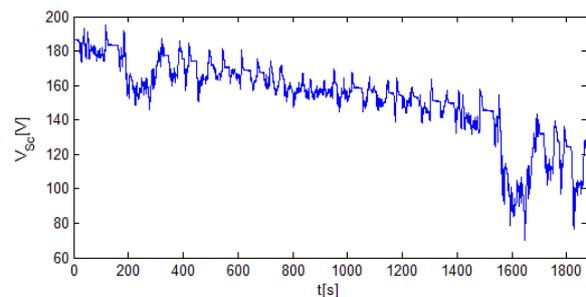


Figure 4.25: Tension aux bornes du pack des supercondensateurs (Cycle FTP-75).

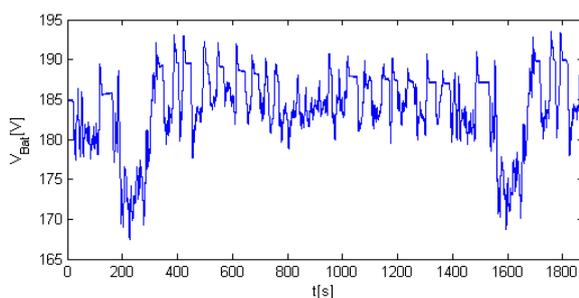


Figure 4.26: Tension aux bornes du module des batteries (Cycle FTP-75).

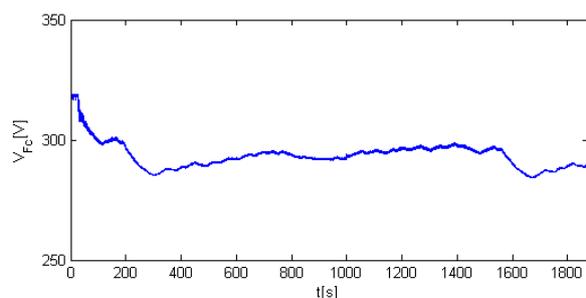


Figure 4.27: Tension aux bornes de la PAC (Cycle FTP-75).

La tension aux bornes du module des supercondensateurs est illustrée sur la figure 4.25. Trois principales phases sont contenues dans la réponse en tension des supercondensateurs. La première situation correspond à une baisse de tension, cela est dû à l'augmentation rapide du courant de la charge ce qui provoque une décharge rapide du pack des supercondensateurs. Dans ce cas, le module des supercondensateurs est sollicité afin de fournir la composante haute fréquence du courant. La seconde situation coïncide avec l'augmentation de la tension du pack des supercondensateurs due une restitution de l'énergie. Cette énergie est produite par la chaîne de traction durant les fortes décélérations et les freinages. La troisième situation correspond à la non-variation de V_{sc} . Dans ce cas, le pack des supercondensateurs n'est pas

sollicité par la charge, les autres sources prennent le relais pour satisfaire la demande du véhicule.

La tension aux bornes du module des batteries est représentée par la figure 4.26. Comme c'est le cas pour le pack des supercondensateurs, la tension présente trois situations, une phase de charge qui correspond à la restitution de la composante moyenne fréquence du courant de la charge. La phase de décharge correspond à la fourniture de la composante moyenne fréquence demandée par la chaîne de traction et finalement une phase de non sollicitation. En comparaison avec les supercondensateurs, les fluctuations demandées à la batterie sont moins dynamiques, cependant il se peut que cette composante ne soit pas adaptée à l'état des batteries et par conséquent la valeur de cette constante de temps nécessite une adaptation (voir le cinquième chapitre).

La tension de la pile est présentée par la figure 4.27. Comme c'est la PAC qui assure la composante basse fréquence du courant de la charge, sa tension ne contient pas des variations rapides comme c'est le cas des batteries et des supercondensateurs. La consigne et la mesure de la tension du bus continu sont présentées par la figure 4.28. La tension du bus continu est dans la majorité des cas, égale à une constante. Cependant, dans le but d'évaluer les performances du contrôle de la tension du bus continu, nous imposons des références variables. Les résultats montrent que le contrôle est très satisfaisant. En guise de conclusion, la stratégie de gestion d'énergie électrique basée sur la répartition de la demande de la charge assure un fonctionnement optimal du système multi-sources. L'extraction des composantes du courant (ou de la puissance) prend en compte les performances dynamiques des sources interconnectées. De ce fait, l'impact des fluctuations du courant de la charge est clairement réduit, en plus le dimensionnement des sources embarquées est nettement optimisé.

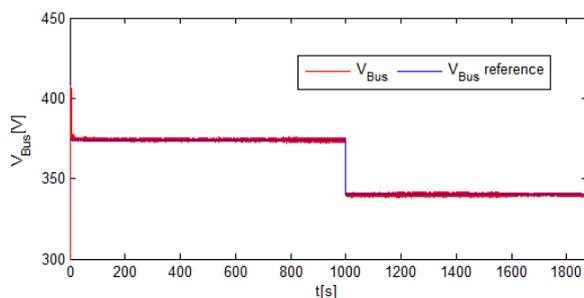


Figure 4.28: Résultat du contrôle de la tension du bus continu (Cycle FTP-75).

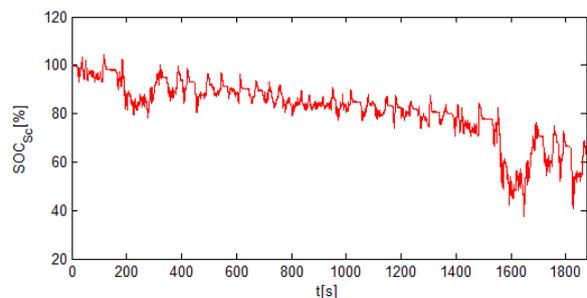


Figure 4.29: Etat de charge du pack des supercondensateurs (Cycle FTP-75).

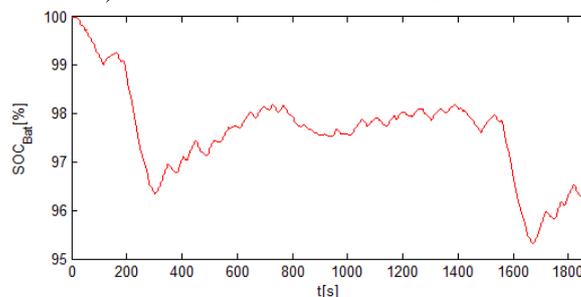


Figure 4.30: Etat de charge du module des batteries (Cycle FTP-75).

Les figures 4.29 et 4.30 représentent respectivement les états de charge pour le pack des supercondensateurs et le module des batteries. Vu que le module des batteries est moins sollicité, l'état de charge ne varie pas considérablement. Ce n'est pas le cas du pack des

supercondensateurs, où l'état de charge descend au-dessous de 40%. Les éventuelles améliorations de l'approche fréquentielle consiste à la prise en compte de l'état de charge des sources et aussi la surveillance de l'état de santé des sources et l'adaptation des constantes de temps des filtres.

4.3.2.2 Simulations du système à trois sources pour le cycle WLPT

Le schéma globale du contrôle est semblable à celui de la section précédente seule le cycle de conduite change. Dans cette section, nous nous intéresserons aux résultats de simulations concernant le système à trois sources en utilisant le cycle WLPT. Nous avons choisis de faire plusieurs simulations pour montrer que le comportement du système est différent suivant le cycle de conduite et les sollicitations auxquelles elles sont soumises. Nous avons présenté les simulations du système à trois sources pour deux cycles de conduite différents dans le but de montrer que les états de charge des sources varient suivant la demande de la chaîne de traction. Autrement dit, suivant le cycle de mission choisi.

Les figures 4.31 et 4.32 présentent respectivement les résultats du contrôle du couple et de la vitesse pour la machine de traction. Comme pour les deux précédentes simulations, ces résultats sont utilisés pour le calcul du besoin du véhicule en termes de courant.

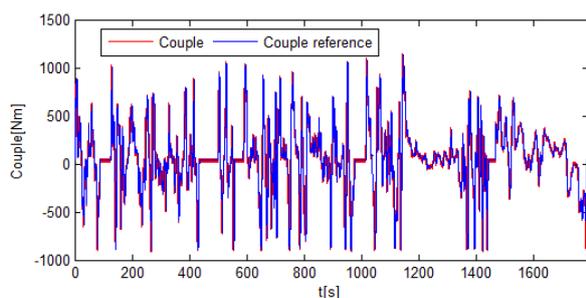


Figure 4.31: Résultat du contrôle du couple pour le cycle WLPT.

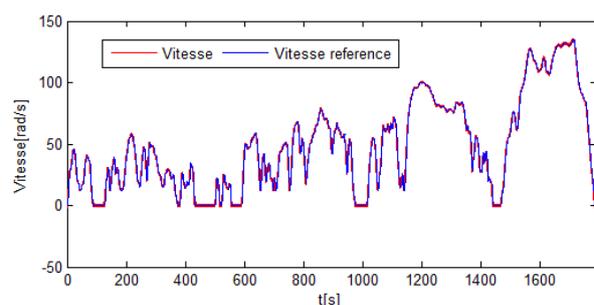


Figure 4.32: Résultat du contrôle de la vitesse pour le cycle WLPT.

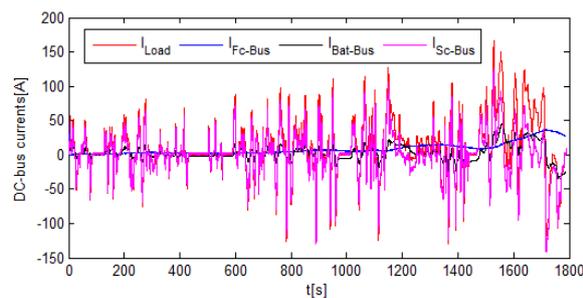


Figure 4.33: Contribution des sources au niveau du bus continu (Cycle WLPT).

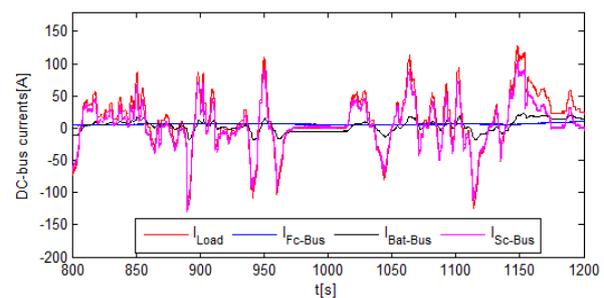


Figure 4.34: Zoom sur les contributions des sources au niveau du bus continu (Cycle WLPT).

L'évolution de l'ensemble des courants au niveau du bus continu est présentée par la figure 4.33. Le résultat du partage des sollicitations de la charge est satisfaisant (Figure 4.34), où le pack des supercondensateurs assure la majorité des fluctuations de la charge (Figures 4.35 et 4.36). Ayant une densité de puissance élevée par rapport à la source principale mais inférieur à celle des supercondensateurs, le module des batteries fournit une composante plus au moins fluctuante. Le contrôle de la composante moyenne fréquence assurée par les batteries est présenté dans la figure 4.37, un zoom sur cette dernière figure est proposé sur la figure 4.38.

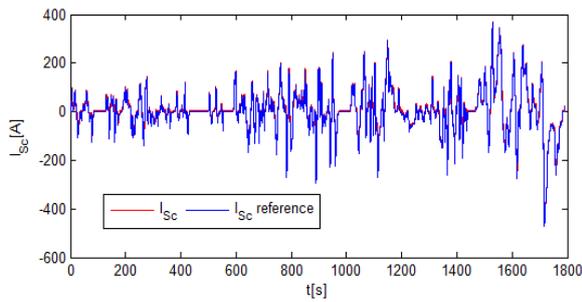


Figure 4.35: Contribution en courant du pack des supercondensateurs (Cycle WLPT).

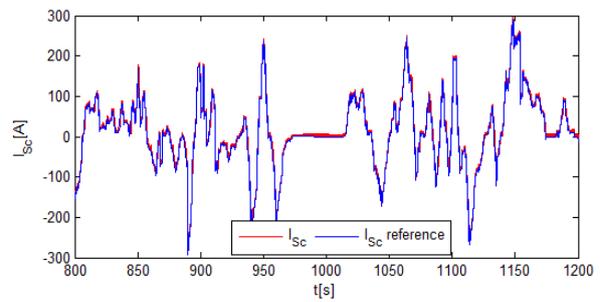


Figure 4.36: Zoom sur la contribution en courant du pack des supercondensateurs (Cycle WLPT).

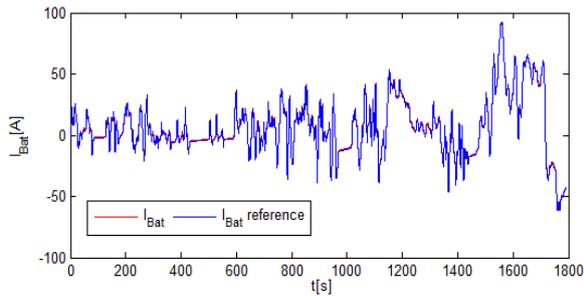


Figure 4.37: Contribution en courant du module des batteries (Cycle WLPT).

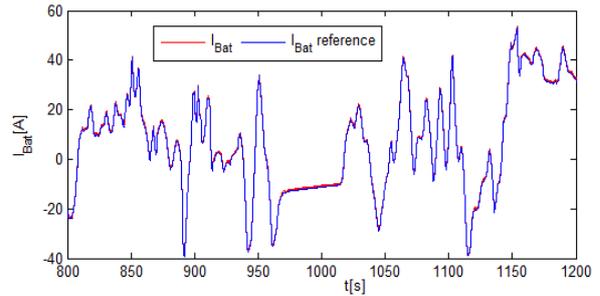


Figure 4.38: Zoom sur la contribution en courant du module des batteries (Cycle WLPT).

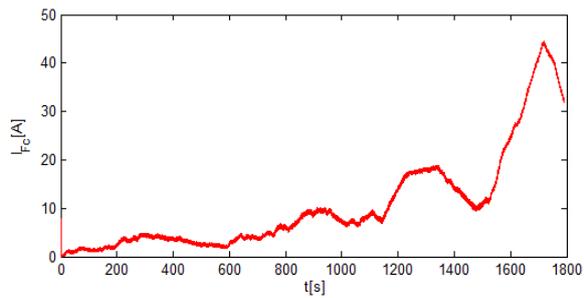


Figure 4.39: Contribution en courant de la PAC (Cycle WLPT).

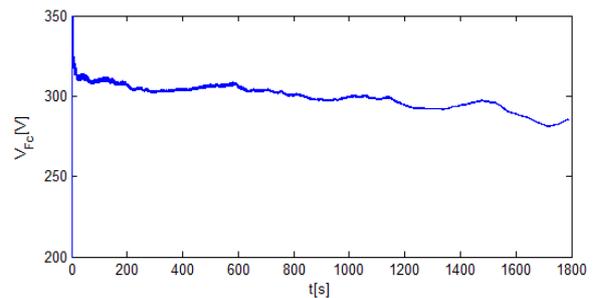


Figure 4.40: Tension aux bornes de la PAC (Cycle WLPT).

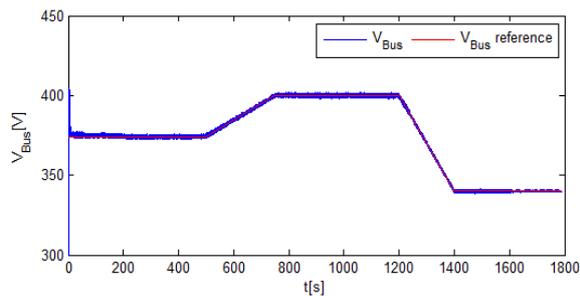


Figure 4.41: Résultat du contrôle de la tension du bus continu (Cycle WLPT).

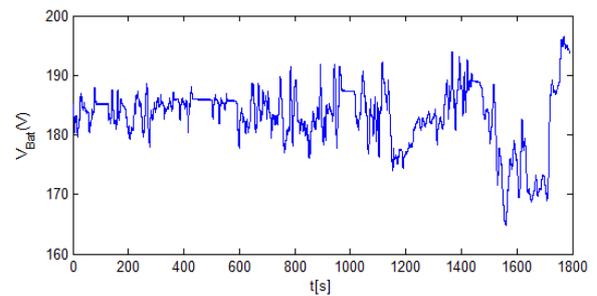


Figure 4.42: Tension aux bornes du module des batteries (Cycle WLPT).

La pile à combustible qui est la source principale de notre système multi-sources assure la composante moins fluctuante de la demande de la charge. Cette composante est calculée en retranchant les contributions des sources auxiliaires (pack des supercondensateurs et module des batteries) de la demande totale de la charge. Les figures 4.39 et 4.40 illustrent le courant de la PAC et l'évolution de sa tension. Le contrôle de la tension du bus continu est présenté par la figure 4.41. Le contrôle de V_{BUS} est très important au sein des systèmes multi-sources vu qu'il entre dans le calcul des composantes de courant assignées aux différentes sources d'énergies. Afin de tester sa robustesse, nous introduisons des profils variés pour la consigne

de V_{Bus} . D'après le résultat de la figure 4.41, nous concluons que le contrôle de la tension du bus continu est satisfaisant pour ce système.

Les figures 4.42 et 4.43 présentent respectivement l'évolution de la tension du module des batteries et son état de charge. Les figures 4.44 et 4.45 représentent respectivement les mêmes évolutions pour le pack des supercondensateurs. Vu la grande capacité des batteries utilisées dans les simulations, l'état de charge de la batterie ne risque pas d'atteindre des niveaux bas, mais par contre l'état de charge peut atteindre des valeurs excessifs et par conséquent surcharger les batteries. Il s'agit là d'une deuxième amélioration de l'approche fréquentielle qui non seulement doit surveiller les niveaux bas du SoC mais aussi les niveaux hauts de SoC. Pour le pack des supercondensateurs, l'état de charge atteint une valeur de 30% vers la fin du cycle. Ces résultats montrent que l'état de charge des sources n'est pas pris en compte dans l'approche fréquentielle.

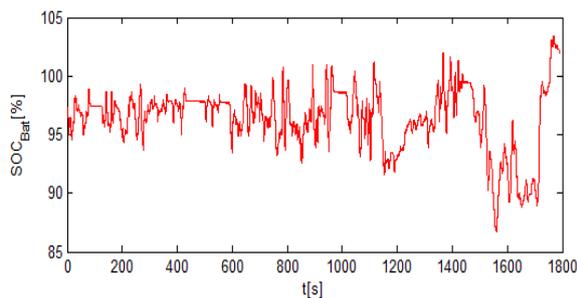


Figure 4.43: Etat de charge du module des batteries (Cycle WLPT).

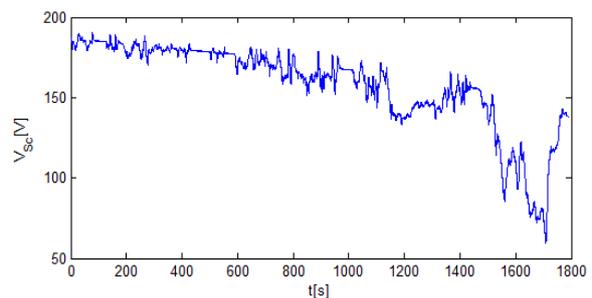


Figure 4.44: Tension aux bornes du pack des supercondensateurs (Cycle WLPT).

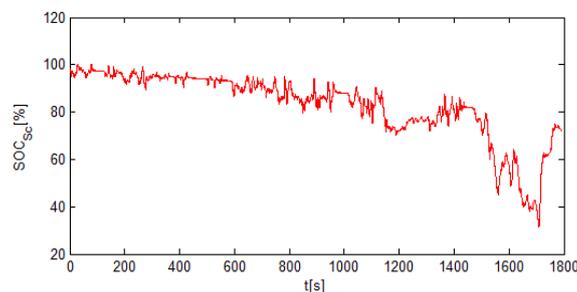


Figure 4.45: Etat de charge du pack des supercondensateurs (Cycle WLPT).

Malgré ces multiples avantages, la stratégie de gestion d'énergie électrique par approche fréquentielle ne prend pas en compte l'évolution des indicateurs d'états propres aux sources d'énergie mises en jeu à savoir : les états de santé, les états de charge etc. Cet inconvénient peut causer une usure rapide des sources d'énergie par surcharge ou décharge profonde dans le cas des batteries ou même un contenu fréquentielle non adapté à l'état de vieillissement (état de santé) de la source d'énergie.

4.4 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons eu l'occasion de présenter une stratégie de gestion d'énergie électrique basée sur l'approche fréquentielle pour une application embarquée de type véhicule électrique. La gestion d'énergie proposée repose dans un premier temps sur l'extraction des composantes fréquentielles de la demande de la charge et ensuite la répartition de ces composantes sur les sources d'énergie embarquées au sein du véhicule. Les composantes fréquentielles extraites des sollicitations de la charge sont utilisées dans un premier temps

pour le dimensionnement des sources d'énergie. Les modèles des différentes composantes du système (sources, convertisseurs et machines) présentés dans le chapitre précédent ont été utilisées afin de réaliser les simulations comportementales des systèmes multi-sources. Le contrôle commande des convertisseurs statiques et la machine électrique a été largement détaillée.

Les résultats de simulations présentés dans ce chapitre attestent que la gestion d'énergie proposée est intéressante pour le contrôle des flux de puissance et d'énergie au sein des systèmes multi-sources où les performances des sources d'énergie ne sont pas identiques. L'extraction des différentes composantes de la demande de la charge permet une distribution optimale des sollicitations sur l'ensemble des sources mises en jeu. Ce sont les performances intrinsèques de la source d'énergie qui déterminent la composante fréquentielle à fournir et/ou à récupérer. Ainsi dans le cas du système à trois sources proposé, la composante haute fréquence est assignée aux supercondensateurs, la composante moyenne fréquence est assurée par les batteries LFP et la composante basse fréquence est fournie par la pile à combustible. Un des avantages majeurs de cette approche est qu'elle permet de réduire considérablement l'impact des variations des sollicitations de la charge sur la source d'énergie principale (source assurant l'autonomie énergétique du système, dans notre cas la pile à combustible ou la batterie LFP). En outre, chaque unité de stockage est dimensionnée suivant la composante qui lui est assignée, cela réduit les dimensions du SSE et par conséquent son poids et son encombrement. Les résultats des simulations obtenues dans ce chapitre seront validés grâce au banc d'essai expérimental à échelle réduite réalisé pour cet effet, les résultats de la validation expérimentale seront présentés dans le prochain chapitre.

Bien que l'approche fréquentielle soit intéressante pour les systèmes multi-sources, elle ne prend pas en compte l'évolution des indicateurs des sources d'énergie à savoir l'état de santé (SoH), l'état de fonctionnement (SoF) ou encore l'état de charge (SoC) car la constante de temps est toujours fixe. En outre, pendant son fonctionnement, la source d'énergie peut être soumise à des températures élevées et à des cycles rapides de charge/décharge. Ces facteurs peuvent accélérer le vieillissement de la source et par conséquent le contenu fréquentielle de la composante qui lui a été initialement assignée n'est plus adapté à son état de santé.

Dans le but de pallier à cet inconvénient, nous investiguons dans le chapitre suivant, une approche fréquentielle de gestion d'énergie prenant en compte l'évolution de l'état de santé des batteries au sein du système trois SSE.

**Chapitre 5 : Validation expérimentale de la gestion
d'énergie basée sur l'approche fréquentielle et
investigation de l'intérêt d'une approche fréquentielle
adaptative.**

**“La simplicité est la sophistication suprême”
Léonard De Vinci.**

5.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté le principe de la stratégie de gestion d'énergie basée sur l'approche fréquentielle. Nous avons par la suite implémenté cette stratégie dans l'environnement Matlab/Simulink pour deux types de systèmes multi-sources. D'après les résultats de simulations obtenues, la gestion d'énergie basée sur l'approche fréquentielle prend en compte les forces et faiblesses des différentes sources. Elle permet la décomposition des sollicitations de la charge en différentes composantes suivant le nombre et les performances des différentes sources d'énergie utilisées. Cette décomposition aura des effets positifs sur l'état de santé des sources d'énergie vu qu'elles n'opèrent que dans leurs gammes de fréquence optimale. Malgré ces performances, cette approche ne prend pas en compte plusieurs indicateurs relatifs à la bonne santé et au bon fonctionnement des sources d'énergie mises en jeu. Si nous prenons par exemple le cas des batteries et des supercondensateurs, l'approche fréquentielle leur impose une fréquence de fonctionnement fixe tout au long d'un cycle de conduite sans tenir compte de l'évolution de leur état de santé (SoH) ou état de charge (SoC). Une fréquence de fonctionnement fixe peut nuire au bon fonctionnement de la source d'énergie et par conséquent au bon fonctionnement du système multi-sources.

Dans le présent chapitre, nous nous intéresserons dans un premier temps à la validation expérimentale de l'approche fréquentielle présentée dans le chapitre précédent, pour cet effet nous avons conçu et réalisé un banc d'essai basé sur la plateforme de contrôle dSPACE. Ensuite, nous proposons des exemples de stratégies de gestion d'énergie basée sur une approche fréquentielle adaptative. Les stratégies de gestion d'énergie proposées varient la constante de temps du filtre en fonction d'un critère prédéfini. L'exemple de la stratégie de gestion adaptative sera évalué dans un environnement de simulations Matlab/Simulink et a pour objectif de montrer la faisabilité des approches fréquentielles adaptatives.

5.2 Validation expérimentale de la stratégie de gestion d'énergie basée sur l'approche fréquentielle

Dans cette section, nous nous basons sur les configurations des systèmes multi-sources présentées dans les figures 4.4 et 4.15. Dans un premier temps, nous commencerons par la présentation du banc de test à échelle réduite correspondant à la configuration du système hybride développée pour la validation des stratégies de gestion d'énergie appliquées aux systèmes multi-sources. Ensuite, nous présenterons les résultats des manipulations expérimentales pour les systèmes deux sources et trois sources.

5.2.1 Description des différentes composantes du banc d'essai

Afin de valider pratiquement la gestion d'énergie basée sur l'approche fréquentielle pour les systèmes présentés dans le quatrième chapitre. Nous avons conçu et développé un banc d'essai expérimental à échelle réduite (le coefficient de réduction est égal à 1/ 50). Les différentes parties du banc de tests expérimentaux sont présentés respectivement dans les figures 5.1, 5.2 et 5.3.

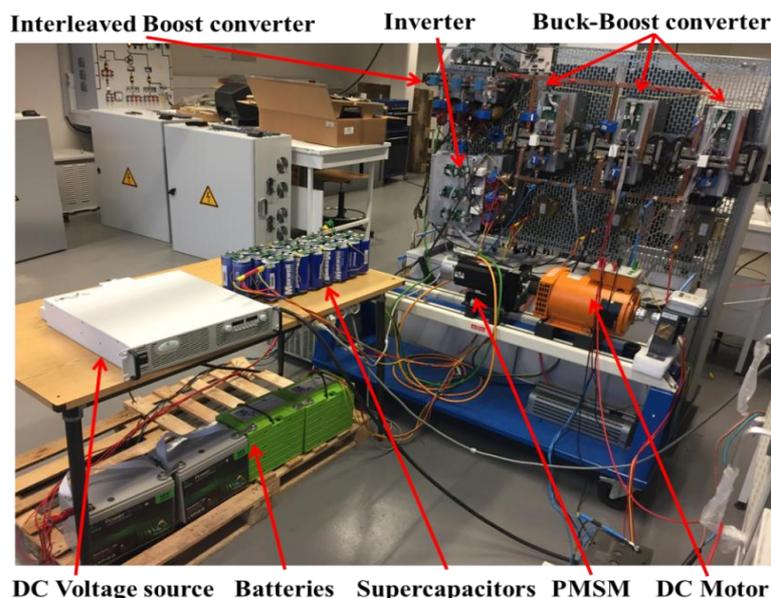


Figure 5.1: Banc de tests expérimentaux à échelle réduite (partie puissance).

La figure 5.1 présente la partie puissance du banc d'essai. Cette partie du banc d'essai contient plusieurs composants et équipements de puissance à savoir :

- Une source de tension programmable qui émule le comportement de la pile à combustible.
- Trois convertisseurs DC-DC bidirectionnels en courant (Buck-Boost). Ces convertisseurs adaptent le niveau de tension des unités de stockage d'énergie électrique (batteries et/ou supercondensateurs) avec celui du bus continu. Ils permettent aussi l'échange d'énergie entre les sources et les charges, en d'autres termes ils contrôlent les niveaux des courants échangés entre les sources et la charge.
- Un convertisseur DC-DC entrelacé à trois canaux. Ce convertisseur est toujours lié à la source principale d'énergie (la pile à combustible dans le cas d'un système à trois sources et un module de batteries dans le cas d'un système à deux sources). Il permet le contrôle de la tension du bus continu.
- Un onduleur de tension pour le contrôle en couple de la machine synchrone à aimants permanents (machine de traction).
- Un module des supercondensateurs (Boost-CAP 3000F/2.7V) avec une tension maximale de 43.2V et une capacité de 187,5F (24 cellules en série), [88].
- Un module de batteries Lithium Fer Phosphate (100Ah/12V) avec une tension maximale de 48V et une capacité de 110Ah (4 cellules en série), [112].
- Une machine synchrone à aimants permanents avec une puissance de 2.26kW.
- Une machine à courant continu avec une puissance de 1.5kW qui fait office de charge pour la machine synchrone à aimants permanents.

Vu que nous ne disposons pas d'une pile à combustible réelle dans notre laboratoire, nous utilisons une source de tension DC programmable pour émuler le comportement d'une PAC réelle. Deux types de source de tension continue sont utilisés : une source de tension de 40V maximale et une source de tension disposant d'une entrée analogique permettant d'imposer en temps réel la valeur de la tension désirée. L'entrée analogique de la deuxième source de tension est contrôlée via dSPACE.

La figure 5.2 présente le sous-système des mesures du banc de test, il contient les chaînes de mesures des tensions, des courants et de la vitesse dédiés aux mesures des tensions et des courants des sources d'énergie et de la vitesse de la MSAP. Il contient aussi des cartes des signaux de commande PWM pour les convertisseurs DC-DC et DC-AC. Ces cartes adaptent le niveau des signaux PWM issus du système de commande dSPACE à 5V à celui de 15V nécessaire aux drivers.

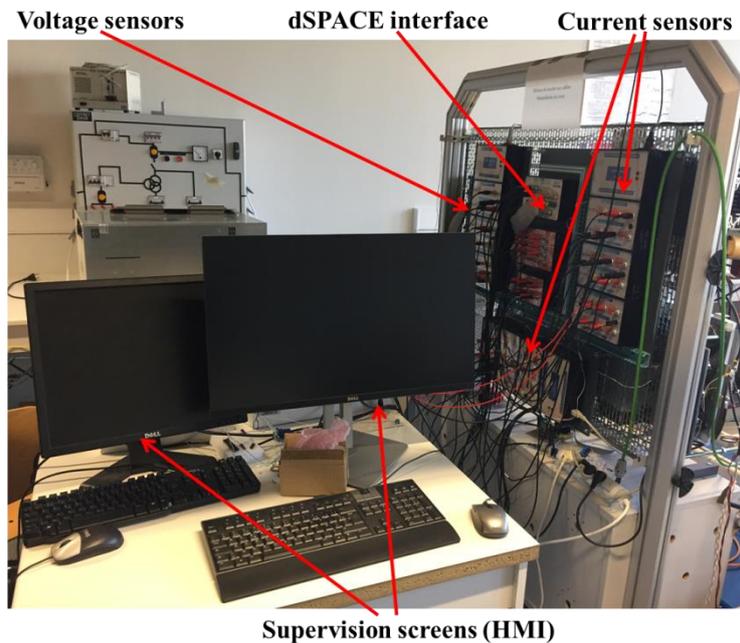


Figure 5.2: Banc de test expérimental à échelle réduite (partie mesure et supervision).

Les algorithmes de contrôle du système multi-sources sont implémentés dans l'environnement dSPACE en utilisant Matlab/Simulink. L'acquisition des données est effectuée grâce au système CompactDAQ de National Instruments en utilisant l'environnement Labview. Les entrées/sorties du système dSPACE sont regroupés dans des nappes. Nous avons décidé de lier chaque connecteur de la nappe avec un BNC afin de faciliter le câblage.

La troisième partie du banc d'essai concerne le système de contrôle et d'acquisition des données, il est présenté dans la figure 5.3. Nous étions amené à utiliser deux types de système de contrôle dSPACE car le nombre des sorties de commande PWM du premier dSPACE ne suffisait pas pour contrôler l'ensemble des convertisseurs de puissance contenus dans le système multi-sources.

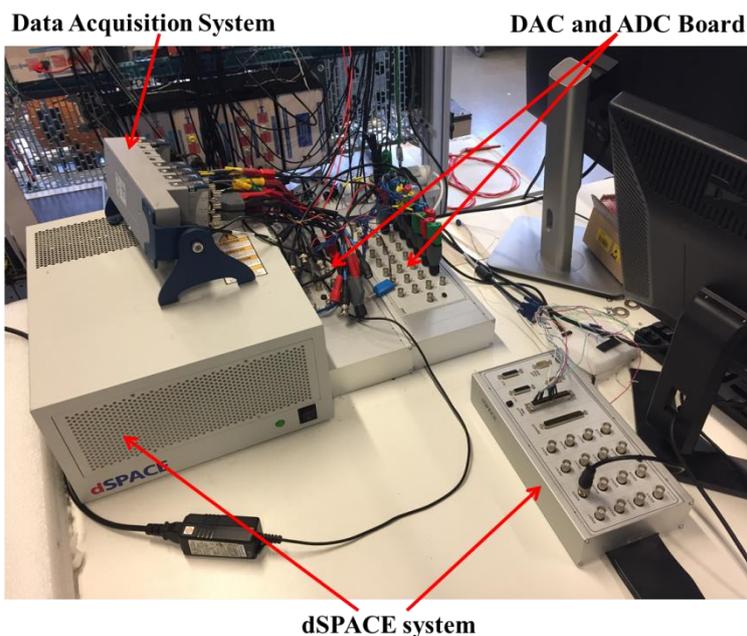


Figure 5.3: Banc de tests expérimentaux à échelle réduite (partie contrôle et acquisition des données).

Afin de solliciter les sources d'énergie électrique (PAC, supercondensateurs et batteries) en termes de puissance et en énergie, une charge bidirectionnelle en courant est indispensable. Dans notre banc d'essai, la charge contient deux composantes : un module de batteries plomb Gel associé à un convertisseur Buck-Boost bidirectionnel en courant ainsi qu'un moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) couplé mécaniquement à une machine à courant continu. La puissance de la MSAP n'est pas suffisante pour générer des courants élevés pendant les phases de freinage et décélération du véhicule surtout que de l'autre côté du bus continu, les sources d'énergies possèdent des capacités élevées notamment une capacité de 100Ah pour les batteries. Pour toutes ces raisons, la MSAP fonctionnement en moteur durant tout le cycle de conduite ainsi la récupération de l'énergie est émulée par le module de batteries plomb Gel, ce dernier permet aussi d'épauler la MSAP en sollicitant les sources d'énergie lors des phases de traction/propulsion avec des valeurs de courant élevées.

Dans cette section nous avons présentés les différentes parties du banc de tests expérimentaux, nous avons aussi expliqué le choix d'utilisation de certains composants. La prochaine section sera dédiée aux résultats d'expérimentation et leurs analyses.

5.2.2 Résultats expérimentaux à échelle réduite

Pour valider la stratégie de gestion d'énergie, la consigne de la tension du bus continu est fixée à 100V. Cette valeur a été choisie pour des raisons de disponibilité des sources d'énergie. Cette valeur change parfois durant les tests afin de montrer le bon fonctionnement de la boucle de contrôle de V_{Bus} . Le coefficient de réduction entre les simulations et l'expérimentation est de l'ordre de 50. Nous commencerons la présentation des résultats de la validation expérimentale pour le système à deux sources, puis nous passerons au système contenant trois sources d'énergie.

5.2.2.1 Manipulation 1 : Résultats expérimentaux pour un système hybride à base de batteries et des supercondensateurs

Le schéma du contrôle global de cette manipulation est présenté dans la figure 4.4. Dans cette configuration, le module des batteries LFP constitue la source ayant la plus grande densité d'énergie, donc il est considéré comme source principale, c'est la source qui assurera le contrôle de la tension du bus continu à travers le convertisseur Boost entrelacé à trois canaux. Le pack des supercondensateurs est utilisé donc comme source auxiliaire de puissance. Nous utilisons le cycle FTP7-5 comme entrée pour le calcul des consignes des courants à imposer aux modules des batteries et au pack des supercondensateurs. Le courant total demandé par la charge est illustré par la figure 5.4. Comme indiqué dans la section précédente la charge est constituée d'un module de batteries plomb-gel en plus de la MSAP. Les valeurs positives de courant I_{BUS} correspondent à la demande du véhicule durant les phases de traction/propulsion, tandis que les valeurs négatives correspondent aux phases de freinage et décélération. Vu que dans ce cas d'étude, le système multi-sources contient deux sources de natures différentes, la demande de la charge représentée par I_{BUS} sera décomposé en deux composantes : une composante haute fréquence et une composante basse fréquence.

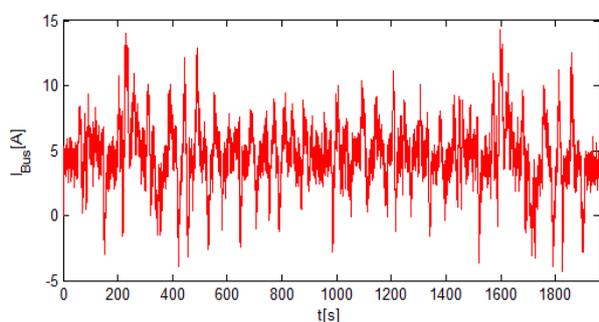


Figure 5.4: Courant mesuré au niveau du bus continu (charge)

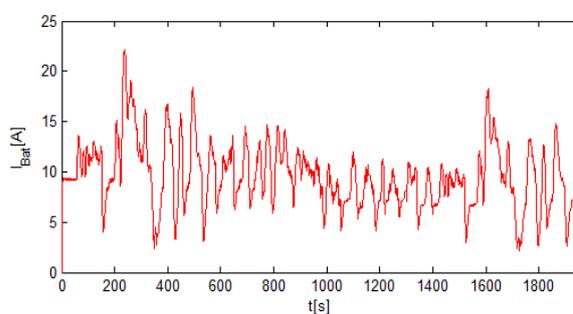


Figure 5.5: Courant du module des batteries

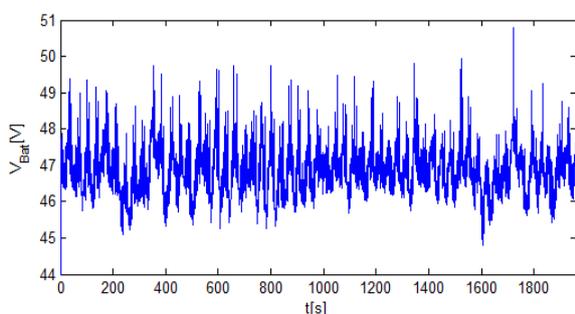


Figure 5.6: Tension aux bornes des batteries.

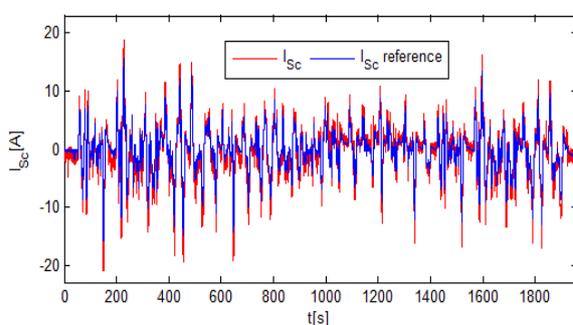


Figure 5.7: Courant des supercondensateurs.

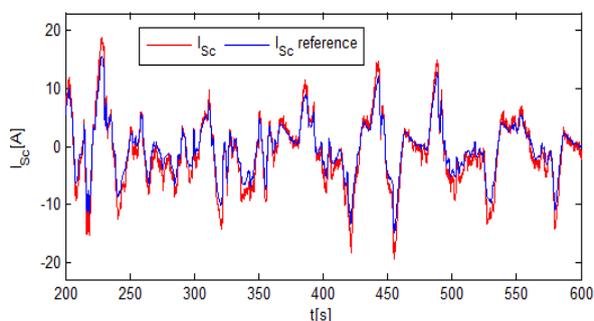


Figure 5.8: Zoom sur le courant des supercondensateurs.

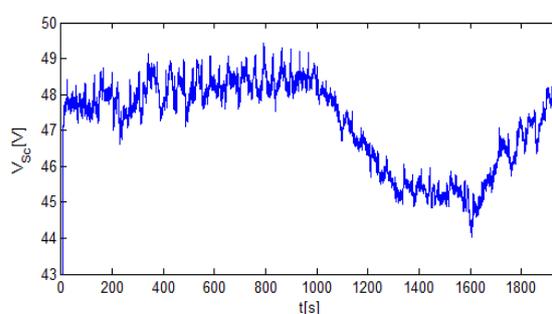


Figure 5.9: Tension du pack des supercondensateurs.

Les figures 5.5 et 5.6 illustrent respectivement le courant et la tension du module des batteries. Les batteries fournissent la composante basse fréquence du courant demandé par le véhicule tout au long du cycle de conduite considéré. Nous constatons que la tension du module des batteries V_{Bat} ne varie pas de façon significative, elle oscille autour d'une valeur moyenne de 47V, cela est due à la grande capacité du module des batteries (100Ah) et aussi au fait que la batterie assure seulement la composante basse fréquence des sollicitations de la charge.

Les figures 5.7 et 5.9 présentent respectivement le courant du pack des supercondensateurs et la tension à ses bornes. Les supercondensateurs assurent la composante haute fréquence des sollicitations de la charge. D'après la figure 5.8, le contrôle de courant I_{Sc} est satisfaisant car la mesure suit parfaitement la consigne imposée par la stratégie de gestion d'énergie électrique. L'allure de la tension des supercondensateurs présente trois situations : le premier cas correspond à la recharge du pack des supercondensateurs par l'énergie récupérée durant les opérations de freinage et de décélérations du véhicule, dans ce cas V_{Sc} augmente. Le second cas correspond à la décharge des supercondensateurs, cette situation correspond à une demande de puissance de la chaîne de traction/propulsion du VE durant les phases des fortes accélérations, dans ce cas de figure la tension V_{Sc} diminue. Le troisième cas correspond à une demande non fluctuante, cette dernière est assurée par la source principale par conséquent V_{Sc} ne varie pas. Le contrôle de la tension du bus continu est illustré dans la figure 5.10. Nous remarquons que la mesure suit bien la référence imposée, le contrôle RST implémenté est donc satisfaisant.

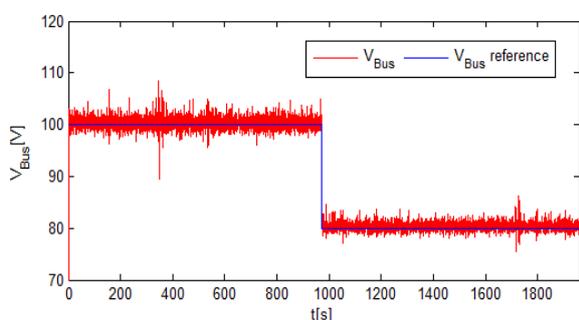


Figure 5.10: Contrôle de la tension du bus continu.

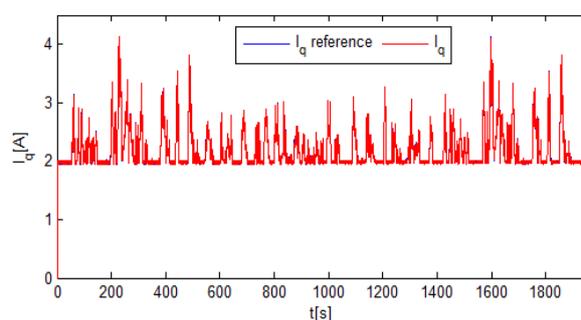


Figure 5.11: Courant I_q de la MSAP.

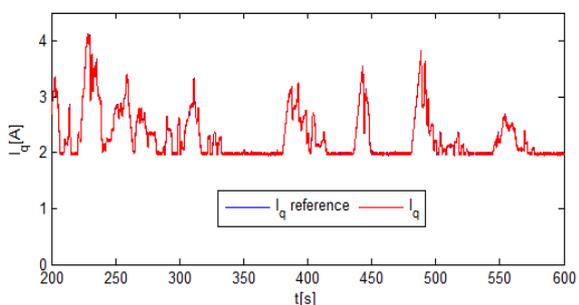


Figure 5.12: Zoom sur le courant I_q .

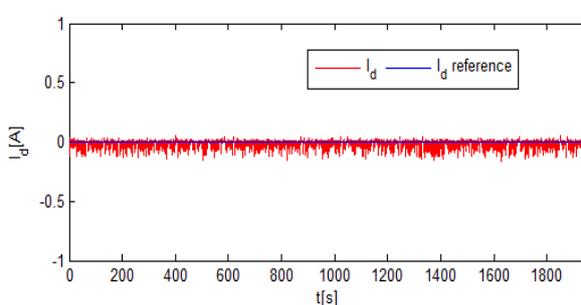


Figure 5.13: Courant I_d de la MSAP.

Pour cette manipulation nous présenterons aussi les courbes du contrôle du couple pour la MSAP, ces courbes sont illustrées par les figures 5.11, 5.12 et 5.13. Comme cela a été déjà mentionné précédemment, la machine de traction ne fonctionne qu'en moteur (le courant I_q présenté dans la figure 5.12 évolue seulement dans le quadrant positif). La demande maximale

de cette machine est faible en comparaison avec les capacités des sources d'énergie utilisées cela est dû principalement aux faibles puissances nominales des machines utilisées et la valeur de la tension du bus continu fixée à 100V. Pour remédier à ce problème, nous avons ajouté un module de batteries qui émulerait les sollicitations du véhicule ainsi que la récupération de l'énergie de la chaîne de traction/propulsion.

Le contrôle des courants I_d et I_q est très satisfaisant vu que les mesures suivent bien les références imposées. Le courant I_q représente l'image du couple produit par la MSAP. Le courant I_d est maintenue à 0 afin de limiter les pertes à l'intérieur de la machine. Les résultats présentés dans ce test sont satisfaisants. D'une part, les mesures suivent parfaitement les consignes imposées par la stratégie de la gestion d'énergie (contrôle du courant I_{Sc} et de la tension V_{Bus}), nous concluons que les contrôleurs RST fonctionnent bien. D'autre part, l'approche fréquentielle décompose les sollicitations de la charge en deux composantes tout en respectant la nature des sources utilisées. Le pack des supercondensateurs fournit une composante avec un contenu fréquentielle supérieur à celui du module des batteries.

5.2.2.2 Manipulation 2 : Résultats expérimentaux pour un système hybride à base de PAC et des supercondensateurs

Le schéma du contrôle global de cette deuxième manipulation est semblable à la précédente manipulation (Figure 4.4) sauf en ce qui concerne la source principale, dans cette manipulation nous utiliserons une pile à combustible. Pour cette configuration, le fonctionnement de la pile à combustible est émulé par l'intermédiaire d'une source de tension programmable. A la différence du système à trois sources que nous présenterons dans la prochaine section, le niveau de tension de la PAC varie et est contrôlé à l'aide de l'entrée analogique dont dispose l'alimentation DC programmable. L'allure de la tension souhaitée est imposée via dSPACE à travers une sortie ADC de 0-5V. Le cycle de conduite utilisé est le WLPT.

L'évolution du courant I_{Bus} est illustrée par la figure 5.14. Ce courant représente les sollicitations de la charge pour le cycle de conduite WLPT. Il est assuré par le pack des supercondensateurs et de la pile à combustible. Les figures 5.15 et 5.16 illustrent respectivement le courant et la tension de la pile à combustible. La PAC joue le rôle de source principale d'énergie du système, elle fournit donc la composante basse fréquence du courant demandé par la charge. V_{Fc} est en constante diminution vu qu'elle fournit du courant en permanence à la charge. Les figures 5.17 et 5.19 présentent respectivement le courant du pack des supercondensateurs et la tension à ses bornes. Les supercondensateurs assurent la composante haute fréquence des sollicitations de la charge. Le contrôle du courant I_{Sc} est satisfaisant car la mesure suit bien la consigne imposée par la stratégie de gestion d'énergie électrique comme le montre la figure 5.18. L'allure de la tension du pack de supercondensateurs V_{Sc} présente trois situations : le premier cas correspond à la recharge du pack des supercondensateurs par l'énergie récupérée durant les opérations de freinage et décélérations du VE. Le second cas correspond à la décharge des supercondensateurs. Cette situation correspond à une demande de puissance de la chaîne de traction/propulsion du VE lors des fortes accélérations. Le troisième cas correspond à une demande non fluctuante, cette dernière est assurée par la pile à combustible par conséquent V_{Sc} ne varie pas.

La figure 5.20 illustre la courbe de la tension du bus continu mesurée et de la consigne imposée. Pour ce test, nous avons choisis une valeur constante pour la référence de V_{BUS} . Le contrôle de V_{BUS} est satisfaisant vu que l'écart entre la mesure et la consigne est très faible.

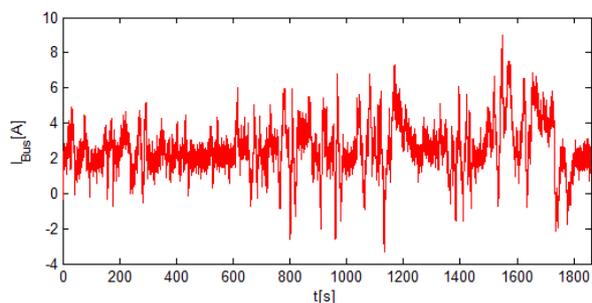


Figure 5.14: Courant mesuré au niveau du bus continu (charge).

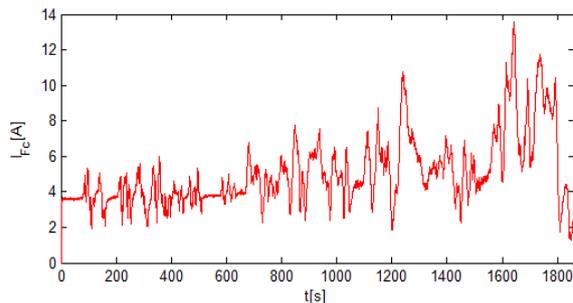


Figure 5.15: Courant de la PAC.

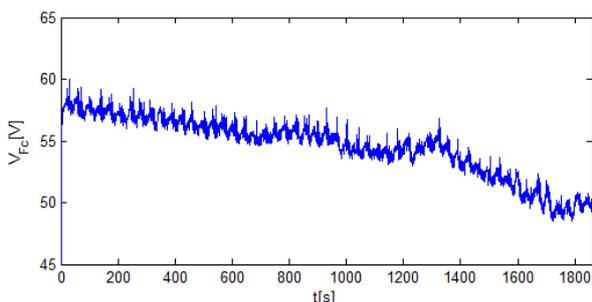


Figure 5.16: Tension aux bornes de la PAC.

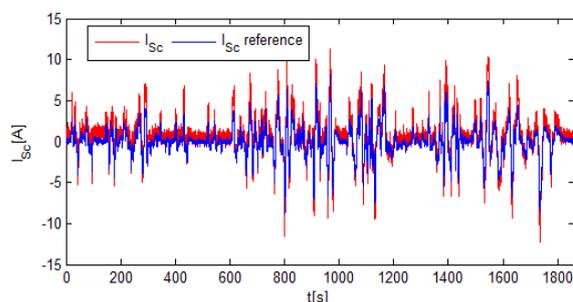


Figure 5.17: Courant des supercondensateurs.

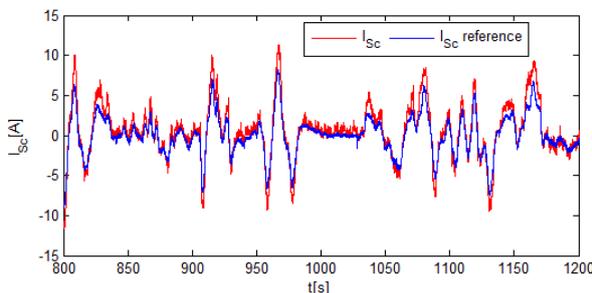


Figure 5.18: Zoom sur le courant des supercondensateurs.

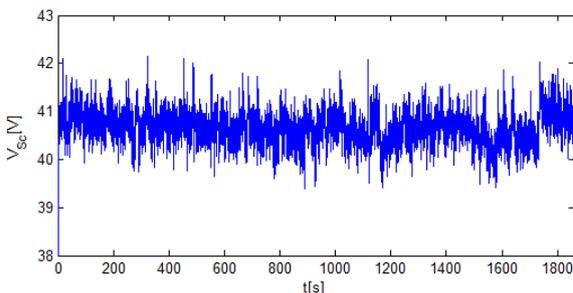


Figure 5.19: Tension du pack des supercondensateurs.

Comme pour le précédent test, nous présenterons les résultats du contrôle en couple de la machine synchrone à aimants permanents. Il faut garder à l'esprit que la MSAP est considérée comme étant la machine de traction/propulsion du véhicule. Cependant, comme la puissance de cette machine n'était pas suffisante, nous étions obligé de compléter la charge par un système d'émulateur de charge partiel constitué d'un convertisseur DC-DC et d'un module de batteries, tout en gardant le système à courant alternatif (la MSAP et son onduleur). Les résultats du contrôle de la MSAP pour le cycle WLPT sont présentés dans les figures 5.21, 5.22 et 5.23. Les mesures des courants I_q et I_d suivent bien les consignes, le contrôle est donc satisfaisant.

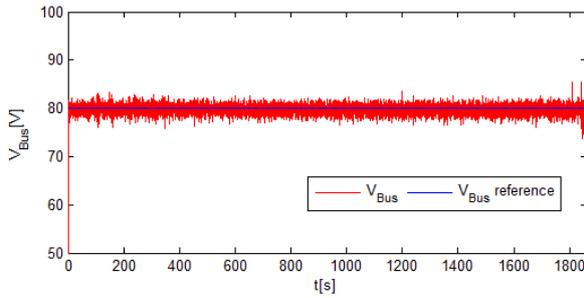


Figure 5.20: Contrôle de la tension du bus continu.

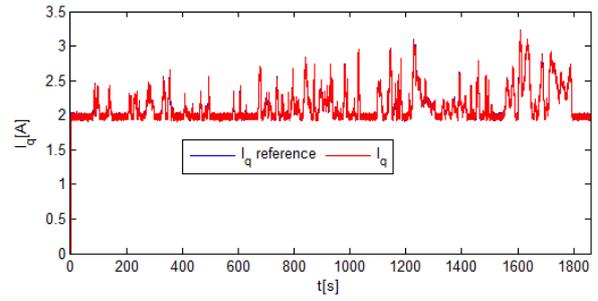


Figure 5.21: Courant I_q de la MSAP.

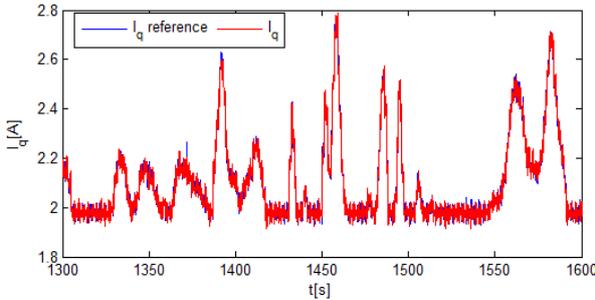


Figure 5.22: Zoom sur le courant I_q .

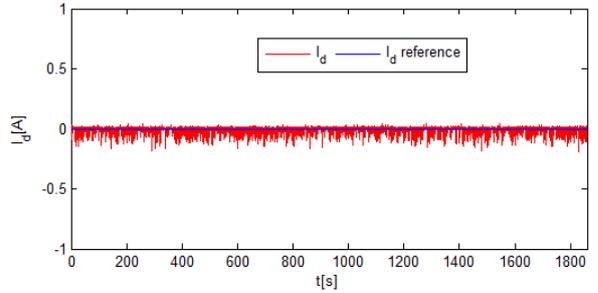


Figure 5.23: Courant I_d de la MSAP.

5.2.2.3 Manipulation 3 : Résultats expérimentaux pour le système hybride à base de PAC, des batteries et des supercondensateurs

Pour les tests expérimentaux de la troisième manipulation, Le schéma du contrôle global est illustré dans la figure 4.15. Pour cet essai, le cycle de conduite FTP-75 a été pris comme entrée pour le modèle mécanique du véhicule. Dans cet essai, la tension de la pile à combustible n'est pas contrôlée comme dans l'exemple précédent, elle est fixée à 38V durant l'ensemble du test via une source de tension continu.

L'ensemble des courants au niveau du bus continu sont présentés sur la figure 5.24. Un zoom sur ces courants est présenté sur la figure 5.26. En analysant les deux précédentes figures, nous constatons que le courant de la charge I_{Load} est partagé en trois composantes dont le contenu fréquentielle est différent les unes des autres. Ces composantes sont nommées I_{Fc_Bus} , I_{Bat_Bus} et I_{Sc_Bus} . Ces composantes sont respectivement assurées par la pile à combustible, le module des batteries et le pack des supercondensateurs. Le courant de la charge nommé aussi $I_{Bus} = I_{Load}$ est présenté par la figure 5.28.

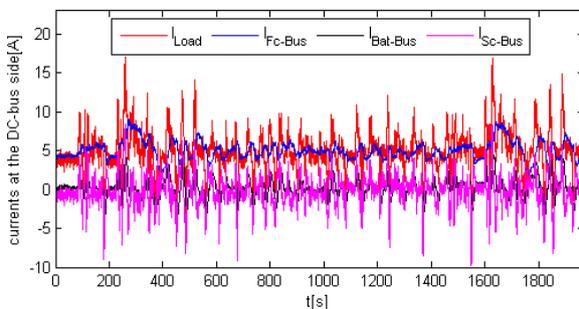


Figure 5.24: Courants au niveau du bus continu.

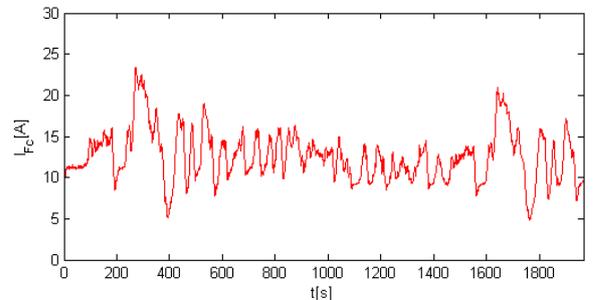


Figure 5.25: Courant de la PAC.

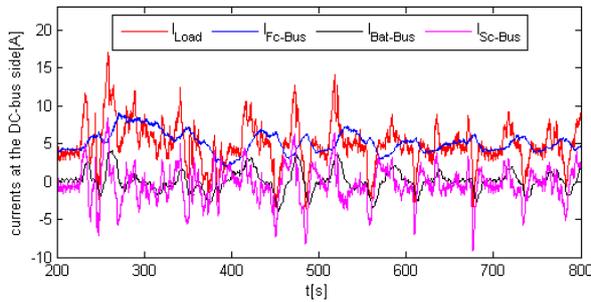


Figure 5.26: Zoom sur les courants au niveau du bus continu.

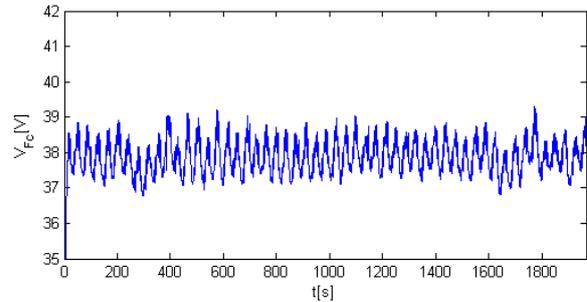


Figure 5.27: Tension aux bornes de la PAC.

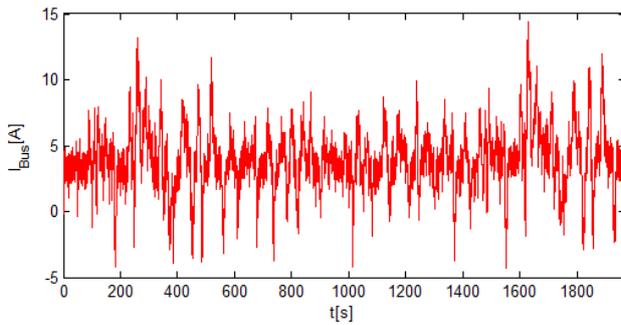


Figure 5.28: Courant de la charge.

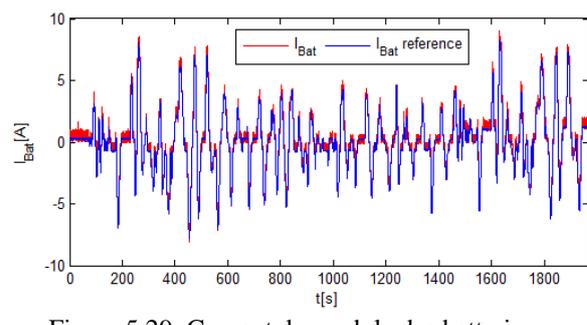


Figure 5.29: Courant du module des batteries.

Les figures 5.25 et 5.27 illustrent respectivement la contribution en courant de la PAC I_{Fc} et sa tension V_{Fc} . Comme le montre l'allure du courant I_{Fc} , la PAC fournit la composante basse fréquence du courant demandé par la charge. V_{Fc} conserve une valeur constante malgré les variations de courant car la PAC est émulé via une source de tension continue. Les figures 5.29 et 5.32 montrent respectivement le courant des batteries et la tension à leurs bornes. Le module batteries compense la composante moyenne fréquence des sollicitations de la charge. Le courant mesuré I_{Bat} et sa référence sont proches comme le montre la figure 5.30, cette dernière figure montre que le contrôle du courant des batteries est performant. Il convient de noter que la tension mesurée sur le module des batteries ne change pas de manière significative, cela est dû à la grande capacité du module des batteries utilisé dans les tests expérimentaux (100Ah). L'allure de V_{Bat} contient trois différents cas : le premier cas correspond à l'augmentation de V_{Bat} , donc à une charge du module des batteries, cette situation correspond à la phase de récupération d'énergie durant les opérations de freinage et de décélération du véhicule. Le second cas correspond à une diminution de V_{Bat} et par conséquent une décharge du module des batteries. Cette situation correspond à une demande de puissance de la chaîne de traction du véhicule lors des opérations d'accélération. Le troisième cas correspond à une demande non fluctuante autrement dit, le système de gestion d'énergie ne sollicite pas les sources auxiliaires à savoir les supercondensateurs et les batteries.

Les figures 5.34 et 5.33 présentent respectivement le courant du pack des supercondensateurs et la tension à ses bornes. La stratégie de la gestion d'énergie basée sur l'approche fréquentielle transmet la majorité des fluctuantes de la charge au pack des Sc, c'est la raison pour laquelle les variations de I_{Sc} sont significatives par rapport à I_{Bat} et I_{Fc} . Pour mieux identifier le courant I_{Sc} ainsi que la référence de courant imposée aux Sc, un zoom est effectué sur ces deux courbes et est présenté sur la figure 5.31, où les deux courbes sont proches l'une de l'autre. La tension aux bornes du pack de Sc présente trois cas de variations

similaires à la courbe de V_{Bat} , mais avec des amplitudes et des fréquences de variations plus élevées.

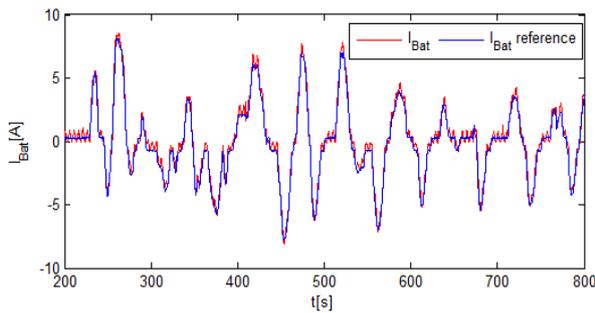


Figure 5.30: Zoom sur le courant du module des batteries.

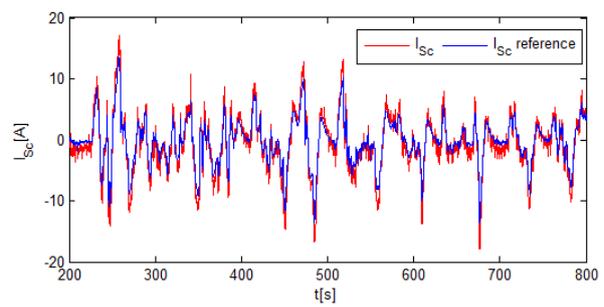


Figure 5.31: Zoom sur le courant des supercondensateurs.

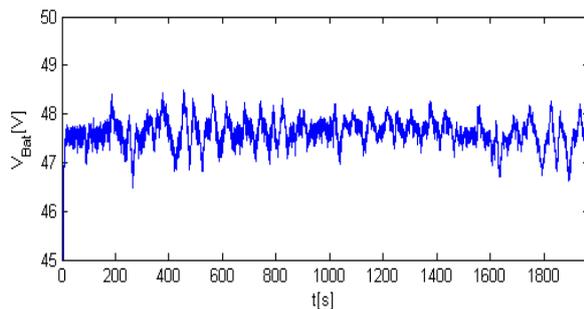


Figure 5.32: Tension aux bornes des batteries.

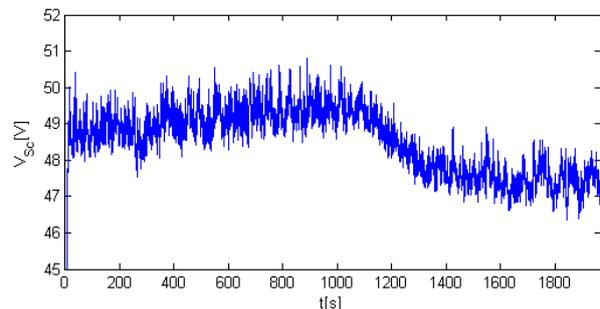


Figure 5.33: Tension du pack des supercondensateurs.

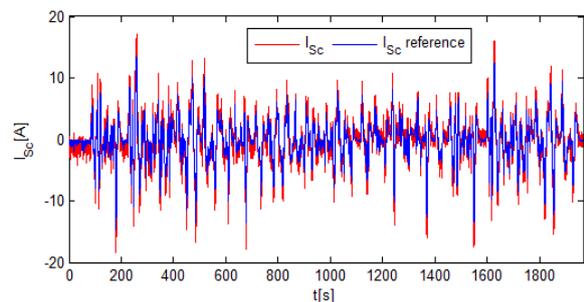


Figure 5.34: Courant des supercondensateurs.

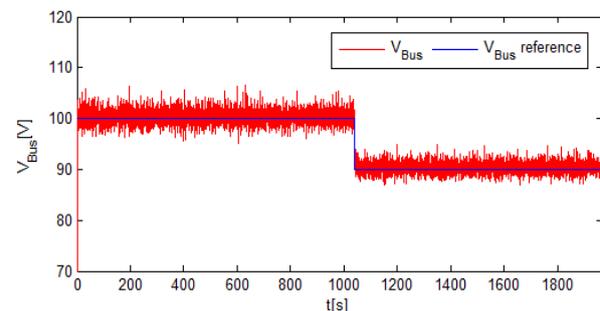


Figure 5.35: Contrôle de la tension du bus continu.

La référence et la mesure de la tension de bus continu sont tracées sur la figure 5.35. Le contrôle de la tension du bus continu est satisfaisant où la mesure oscille autour de la référence avec un très petit écart.

Selon les courbes expérimentales présentées dans cette section, les résultats de la validation expérimentale à échelle réduite approuvent les résultats de simulations présentés dans le chapitre précédent. L'approche fréquentielle respecte bien les performances des sources d'énergie en les sollicitant avec des courants dont le contenu fréquentielle est adapté à leur performance dynamique.

5.3 Conclusions

Dans la précédente section, nous avons validé expérimentalement la stratégie de la gestion basée sur l'approche fréquentielle pour différents cycles de conduite et différents architectures de systèmes hybrides. Les résultats obtenus sont satisfaisants dans le sens où la composante haute fréquence extraite des sollicitations de la charge est toujours assurée par la source la plus

robuste (celle ayant la plus grande densité de puissance), en outre la composante basse fréquence est assurée par la source ayant la plus grande densité d'énergie. Les contrôleurs RST implémentés au niveau du système de contrôle dSPACE à travers l'environnement Matlab/Simulink sont satisfaisants vu que les mesures des courants et de tension de bus suivent bien les consignes imposées par l'algorithme de gestion d'énergie.

A travers les simulations comportementales présentées dans le quatrième chapitre ainsi que les tests expérimentaux présentés dans ce chapitre, nous constatons que l'approche fréquentielle est une stratégie de gestion d'énergie prometteuse dans le sens où elle partage équitablement la demande de la charge entre les différentes sources. Cependant, elle ne tient pas compte des indicateurs d'état des sources d'énergie tels que le SoC et le SoH. Ces indicateurs sont d'une grande importance car ils permettent de protéger et/ou prolonger la durée de vie des sources d'énergie. La seconde partie de ce chapitre est dédiée à l'investigation et à la présentation des exemples de stratégies de gestion d'énergie basées sur l'approche fréquentielle adaptative tenant en compte les indicateurs d'état des sources d'énergie. Nous présenterons aussi les avantages de la gestion d'énergie adaptative en comparaison avec la gestion d'énergie classique (non-adaptative).

5.4 Stratégie de gestion d'énergie électrique basée sur l'approche fréquentielle adaptative

Plusieurs travaux se sont intéressés à l'approche fréquentielle [38][39][113][114][115], mais en revanche très peu d'entre eux ont investigués l'adaptabilité des constantes de temps des filtres en fonction des indicateurs d'état des sources d'énergie [116][117][118]. La différence entre les approches de gestion d'énergie adaptative et non adaptative est la prise en compte de certains paramètres affectant le fonctionnement du système multi-sources. Dans la majorité des cas, ces paramètres sont en relation avec les performances et l'état de fonctionnement des sources d'énergie électrique. L'objectif de cette partie est de montrer l'atout et la complexité de la gestion d'énergie par approche fréquentielle adaptative en comparaison avec les stratégies de gestion d'énergie non-adaptative. Le schéma du contrôle global adopté pour la stratégie de gestion d'énergie adaptative est semblable à celui de la troisième manipulation (Figure 4.15).

5.4.1 Variation de la constante de temps des filtres dans l'approche fréquentielle adaptative

Le principe de la gestion d'énergie par approche fréquentielle adaptative est basé la variation de la constante du filtre en fonction d'un ou plusieurs critères bien définis. Dans la majorité des cas, les critères choisis visent l'amélioration de l'état de santé ou la protection des composants du système en question (plus particulièrement leur état de charge). Pour les systèmes multi-sources, les composants les plus vulnérables sont les unités de stockage d'énergie ayant une grande densité d'énergie (et par conséquent une faible densité de puissance) telles que les batteries et les piles à combustible.

Le critère de variation de la constante de temps peut différer suivant les objectifs de la stratégie de gestion d'énergie implémentée. Ce critère peut être un paramètre influant

directement ou indirectement les performances des sources énergies embarquées par exemple : l'état de charge (SoC), l'état de santé (SoH) ou encore l'état de fonctionnement (SoF) [71][119][120].

Dans ce mémoire, nous nous concentrons sur la gestion d'énergie par approche fréquentielle développée dans les précédents chapitres. L'adaptabilité de cette approche repose donc sur la variation de la constante de temps des filtres qui dans le cas de l'approche fréquentielle classique prend une valeur constante. Ainsi avant d'entamer les détails de cette méthode de gestion d'énergie, il faut d'abord trouver un moyen pour varier la constante de temps du ou des filtres responsable de la répartition fréquentielle des sollicitations de la charge.

Au niveau de l'environnement Matlab/Simulink, le bloc représentant la fonction de transfert du filtre ne permet pas de varier en temps réel la valeur de la constante de temps, celle-ci est indiquée avant le lancement de simulations ou de l'expérimentation et ne peut donc pas être changée au cours du fonctionnement du système multi-sources. Afin de pouvoir accéder en temps réel ou au cours des simulations à la constante de temps du filtre, nous reformulons la fonction de transfert de telle sorte que la valeur de la constante de temps devient une entrée pour le filtre passe-bas.

Les figures 5.36 et 5.37 montrent respectivement le bloc du filtre proposée par la bibliothèque du logiciel Matlab/Simulink et celui obtenu après reformulation. Dans la figure 5.37, la valeur de la constante de temps peut être variée car il s'agit d'une entrée et non pas d'un paramètre propre au filtre comme c'est le cas le filtre de la figure 5.36.

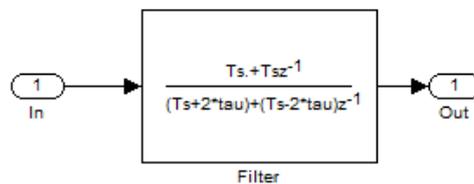


Figure 5.36: Fonction de transfert du filtre de la bibliothèque de Matlab/Simulink.

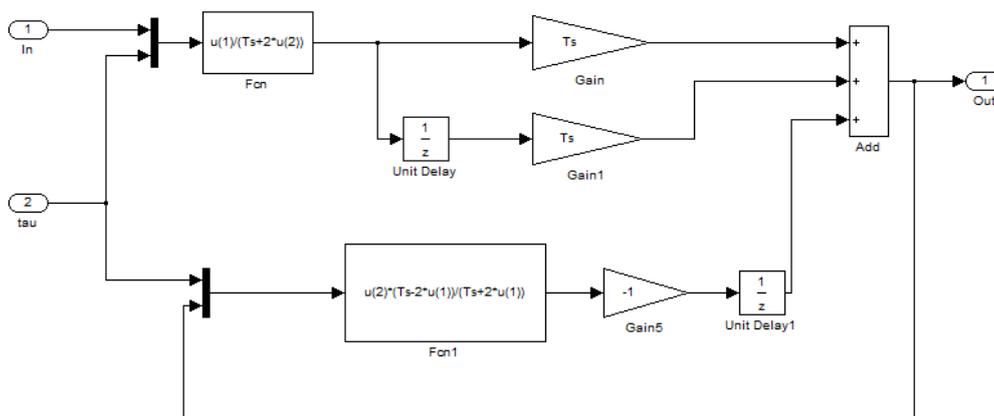


Figure 5.37: Modèle proposé du filtre avec accès à la constante de temps.

Le choix de la constante de temps des filtres utilisés dans la gestion d'énergie est une étape capitale dans le processus de conception de la stratégie de la gestion d'énergie adaptative. C'est ce choix qui déterminera par la suite la nature des sollicitations en énergie et en puissance appliquées à chacune des sources d'énergies contenues dans le système multi-

sources. Une valeur incompatible de cette constante avec les performances d'une source d'énergie peut causer une dégradation de l'état santé de cette source et favoriser l'instabilité du système global

Le choix de la constante de temps pour un filtre destiné à l'approche fréquentielle n'est pas une tâche aisée. La difficulté d'une détermination précise de la constante de temps réside dans sa dépendance à plusieurs paramètres à savoir : la densité de puissance (puissance spécifique), la densité d'énergie (énergie spécifique). Ces deux paramètres dépendent aussi des facteurs de vieillissement des sources d'énergie.

Comme il a été déjà mentionné dans le chapitre précédent, la constante de temps d'une source d'énergie est obtenue en calculant le ratio de la densité de puissance sur la densité d'énergie. L'évolution de la valeur de la constante de temps en fonction du vieillissement d'une source d'énergie doit être déterminée par l'intermédiaire des tests de vieillissement. A l'issue de ces tests qui nécessitent généralement un temps très long (plusieurs mois voir années), des cartographies sont utilisées en temps réel afin de fournir la valeur de la constante de temps en fonction du vieillissement de la source d'énergie. Dans cette étude, nous n'avons pas eu le temps de réaliser ces tests, l'évolution de la constante de temps en fonction du vieillissement (SoH) sera prise aléatoirement afin de montrer l'intérêt de l'approche proposée.

5.4.2 Vieillessement et état de santé des sources d'énergie électrique

Dans cette section, nous nous intéresserons aux facteurs de vieillissement et l'estimation de l'état de santé des sources d'énergie plus particulièrement les batteries et les supercondensateurs en s'appuyant sur des travaux antérieurement réalisés au GREAH [72].

5.4.2.1 Vieillessement des sources d'énergie électrique

Vu que les performances des sources d'énergie sont affectées par les conditions d'usage, la compréhension et l'identification des modes des dégradations et du vieillissement est essentielle pour la conception des stratégies de gestion d'énergie adaptatives. Les facteurs du vieillissement des sources d'énergie sont nombreux, en outre ils sont différents suivant la technologie de stockage d'énergie adoptée dans l'application. L'identification de ces facteurs n'est pas une tâche aisée, elle demande des tests longs et agressifs ainsi que des moyens d'essais coûteux, sans oublier que ces facteurs peuvent être corrélés les uns aux autres [119][120].

Dans les applications VE et VEH, les facteurs du vieillissement peut être liés à l'environnement dans lequel la source d'énergie opère, dans ce cas les éventuels facteurs peuvent être : la température, les vibrations, l'humidité, etc... Les facteurs de vieillissement peuvent aussi être liés à la manière au mode de sollicitation de la source d'énergie pendant le cycle de mission, dans ce cas nous citons : les sollicitations en courant (régime de charge et décharge), la variation de l'état de charge, etc... Ces derniers facteurs sont plutôt liés au comportement du conducteur.

Il existe principalement deux modes de vieillissement : le cyclage actif et le vieillissement en mode calendaire. Le cyclage actif intervient lors de l'utilisation de la batterie en mode de traction/propulsion tandis que le vieillissement en mode calendaire intervient quand la batterie

est en repos. Le vieillissement en mode calendaire est autant important que le cyclage actif car selon les études, les véhicules passent plus de 90% de leur vie en parking [119].

Les études du vieillissement des sources d'énergie électrique est une opération primordiale dans la conception des stratégies de gestion d'énergie adaptative appliquées aux systèmes multi-sources. L'étude du vieillissement sort du contexte de ce travail de recherche. En ce qui concerne le modèle du vieillissement pour l'exemple de simulations, nous prenons un simple cas où l'indicateur de vieillissement à savoir le SoHR varie à l'aide d'une logique déterministe, l'objectif étant d'illustrer l'intérêt de l'approche fréquentielle adaptative.

5.4.2.2 Estimation de l'état de santé (SoH) des sources d'énergie électrique

Dans cette section, nous nous intéresserons à l'estimation de l'état de santé des batteries vu que l'exemple de la gestion d'énergie adaptative présenté à la fin de ce chapitre se base sur le SoH du module des batteries. Suivant le besoin de l'application, les batteries peuvent être utilisées comme une source d'énergie dans ce cas, les batteries haute énergie HE sont bien adaptées. Dans les applications à fortes sollicitations en puissance, les batteries haute puissance HP sont favorites.

Pour estimer le SoH des batteries, deux grandeurs caractéristiques sont utilisées, il s'agit de la résistance interne et de la capacité que nous présenterons ci-dessous. La capacité est un paramètre qui reflète la quantité d'électricité stockable dans une batterie. Elle correspond aux Ampères-heures (Ah) que la batterie peut fournir à un courant donné à partir d'un état de charge à 100% jusqu'à la tension minimale de fin de décharge. La valeur de la capacité d'une batterie est influencée par la température et le taux de décharge autrement dit le niveau du courant de sollicitation. La résistance interne d'une batterie dépend de la technologie des matériaux utilisés. La valeur de ce paramètre dépend de la température, du taux de charge/décharge, du SoH et du SoC. Les pertes joules au sein de la batterie sont en relation directe avec la valeur de la résistance interne. Le rendement énergétique de la batterie dépend donc de cette résistance.

L'état de santé (SoH : State of Health) est un paramètre qui mesure les pertes de performances d'une source d'énergie [119]. Il est défini comme étant le ratio entre la capacité actuelle de la source sur la capacité totale de cette source en début de vie. Il peut être aussi défini comme étant le rapport entre la résistance actuelle de la source et sa résistance interne mesurée ou estimée en début de vie. Le SoH calculé en utilisant le ratio des résistances est noté SoHR, il est présenté dans le système d'équations (5.1) pour le cas de la charge et la décharge, où $R_{\text{Bat_chg}}$ et $R_{\text{Bat_dch}}$ sont respectivement les résistances de la batterie pendant les modes de charge et décharge à l'instant du calcul du SoHR. $R_{\text{Bat_chg_BoL}}$ et $R_{\text{Bat_dch_BoL}}$ sont respectivement les résistances de la batterie en début de vie (BoL : Beginning of Life) pour les fonctionnements en charge et décharge. Le SoH calculé en utilisant le ratio des capacités est généralement noté SoHC, il est calculé en utilisant l'équation (5.2), où $C_{\text{Bat_tot_disp}}$ est la capacité de la batterie au moment de l'estimation du SoHC. $C_{\text{Bat_disp_BoL}}$ est la capacité de la batterie en début de vie.

$$\begin{cases} SoHR_{dch} = 100 \cdot \frac{R_{Bat_dch}}{R_{Bat_dch_BoL}} \\ SoHR_{chg} = 100 \cdot \frac{R_{Bat_chg}}{R_{Bat_chg_BoL}} \end{cases} \quad (5.1)$$

$$SoHC = 100 \cdot \frac{C_{Bat_tot_disp}}{C_{Bat_disp_BoL}} \quad (5.2)$$

Les définitions du SoH et les équations utilisées pour son estimation sont aussi applicables pour le cas des supercondensateurs.

5.4.3 Type des approches fréquentielles adaptatives

Les logiques de décision présentées dans cette section reposent principalement sur l'expertise du concepteur ainsi que la bonne compréhension du fonctionnement du système. Ce dernier doit analyser les caractéristiques des sources d'énergie électrique utilisées (performances, facteur de vieillissement, etc...) et le besoin du véhicule en termes de puissance et d'énergie afin de concevoir les règles que doit suivre l'algorithme de gestion d'énergie électrique.

5.4.3.1 Approche basée sur la logique déterministe

Les approches fréquentielles adaptatives basées sur la logique déterministe décomposent le champ des possibilités en plusieurs modes discrets de fonctionnement et chaque mode est déclenché par une règle prédéfinie. Les règles autorisant le passage d'une mode de fonctionnement à une autre sont liées aux critères influençant les performances de l'une des composantes du système en question. Dans les cas des systèmes multi-sources, ces critères peuvent être : l'état de santé (SoH), l'état de charge (SoC), etc.... Les règles autorisant les transitions entre les modes de fonctionnement ont généralement pour objectifs de protéger un système et par conséquent prolonger au maximum sa durée de vie. Ce type d'approche est basé sur l'expertise des concepteurs et l'analyse complète des caractéristiques et des performances du système. La multitude des cas rend parfois cette approche difficile à concevoir vu le caractère binaire du passage d'un état à un autre.

La logique déterministe souffre d'un grand handicap par rapport à la définition des règles. Le passage d'un état à un autre est réalisé de façon stricte. Cette logique est rigide par rapport à l'évolution des paramètres d'entrée (les indicateurs d'état dans le cas des sources d'énergie) suivant les règles prédéfinies. La décision prise par la logique déterministe peut être différente bien que l'évolution du paramètre d'entrée soit très faible. Un exemple illustrant ce défaut est présenté dans la sous-section suivante.

Les approches déterministes reposent dans la plupart des cas sur l'utilisation des machines à états finis [121]. Le fonctionnement du système est décomposé en plusieurs états et chaque état est régi par une règle. La transition entre les différents états est déclenchée par l'évolution des indicateurs d'état par exemple le SoH, le SoC ou autre. Les approches de gestion d'énergie basée sur la logique déterministe sont simples à concevoir, en plus elles sont fiables si elles arrivent à couvrir tout le champ des possibilités. Cependant, elle demande une très

grande expertise du concepteur et elles ne sont pas optimales vu le caractère binaire et stricte du passage entre les différents états.

5.4.3.2 Approche basée sur la logique floue

La logique floue ‘en anglais Fuzzy Logic’ est une technique intéressante et largement connue pour la résolution des problèmes liés aux systèmes ou procédés dont nous ne connaissons pas suffisamment d’informations. Elle a été introduite par Lotfi Zadeh en 1965 [121][122]. Elle permet d’avoir des contrôles simples robustes et fiables en implémentant des heuristiques intuitives issues de l’expertise des concepteurs. A l’instar de la logique déterministe, une très bonne connaissance du système est nécessaire pour l’implémentation des règles dites ‘floues’. Les variables d’entrées et de sortie du contrôleur flou sont liées à des fonctions d’appartenance. Suivant la valeur de la variable, un terme spécifique lui est attribué par exemple : très faible, faible, moyen, élevé, très élevé, etc. Elles sont généralement représentées par des formes variées (triangle, parallélogramme, etc.) et varient suivant des valeurs comprises entre 0 et 1. A la différence de la logique déterministe, la logique floue permet une certaine souplesse concernant la prise de décision suivant l’évolution des variables d’entrée (par l’intermédiaire des fonctions d’appartenance).

Dans le cas de la logique déterministe, l’application d’une règle émane d’une classification stricte et binaire de la variable d’entrée. Prenons l’exemple de la figure 5.38(a) où nous présentons l’évolution de l’état de charge d’un supercondensateur SoC_{Sc} dans le cas d’une logique déterministe. D’une part, si le SoC_{Sc} atteint par exemple la valeur 21,9%, cette valeur est considérée comme étant une valeur faible. D’autre part, si au bout d’une certaine durée, le SoC_{Sc} évolue vers la valeur de 22,1%, il sera considéré comme une valeur moyenne. Malgré que les deux valeurs soient très proches l’une de l’autre, la classification est différente et les décisions prises par la logique déterministe seront aussi différentes. Ce genre de situation ne pose pas de problèmes dans le cas de la logique floue car celle-ci attribue des degrés d’appartenance aux différentes variables d’entrée et de sortie. La figure 5.38(b) illustre la classification du SoC_{Sc} dans le cas de la logique floue. Si l’état de charge du supercondensateur atteint la valeur 21,9%, il sera classé dans les deux catégories ‘faible’ et ‘moyen’ avec des degrés d’appartenance respectifs de 0,65 et 0,29. Les règles appliquées tiennent compte du degré d’appartenance de la valeur prise par la variable d’entrée, nous obtenons donc une classification plus souple en comparaison avec la classification de la logique déterministe [121].

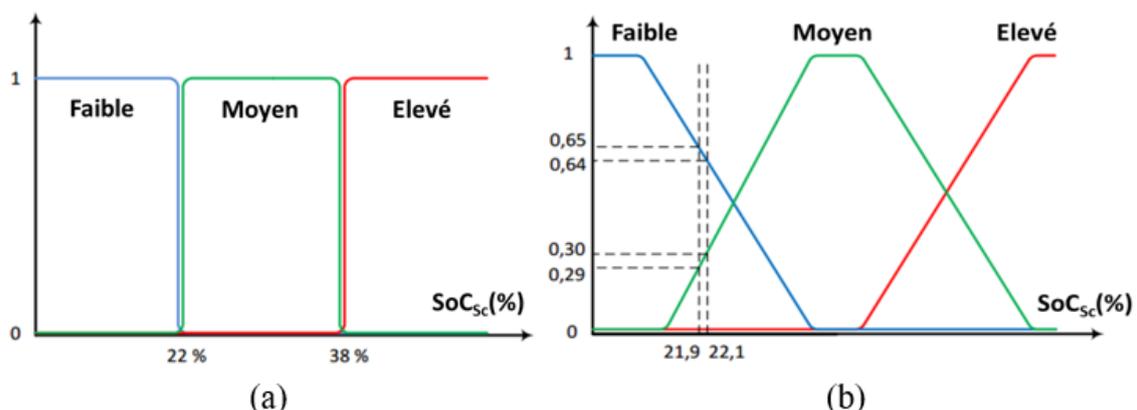


Figure 5.38: Classification des paramètres : (a) logique déterministe, (b) logique floue.

La logique déterministe et la logique floue ne voient l'évolution des paramètres d'entrée de la même façon. A la différence de la logique déterministe qui voit l'évolution des paramètres d'entrée de façon binaire, le degré d'appartenance des variables d'entrée utilisées par la logique floue active les règles en fonction d'un degré de satisfaction. Cette caractéristique donne plus de précision et de performances à la logique floue, où la décision prise par cette logique est une combinaison de plusieurs règles à différents degrés de contribution. Le degré d'appartenance des variables d'entrée aux règles floues sont définis par des fonctions d'appartenance, celles-ci sont généralement très laborieuses à concevoir vu qu'elles reposent sur des procédures 'essai-erreur'. Ainsi, suivant l'expertise du concepteur et la complexité du système, les solutions proposées peuvent ne pas être optimales. Les références contiennent des travaux de recherche utilisant la logique floue dans des stratégies de gestion d'énergie [123][124][125].

5.5 Exemples d'approches fréquentielles adaptatives

5.5.1 Conditions des exemples de simulations

Le but de ces exemples est de montrer l'intérêt et la faisabilité des approches fréquentielles adaptatives dans le cas des applications utilisant un système multi-sources. La complexité d'une approche de gestion d'énergie est définie par les objectifs visés. Pour ces exemples, l'idée de l'approche fréquentielle adaptative est simple. En fonction d'un indicateur d'état, par exemple le vieillissement de la batterie ou l'état de charge des supercondensateurs, nous adaptons l'amplitude et la fréquence des sollicitations assurée par cette source. Les indicateurs choisis pour les deux exemples sont respectivement le SoHR du module des batteries et le SoC du pack des supercondensateurs.

Le système utilisé pour nos exemples est un système qui embarque trois types de sources d'énergie : une pile à combustible, un module de batterie et un pack de supercondensateurs. Vu qu'il existe trois sources de nature différentes, la stratégie de gestion d'énergie basée sur l'approche fréquentielle nécessite deux filtres passe-bas afin de répartir les sollicitations de la charge en trois composantes à savoir : une composante basse fréquence assurée par la pile à combustible, une composante moyenne fréquence fournie par le module des batteries et une composante haute fréquence produite par le pack des supercondensateurs.

La figure 5.39 illustre le schéma de l'approche fréquentielle adaptative avec la variation des deux constantes de temps. Ce schéma ressemble au schéma du troisième chapitre (Figure 3.45) utilisé pour l'approche fréquentielle non-adaptative. Comme il a été déjà mentionné, l'objectif du premier exemple est l'adaptation des sollicitations assignée au module des batteries en fonction de son état de santé ($SoHR_{Bat}$) et celui du 2^{ème} exemple vise à maintenir l'état de charge des supercondensateurs dans un intervalle désiré. Si nous adoptons la stratégie de gestion d'énergie illustrée par la figure 5.39, nous serons amenés à varier les constantes de temps pour deux filtres afin d'adapter les sollicitations acheminées vers les sources d'énergie. En outre, la composante basse fréquence peut contenir un contenu fréquentielle indésirable du fait qu'elle est déduite en dernier lieu et qu'elle dépend de la valeur des constantes de temps des deux filtres passe-bas. Il est donc préférable et commode d'isoler la composante basse fréquence à travers le premier filtre passe-bas, et de contrôler les contributions du module des batteries et du pack des supercondensateurs à travers le deuxième filtre. Autrement dit, la

contribution de la source principale d'énergie (la pile à combustible dans ce cas) ne devra pas être déduite des deux autres composantes assignées aux batteries et aux supercondensateurs. Le schéma de l'approche fréquentielle adaptative avec la variation d'une seule constante de temps est illustré sur la figure 5.40. Dans le premier exemple, nous visons l'adaptation du contenu fréquentielle des sollicitations assignées au module de batteries. Pour cet effet, nous utilisons le $SoHR_{Bat}$ comme entrée de la logique de décision. Dans le deuxième exemple, nous visons la conservation de l'état de charge des supercondensateurs dans un intervalle prédéfini. Pour cet effet, nous utilisons le SoC_{Sc} et le courant de la charge comme entrées de la logique de décision.

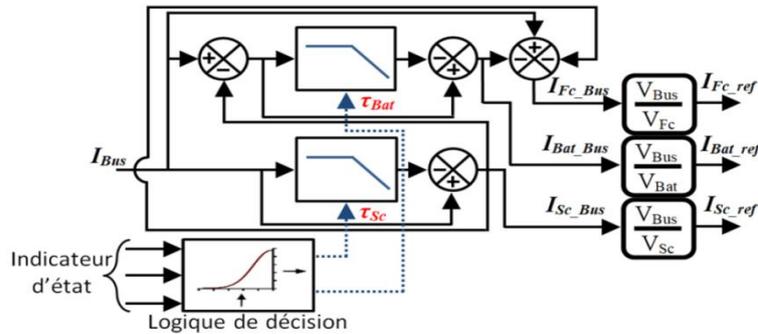


Figure 5.39: Approche fréquentielle adaptative avec la variation de deux constantes de temps.

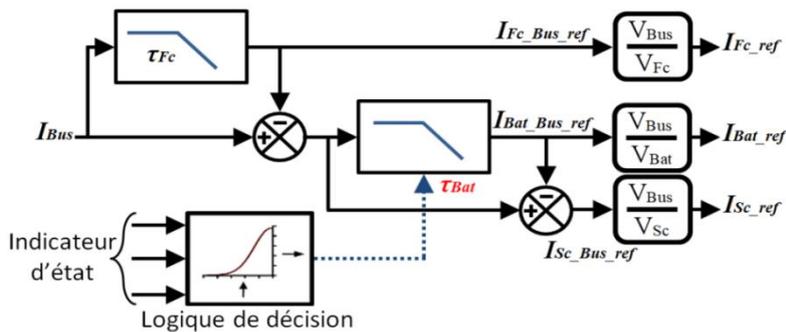


Figure 5.40: Approche fréquentielle adaptative avec la variation d'une seule constante de temps.

Pour la constante de temps τ_{Fc} , nous ne disposons pas des valeurs de densité de puissance et d'énergie propre à la pile à combustible, nous choisissons donc une valeur supérieure à celle de la constante de temps de la batterie vu que cette dernière dispose d'une densité de puissance supérieure à celle de la pile à combustible. En ce qui concerne τ_{Bat} , nous calculons sa valeur à partir de la densité de puissance et celle d'énergie qui sont indiquées dans le « datasheet » de la batterie (Annexe B et référence [112]), et nous varions la valeur de τ_{Bat} en fonction du $SoHR_{Bat}$ pour le premier exemple et en fonction de I_{Bus} et du SoC_{Sc} pour le deuxième exemple. Vu que nous ne connaissons pas l'évolution de la constante de temps τ_{Bat} en fonction du $SoHR_{Bat}$, cette variation sera faite de façon intuitive.

5.5.2 Résultats des exemples de simulations

5.5.2.1 1^{er} exemple : Approche fréquentielle adaptative basée sur une logique déterministe

Nous utilisons un profil où la valeur de la résistance interne du module des batteries augmente de 10% à partir de 500s et de 20% à partir de 1000s. Nous adaptons la valeur de la constante de temps du deuxième filtre passe-bas quand ces changements sont détectés. Les

figures 5.44 et 5.46 illustrent respectivement l'évolution du SoHR et de la constante de temps. Les figures 5.41, 5.42 et 5.43 présentent respectivement les contributions des différentes sources d'énergies du système à savoir : le module des batteries, le pack des supercondensateurs et la pile à combustible. La figure 5.45 illustre le contrôle de la tension du bus continu du système multi-sources. La consigne du courant de la pile est défini par le premier filtre et à travers la constante de temps τ_{Fc} , cette dernière ne change pas de valeur par conséquent le contenu fréquentielle du courant I_{Fc} ne change pas. Par contre le contenu fréquentielle des courants I_{Bat} et I_{Sc} changent suivant les nouvelles valeurs de la constante de temps τ_{Bat} défini par l'évolution de la valeur du $SoHR_{Bat}$. Quand une variation de ce paramètre est détectée par l'algorithme de gestion d'énergie, ce dernier adapte la valeur de la constante de temps τ_{Bat} du deuxième filtre passe-bas.

En effet, quand la valeur du $SoHR_{Bat}$ augmente, cela signifie que la valeur de la résistance interne du module des batteries augmente et que le module de batteries a vieilli. Le nouvel état de vieillissement du module de batteries nécessite une adaptation des sollicitations en courant assurée par les batteries en termes de fréquence et d'amplitude. Cette adaptation est réalisée par le changement de la constante de temps du filtre de répartition des composantes. Le contenu fréquentielle soustrait du courant des batteries est assuré dans ce cas par le pack des supercondensateurs car il s'agit d'une source de puissance qui peut supporter des sollicitations à haute fréquence de variation. Dans les figures 5.46 et 5.44, l'adaptation de la constante de temps est réalisée aux instants 500s et 1000s. Il faut noter que les nouvelles valeurs des constantes de temps n'émanent pas d'une étude préalable, elles sont choisies supérieures aux anciennes valeurs afin de réduire le contenu fréquentielle acheminée vers le module des batteries. Nous avons choisis un exemple ou la constante de temps τ_{Bat} est 100 fois plus grande quand le $SoHR_{Bat}$ augmente de 10%. Nous supposons dans ce cas, que l'état de santé des supercondensateurs n'est pas détérioré et qu'ils sont en mesure d'assurer la contribution définie par la nouvelle constante de temps.

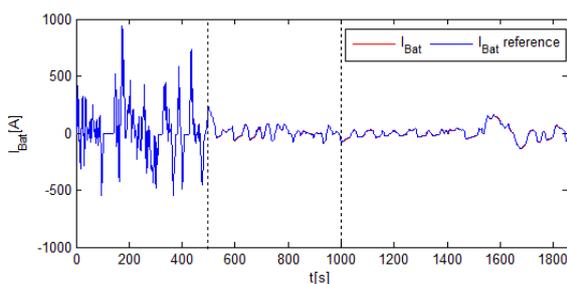


Figure 5.41: Courant des batteries pour une gestion d'énergie adaptative.

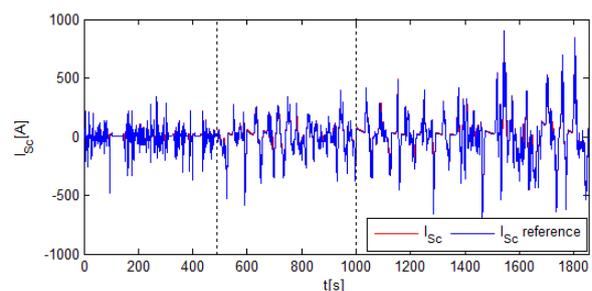


Figure 5.42: Courant des supercondensateurs pour une gestion d'énergie adaptative.

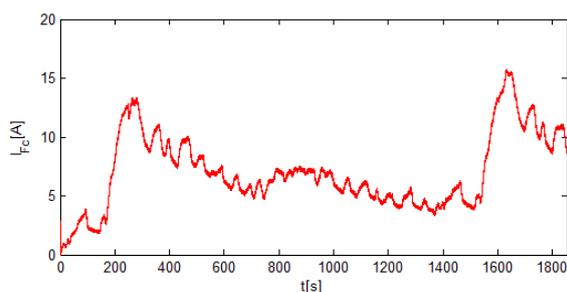


Figure 5.43: Courant de la pile à combustible pour une gestion d'énergie adaptative.

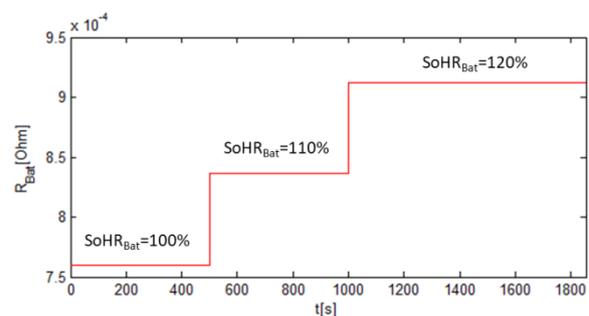


Figure 5.44: Scénario choisi pour R_{Bat} et valeur du $SoHR_{Bat}$ correspondante.

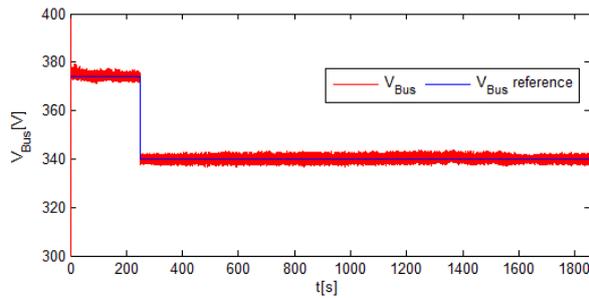


Figure 5.45: Contrôle de la tension du bus continu pour une gestion d'énergie adaptative.

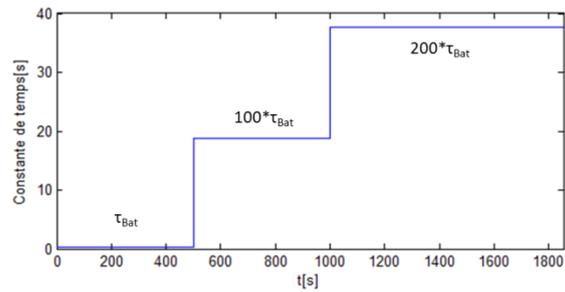


Figure 5.46: Evolution de la constante de temps en fonction du $SoHR_{Bat}$.

5.5.2.2 2^{ème} exemple : Approche fréquentielle adaptative basée sur la logique floue.

Dans ce deuxième exemple, la gestion d'énergie adaptative reposera sur l'utilisation de la logique floue. Le cycle de conduite utilisé est le NYCC (New York City Cycle), ce cycle de conduite est présenté dans la figure 1.19 (b).

Nous utiliserons la même architecture du système multi-sources utilisée dans l'exemple précédent (Figure 5.40). La variation de la constante de temps ne concerne donc que le deuxième filtre passe bas, ce dernier partage le reste de la demande de la charge entre le module des batteries et le pack des supercondensateurs (une partie de cette demande est préalablement acheminée vers la pile à combustible via le premier filtre passe pas).

A la différence du premier exemple dont l'objectif est de varier la constante de temps en fonction de l'état de santé du module des batteries ($SoHR_{Bat}$). L'objectif de cet exemple s'intéresse à la variation de la constante de temps afin de garder l'état de charge du pack des supercondensateurs (SoC_{Sc}) dans une plage raisonnable que nous définissons.

Le choix du SoC_{Sc} comme critère (indicateur d'état) pour la stratégie de gestion d'énergie adaptative a été mené dans le but de montrer que la définition des règles floues et de la plage de variation de la variable de sortie (la constante de temps dans notre cas) est une procédure extrêmement difficile. Il se peut que la dynamique des variations de la demande acheminée vers les supercondensateurs soit trop élevée ainsi la logique de décision ne pourra pas intervenir, ou bien les plages de variation de la constante de temps définie dans les fonctions d'appartenance ne permettent pas de maintenir le SoC_{Sc} dans la plage désirée.

Tableau 5.1: Les différentes règles du système à logique floue.

f_{Bat}		I_{Bus}		
		NE	ZE	PO
SoC_{Sc}	Low	Low	Medium	High
	Medium	Medium	Medium	Medium
	High	High	Medium	Low

Dans notre exemple, les variables d'entrée de la logique de décision sont l'état de charge des supercondensateurs SoC_{Sc} et le courant de la charge I_{Bus} . Les fonctions d'appartenance de ces deux entrées sont respectivement présentées dans les figures 5.47 et 5.48.

Le système de logique floue implémentée pour la gestion d'énergie adaptative possède dans notre cas une seule sortie il s'agit de la fréquence de coupure du deuxième filtre passe

bas (Figure 5.40), une conversion est réalisée afin de calculer la constante de temps du filtre. Les fonctions d'appartenance de la variable de sortie sont présentées dans la figure 5.49.

La fuzzification est effectuée à l'aide de fonctions d'appartenance trapézoïdale. La variable d'entrée SoC_{Sc} possède trois fonctions d'appartenance : Low (basse), Medium (moyenne) et High (élevée). La variable d'entrée I_{Bus} possède aussi trois fonctions d'appartenance : NE (négative), ZE (nulle) et PO (positive). De même, La variable de sortie f_{Bat} possède trois fonctions d'appartenance : Low (basse), Medium (moyenne) et High (élevée). Dans notre exemple nous utilisons une inférence floue Min-Max et une défuzzification centroïde.

Lors des phases d'accélération du véhicule, la charge demande un maximum de puissance aux sources d'énergie embarquées par conséquent I_{Bus} est positive (PO). Dans ce cas, un maximum d'énergie doit être extrait du pack des supercondensateurs à condition que son état de charge SoC_{Sc} soit élevée (High), f_{Bat} doit être réduite afin de solliciter les supercondensateurs et réduire la contribution du module des batteries. Si au cours du cycle de missions le SoC_{Sc} diminue, f_{Bat} devrait augmenter afin de garder l'état de charge des supercondensateurs dans une plage raisonnable.

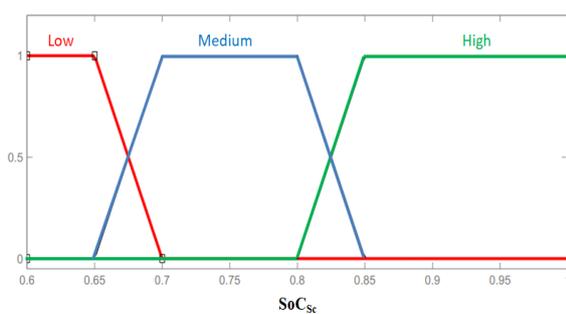


Figure 5.47: Fonctions d'appartenance de la variable d'entrée SoC_{Sc} .

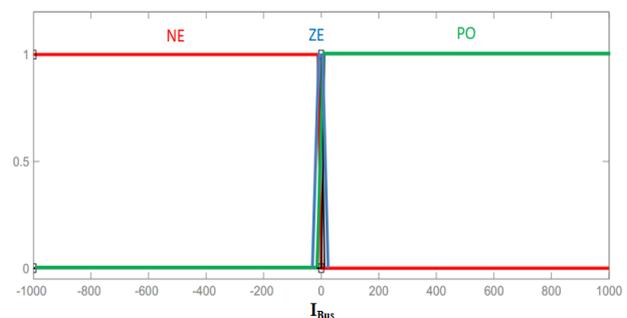


Figure 5.48: Fonctions d'appartenance de la variable d'entrée I_{Bus} .

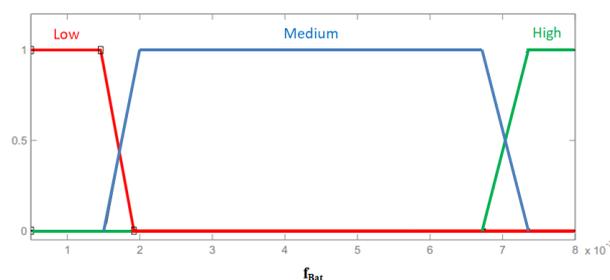


Figure 5.49: Fonctions d'appartenance de la variable de sortie f_{Bat} .

Lors des phases de freinages et décélérations, le courant de la charge I_{Bus} est négative (NE) et les sources d'énergie sont en mode de récupération d'énergie (charge). Si le SoC_{Sc} est faible (Low), la partie supérieure de l'énergie récupérée doit être acheminée vers le pack des supercondensateurs, dans ce cas f_{Bat} est faible (Low) et lorsque le SoC_{Sc} augmente, la fréquence de division devra augmenter afin de ne pas trop chargé le pack des supercondensateurs. Lorsque le courant de charge est faible, autrement dit I_{Bus} est proche du zéro (ZE), nous choisissons une fréquence de coupure moyenne (Medium) pour le filtre passe-bas. Les règles floues définies pour cet exemple sont résumées dans le tableau 5.1. Afin de montrer l'atout de l'approche fréquentielle adaptative basée sur la logique floue, nous

comparons les résultats de cette stratégie avec l'approche fréquentielle non-adaptative ou la constante de temps du filtre reste figée tout au long du cycle de conduite.

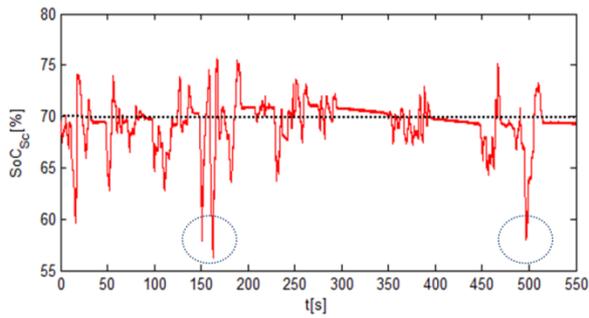


Figure 5.50: Evolution du SoC_{Sc} dans le cas d'une gestion d'énergie adaptative.

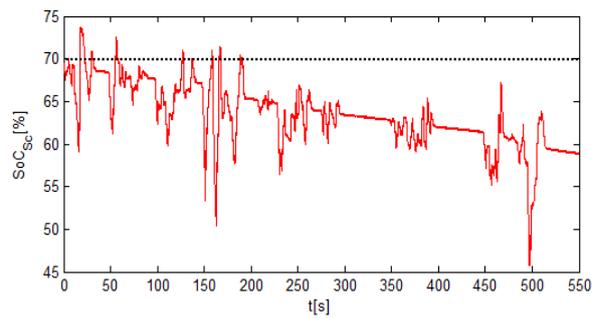


Figure 5.51: Evolution du SoC_{Sc} dans le cas d'une gestion d'énergie non-adaptative.

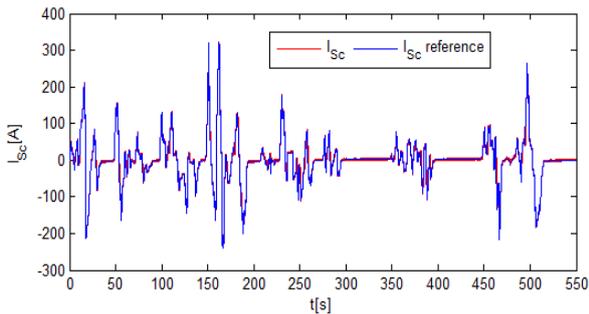


Figure 5.52: Courant des supercondensateurs dans le cas d'une gestion d'énergie adaptative.

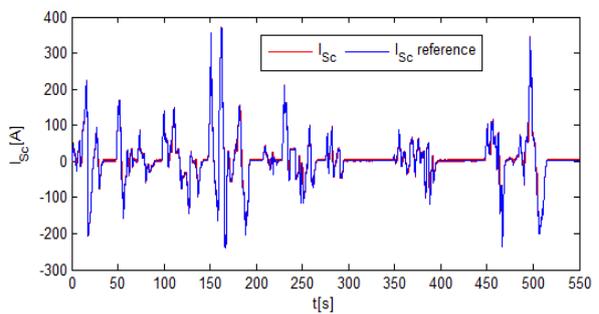


Figure 5.53: Courant des supercondensateurs dans le cas d'une gestion d'énergie non-adaptative.

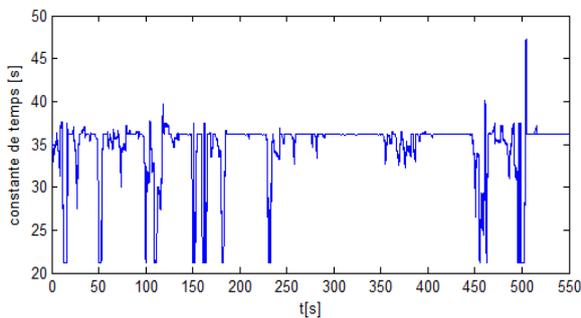


Figure 5.54: Evolution de la constante dans le cas d'une gestion d'énergie adaptative.

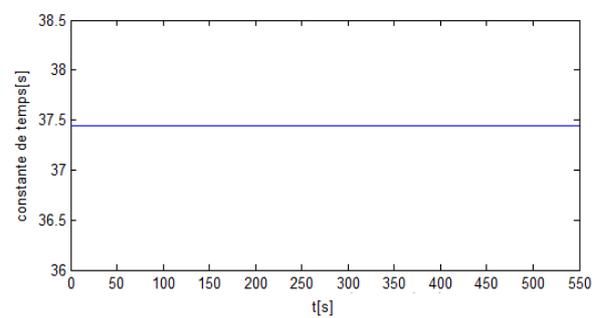


Figure 5.55: Evolution de la constante dans le cas d'une gestion d'énergie non-adaptative.

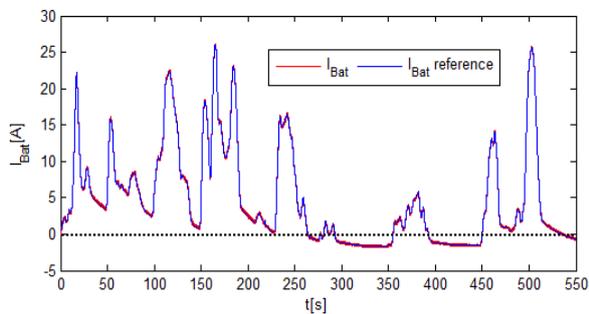


Figure 5.56: Courant des batteries dans le cas d'une gestion d'énergie adaptative.

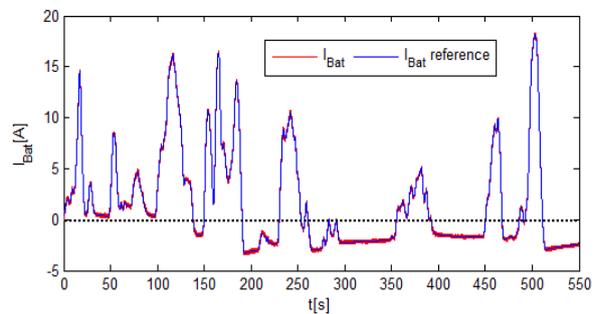


Figure 5.57: Courant des batteries dans le cas d'une gestion d'énergie non-adaptative.

Les figures 5.50 et 5.51 illustrent respectivement les états de charge du pack des supercondensateurs (SoC_{Sc}) dans le cas de la stratégie de gestion d'énergie adaptative et de la version non-adaptative.

Dans le cas de la stratégie de gestion d'énergie non-adaptative, la valeur moyenne de l'état de charge du SoC_{Sc} décroît de façon continue et peut donc atteindre des valeurs critiques. La constante de temps reste fixe tout au long du cycle de conduite (Figure 5.55) et nous ne profitons pas des autres sources d'énergie présentes au sein du système multi-sources à savoir le module de batteries dont le courant est présenté dans les figure 5.57. Le fait de ne pas adapter la constante de temps du filtre ne pousse pas le module des batteries à contribuer efficacement dans l'accomplissement de notre objectif. I_{Bat} répond donc au même contenu fréquentiel, il n'agit pas quand le SoC_{Sc} est faible ou quand le courant de la charge est élevé. La contribution du pack des supercondensateurs en termes de courant dans le cas de la stratégie de gestion non-adaptative est illustrée dans la figure 5.53.

Dans le cas de l'approche fréquentielle adaptative, nous arrivons à maintenir la valeur moyenne du SoC_{Sc} dans la plage souhaitée ou bien la maintenir autour d'une valeur souhaitée (Figure 5.50). En effet, la gestion d'énergie adaptative prend en compte l'évolution de l'état de charge des supercondensateurs et varie le constante de temps au fur et à mesure que le SoC_{Sc} change (Figure 5.54), cette particularité n'existe pas dans les versions non-adaptative de l'approche fréquentielle et par conséquent le niveau du l'état de charge des sources n'est pas contrôlé et peut atteindre des valeurs très faibles. Les faibles états de charge des sources peuvent nuire à l'état de santé de certaines sources d'énergie (par exemple les batteries à grande densité de puissance), ils peuvent aussi mettre en danger l'application en question ainsi que ces utilisateurs, en effet, un faible état de charge signifie un niveau de tension faible ce qui pousse le courant a augmenté afin de garder le meme niveau de puissance. La contribution du pack des supercondensateurs en termes de courant dans le cas de la stratégie de gestion adaptative est présentée dans la figure 5.52.

En comparaison avec la version non-adaptative, le module des batteries participe activement dans l'accomplissement de l'objectif de la gestion d'énergie qui se résume dans le maintien du SoC_{Sc} dans une plage désirée. Comme le montrent les figures 5.56 et 5.57, durant les phases d'accélération, la contribution du module des batteries dans le cas de la stratégie de gestion adaptative est plus élevée que celle de la version non-adaptative. Cette particularité permet de conserver le SoC_{Sc} a un niveau raisonnable, en outre les phases de charge du module des batteries (récupération d'énergie) sont nombreuses dans le cas de la stratégie de gestion d'énergie non-adaptative en comparaison avec la version adaptative, cela empeche le pack des supercondensateurs de récupérer de l'énergie quand son SoC_{Sc} est faible.

Dans la figure 5.8, nous remarquons que malgré l'utilisation des règles floues afin de garder l'état de charge des supecondensateurs dans la plage désirée, le SoC_{Sc} dépasse la plage de variation souhaitée. Ce dépassement est du à la variation rapide de la composante assignée au pack des supercondensateurs, la logique de décision ne peut pas suivre ce changement rapide autrement dit la constante de temps ainsi que les règles floues ne sont pas bien adaptées au changement brusque de la composante haute fréquence assurée par les supercondensateurs.

A travers ce deuxième exemple, nous nous apercevons que le choix de la constante de temps (la sortie du système flou dans notre cas) ainsi que la définition des règles floues n'est pas une tâche aisée, au contraire il s'agit d'une procédure très délicate vu que nous ignorons à l'avance le contenu fréquentiel de la demande du véhicule et par conséquent le contenu fréquentiel des composantes assignées aux différentes sources embarquées. Comme nous

l'avons déjà souligné dans ce mémoire, la demande du véhicule dépend de plusieurs facteurs sur lesquels nous nous connaissons pas suffisamment d'informations à savoir : le comportement du conducteur, l'état de la route , ect. Ainsi le choix des constantes de temps adaptées à chaque situation est excessivement difficile à accomplir.

Généralement, pour un système donné, la définition des règles floues et de la sortie ou des sorties de la logique de décision en fonction des indicateurs (les entrées) exige une expertise, une très bonne connaissance du système multisource étudié.

Remarques :

Dans cet exemple, la logique de décision basée sur les règles floues prend majoritairement des valeurs inférieures à la valeur moyenne de l'intervalle de variation de la constante de temps (Figure 5.6). Cela revient au fait que le SoC_{Sc} diminue en permanence (le pack des supercondensateurs se décharge durant le cycle de conduite) et que le point de départ choisi est égale à $SoC_{Sc}=70\%$. L'objectif étant de maintenir l'état de charge des supercondensateurs à un niveau raisonnable que nous avons choisi. Pour accomplir cet objectif, nous profiterons de la présence du module des batteries, nous acheminerons la demande de la charge vers les batteries quand le SoC_{Sc} est faible et/ou nous stockons l'énergie produite par la chaîne de traction dans le pack des supercondensateurs. Ces opérations peuvent entraîner une décharge profonde du module des batteries ou une surcharge de ce dernier. Pour une stratégie de gestion d'énergie plus effective, les états de charge de toutes les sources d'énergie doivent être pris en compte. Notre exemple a pour objectif principal de montrer la faisabilité des approches fréquentielles adaptatives.

Vu sa complexité, il est à noter que le choix de l'intervalle de la constante de temps du filtre passe-bas a été réalisé au bout de plusieurs essais. Le calcul des extrémités de cet intervalle repose sur la constante de temps propre au module des batteries.

5.6 Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons présentés la validation expérimentale de l'approche fréquentielle en utilisant un banc de test à échelle réduite basé sur le système de contrôle dSPACE. Comme c'était le cas pour les simulations comportementales, les essais expérimentaux ont été réalisés pour différentes configurations du système hybride et pour différents cycles de conduites. Les résultats expérimentaux obtenus appuient les résultats de simulations et montrent ainsi les performances de l'approche fréquentielle.

L'approche fréquentielle est une stratégie de gestion d'énergie intéressante du fait qu'elle décompose les sollicitations de la chaîne de traction/propulsion en différentes composantes adaptées aux types et aux nombres des sources utilisées par le véhicule. Cependant, cette approche ne prend pas généralement en compte les indicateurs d'état des sources, ce qui la rend vulnérable si l'un de ces indicateurs d'état atteint des valeurs critiques (SoC très faible ou un SoH très élevé).

Afin de renforcer les capacités de cette méthode de gestion d'énergie, nous avons investigué et proposé une version adaptative de l'approche fréquentielle. Cette nouvelle méthode prend en compte les indicateurs d'état des sources et adapte les constantes de temps

des filtres suivant les valeurs prises par ces indicateurs. Nous avons proposé deux exemples pour montrer la faisabilité de cette approche à travers des simulations réalisées dans l'environnement Matlab/Simulink.

La conception d'une approche adaptative dépend de l'architecture du système, du nombre et du type des sources d'énergie embarquées, sans oublier les objectifs du système multi-sources en termes d'autonomie, de puissance et de durée de vie des sources. La conception d'une approche adaptative n'est pas une tâche aisée car elles nécessitent des études de vieillissement des sources d'énergie, une bonne compréhension du système et une définition claire des objectifs de la stratégie de gestion d'énergie implémentée. Ces études exigent des tests longs, agressifs et dont la marge d'imprécision peut être élevée. En outre, les différents paramètres et indicateurs d'état des sources d'énergie sont corrélés les uns aux autres, ce qui complique d'avantage la conception de la stratégie de gestion d'énergie basée sur l'approche fréquentielle.

Conclusion générale

Ce travail de thèse a visé principalement le développement d'une stratégie de gestion optimale d'énergie électrique pour une application de type véhicule électrique. En d'autres termes, l'approche de gestion d'énergie a ambitionné la maîtrise des interactions des sources et charge sur le bus continu. Ensuite la mise en œuvre des stratégies de gestion d'énergie basées sur une approche de décomposition fréquentielle a permis d'aborder les questions du dimensionnement des solutions. Le développement de nouvelles stratégies de gestion d'énergie adaptatives qui consiste à changer la fréquence de coupure des filtres suivant l'évolution de l'état de santé ou l'état de charge des unités de stockage a été initié avec succès. Afin de valider par la pratique les concepts nous avons réalisé un banc d'essai expérimental à échelle réduite. Les résultats préalablement vérifiés par de nombreuses simulations ont pu ainsi être validés.

Nous avons commencé nos travaux par une étude d'état de l'art sur les véhicules électriques ainsi que les différentes technologies de stockage d'énergie utilisées dans les applications de transport. Cette étude nous a permis d'avoir une connaissance sur les technologies de stockage d'énergie utilisées dans les applications de transport, les architectures des chaînes de traction/propulsion et les performances des sources d'énergie vis-à-vis des sollicitations du véhicule durant les cycles de conduite.

Nous nous sommes alors intéressés par la suite à la modélisation des différents composants d'un type de système multi-sources retenu pour notre étude, à savoir : les sources d'énergie (PAC, batterie LFP et supercondensateurs), les convertisseurs statiques (Convertisseur Buck-Boost, Convertisseur Boost entrelacé et l'onduleur de tension triphasé) et la machine électrique.

Le dimensionnement et le contrôle des différentes composantes des systèmes multi-sources est une étape importante avant la validation de la stratégie de gestion d'énergie au niveau de l'environnement de simulation. À travers les différentes simulations réalisées, nous pouvons constater que l'approche fréquentielle répartie efficacement les sollicitations de la charge sur les différentes sources d'énergie embarquées en tenant compte des performances des sources. Après la vérification de la pertinence l'approche fréquentielle au niveau de l'environnement de simulation, nous avons conçu un banc de test afin d'estimer la validité de cette approche dans le cas d'un système physique. Les résultats des expérimentations obtenus sont satisfaisants et confortent ceux obtenus dans par simulations.

L'approche fréquentielle dans sa version initiale développée au laboratoire GREAH présente de bonnes performances, mais une analyse du fonctionnement avec cette stratégie de gestion d'énergie montre qu'elle ne tient pas compte de l'état de santé, ni de l'état de charge des sources d'énergie. Dans la version adaptative que nous avons développée, l'approche fréquentielle change les constantes de temps des filtres et évite ainsi que les mêmes sollicitations soient imposées aux sources d'énergie si ces dernières ne sont plus en mesure de prendre en charge le même contenu fréquentiel à cause de leur état de santé (SoH) ou leur état de charge (SoC).

En termes de perspectives, il serait intéressant d'affiner la stratégie de gestion d'énergie électrique basée sur l'approche fréquentielle adaptative. Cette perspective nécessite des modèles de vieillissement suffisamment précis afin d'estimer l'état de santé des sources d'énergie et par conséquent prendre en compte ce critère au niveau de la gestion d'énergie par approche fréquentielle adaptative et faire varier les constantes de temps des filtres suivant l'évolution du critère de vieillissement retenu. Il serait aussi intéressant d'intégrer la logique floue de type 2 au niveau des gestions d'énergie, cette variante de logique floue présente des performances et des précisions plus intéressantes que la logique floue de type 1 utilisée dans ce manuscrit.

Annexes

Annexe A : Identification des paramètres de la Machine Synchrone à Aimants Permanents [126][127][128]

Détermination de p et ϕ_r :

Pour identifier ces deux grandeurs, la MSAP est entraînée par une machine à courant continu, et fonctionne en génératrice à vide.

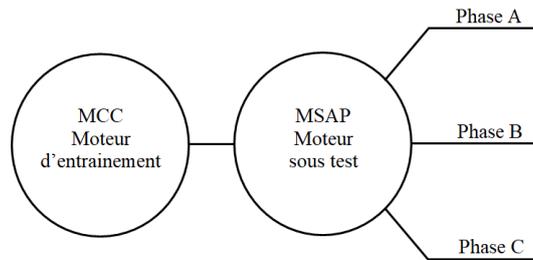


Figure A. 1: Couplage MCC-MS.

Détermination du nombre de paires de pôles p :

Le nombre de paires de pôles représente le rapport entre les grandeurs mécaniques et électriques du moteur, il représente le nombre de segments nord et sud contenus dans l'aimant permanent du rotor. Le nombre de paires de pôles est obtenu à partir du relevé de la force électromotrice à vide en utilisant l'équation (A.1).

$$p = \frac{\omega_{el}}{\Omega} = \frac{2 \cdot \pi}{T_{el} \cdot \Omega} \quad (A.1)$$

Où ω_{el} représente la pulsation des grandeurs électriques et Ω la vitesse de rotation.

Détermination du flux magnétique ϕ_r :

Le flux magnétique ϕ_r caractérise l'intensité et la répartition spatiale du champ magnétique produit par les aimants du rotor, il est obtenu à partir de la courbe de la FEM à vide en utilisant l'équation (A.2).

$$\phi_r = \frac{E_{max}}{\sqrt{3} \cdot \omega_{el}} = \frac{E_{max} \cdot T_{el}}{2\sqrt{3} \cdot \pi} \quad (A.2)$$

Où E_{max} représente la valeur maximale de la FEM à vide mesurée en deux phases.

Application numérique :

Pour notre cas, la FEM à vide est mesurée à une vitesse de 120 tr/min, le relevé de la FEM est présenté dans la figure suivante :

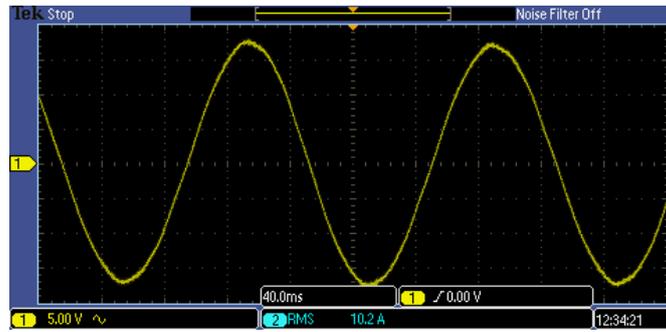


Figure A. 2: Allure de la FEM à vide.

Après calcul, nous obtenons les valeurs suivantes :

$$\begin{cases} p = 3 \\ \phi_r = 0.234 \text{ Wb} \end{cases} \quad (\text{A.3})$$

Détermination de la résistance statorique R_S :

La mesure de la résistance d'une phase du stator est réalisée en utilisant la méthode voltampèremétrique comme indiquée dans les deux schémas ci-dessous. Généralement la résistance statorique désigne la résistance mesurée entre une phase et le neutre. Dans les machines synchrones à aimants permanents, le point neutre n'est pas accessible, il faut donc mesurer la résistance entre deux phases. La mesure de la résistance peut s'effectuer selon le schéma (a) ou selon le schéma (b). Dans le premier cas, la résistance d'une phase est égale à deux-tiers de la résistance entre phases mesurée (équation (A.4)), dans le second cas la résistance d'une phase est égale à la moitié de la résistance entre phases mesurée (équation (A.5)). La valeur de la résistance dépend fortement de la température, c'est la raison pour laquelle il est préférable d'effectuer une série de mesures à différents courants est d'en extraire la moyenne.

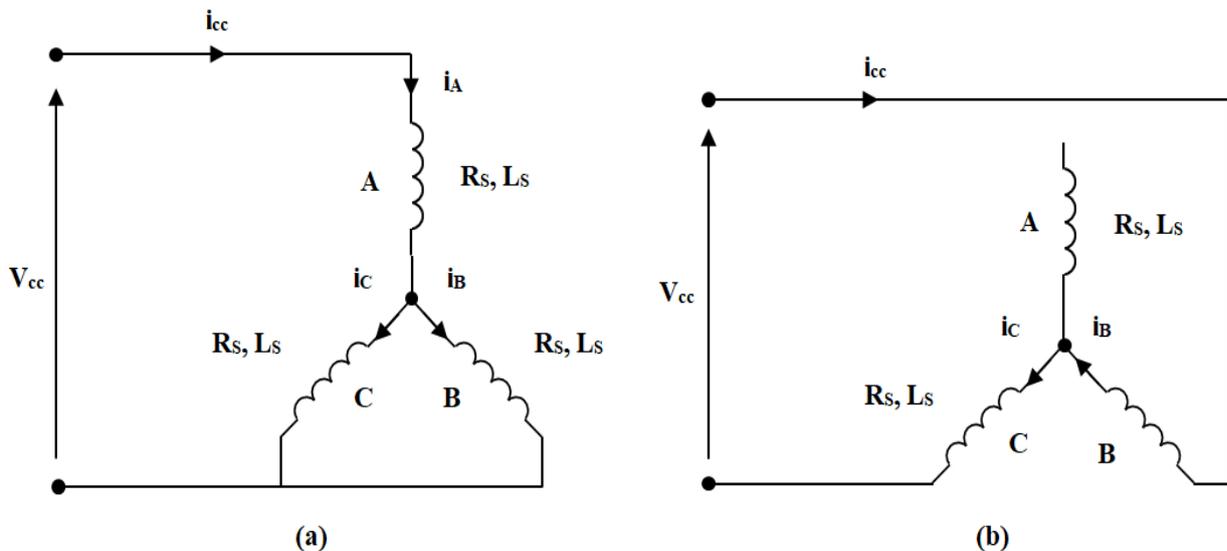


Figure A. 3: Câblage pour le calcul des inductances L_q et L_d .

$$R_s = \frac{2 \cdot V_c}{3 \cdot i_c} \quad (A.4)$$

$$R_s = \frac{V_c}{2 \cdot i_c} \quad (A.5)$$

Après les mesures et le calcul, nous obtenons une valeur de R_s égale à : 1.95Ω

Détermination des inductances L_d et L_q :

La démarche suivie dans cette partie ne peut être acceptée qu'en cas de simplification, lorsque les inductances mutuelles ne sont pas prises en compte. Les inductances L_d et L_q sont déterminées en utilisant l'une des deux méthodes présentées ci-dessous. Les deux méthodes sont équivalentes.

1^{er} méthode :

Le schéma de câblage présenté dans la figure A.4 (a). Initialement le commutateur S_w est à l'état ON et le courant i circule dans l'enroulement. En basculant le switch à l'état OFF, un nouveau courant i_R traverse le circuit. Une résistance réglable R_D permet de régler le courant i_R en fonction de Δi tel qu'il est décrit sur la figure A.4 (b). En fonction de la position du rotor, il est possible de mesurer l'inductance selon l'axe d ou l'axe q en utilisant l'équation (A.6).

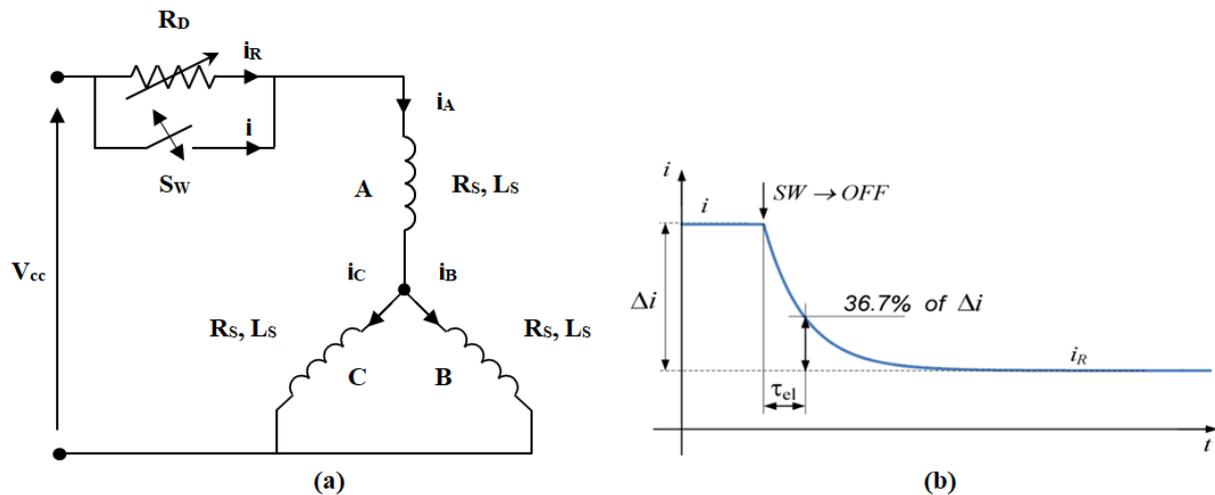


Figure A. 4: (a) Méthode voltampèremétrique, (b) Allure du courant i .

$$L_{d(\theta=0^\circ)} = L_{q(\theta=90^\circ)} = \frac{2}{3} \cdot \tau_{cl} \cdot (R_{ph-ph} + R_D) \quad (A.6)$$

2^{ème} méthode :

Pour la mesure de l'inductance suivant l'axe d avec la deuxième méthode, il faut suivre les étapes suivantes :

- 1) Aligner le rotor sur l'axe d, la phase A est connectée au potentiel positif (+), les phases B et C sont liées au potentiel négatif (-) (Figure A.3 (a)).
- 2) Bloquer l'arbre du rotor.

- 3) Appliquez une tension négative, la phase A est liée au potentiel négatif (-) et les phases B et C sont connectées au potentiel positif (+).
- 4) Mesurez la réponse en échelon du courant par une sonde de courant.
- 5) Calculer l'inductance L_d en utilisant l'équation (A.7).

Pour la mesure de l'inductance suivant l'axe q en utilisant la deuxième méthode, il faut suivre les étapes suivantes :

- 1) Aligner le rotor sur l'axe q, la phase B est connectée au potentiel positif (+), la phase C est liée au potentiel négatif (-), la phase A est flottante. (Figure A.3 (b)).
- 2) Bloquer l'arbre du rotor.
- 3) Appliquez une tension selon la configuration suivante : la phase A est liée au potentiel positif (+) et les phases B et C sont connectées au potentiel négatif (-).
- 4) Mesurez la réponse en échelon du courant par une sonde de courant.
- 5) Calculer l'inductance L_q en utilisant l'équation (A.7).

$$L_{d(\theta=0^\circ)} = L_{q(\theta=90^\circ)} = \frac{2}{3} \cdot \tau_{el} \cdot R_{ph-ph} \quad (A.7)$$

Au cours de mesures le rotor doit être fermement bloqué afin que le flux des aimants n'influence pas la constante de temps du courant i et par conséquent la valeur de l'inductance entre phases. Après mesures et calcul, nous obtenons une valeur de L_q et L_d égale à 13.6mH. La figure A.5 illustre la courbe du courant mesuré pour le calcul des inductances L_q et L_d .

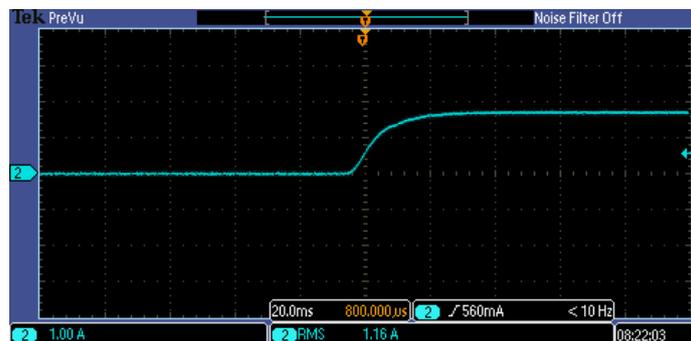


Figure A. 5: Allure du courant mesuré.

Annexe B : Datasheet des éléments de stockage d'énergie électrique utilisés dans les systèmes multi-sources.

Datasheet du supercondensateur Boost-Cap (3000F/2.7V) :

PRODUCT SPECIFICATIONS

ELECTRICAL	BCAP0650	BCAP1200	BCAP1500	BCAP2000	BCAP3000
Rated Capacitance ¹	650 F	1,200 F	1,500 F	2,000 F	3,000 F
Minimum Capacitance, initial ¹	650 F	1,200 F	1,500 F	2,000 F	3,000 F
Maximum Capacitance, initial ¹	780 F	1,440 F	1,800 F	2,400 F	3,600 F
Maximum ESR _{DC} , initial ¹	0.8 mΩ	0.58 mΩ	0.47 mΩ	0.35 mΩ	0.29 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR _{DC} ¹	65 A	75 A	100 A	100 A	100 A
Rated Voltage	2.70 V				
Absolute Maximum Voltage ²	2.85 V				
Absolute Maximum Current	680 A	930 A	1150 A	1500 A	1900 A
Leakage Current at 25°C, maximum ³	1.5 mA	2.7 mA	3.0 mA	4.2 mA	5.2 mA

TEMPERATURE

Operating temperature
(Cell case temperature)

Minimum	-40°C	-40°C	-40°C	-40°C	-40°C
Maximum	65°C	65°C	65°C	65°C	65°C

Storage temperature
(Stored uncharged)

Minimum	-40°C	-40°C	-40°C	-40°C	-40°C
Maximum	70°C	70°C	70°C	70°C	70°C

PHYSICAL

Mass, typical	160 g	260 g	280 g	360 g	510 g
Terminals	Threaded or Weldable				
Maximum Terminal Torque (K04)	14 Nm				
Vibration Specification	ISO 16750, Table 14				
Shock Specification	SAE J2464				

PRODUCT SPECIFICATIONS (Cont'd)

POWER & ENERGY	BCAP0650	BCAP1200	BCAP1500	BCAP2000	BCAP3000
Usable Specific Power, P _d ⁴	6,800 W/kg	5,800 W/kg	6,600 W/kg	6,900 W/kg	5,900 W/kg
Impedance Match Specific Power, P _{max} ⁵	14,000 W/kg	12,000 W/kg	14,000 W/kg	14,000 W/kg	12,000 W/kg
Specific Energy, E _{max} ⁶	4.1 Wh/kg	4.7 Wh/kg	5.4 Wh/kg	5.6 Wh/kg	6.0 Wh/kg
Stored Energy, E _{stored} ^{7,11}	0.66 Wh	1.22 Wh	1.52 Wh	2.03 Wh	3.04 Wh

SAFETY

Short Circuit Current, typical

(Current possible with short circuit from rated voltage. Do not use as an operating current.)

	3,400 A	4,700 A	5,700 A	7,700 A	9,300 A
--	---------	---------	---------	---------	---------

Certifications	UL810a, RoHS				
----------------	--------------	--------------	--------------	--------------	--------------

Datasheet de La batterie Lithium Fer Phosphate (LiFePO4) 100Ah/3.2V :

Winston LFP100AHA TALL cell

Specifications		
Model name	LFP100AHA TALL	Alternative product mark TS-LFP100AHA, WB-LYP100AHA(A)
Nominal voltage	3.2 V	Operating voltage under load is 3.0 V
Capacity	100 AH	+/- 5%
Operating voltage	max 4.0V - min 2.8V	At 80% DOD
Deep discharge voltage	2.5 V	The cells is damaged if voltage drops bellow this level
Maximal charge voltage	4 V	The cells is damaged if voltage exceeds this level
Optimal discharge current	< 50 A	0.5 C
Maximal discharge current	< 300 A	3 C, continuous for max 15 minutes from full charge
Max peak discharge current	< 1000 A	10 C, maximal 5 seconds in 1 minute
Optimal charge current	< 50 A	0.5 C
Maximal charge current	< 300 A	< 3 C with battery temperature monitoring
Maximal continuous operating temperature	80 °C	The battery temperature should not increase this level during charge and discharge
Dimensions	143 X 218 X 67	Millimeters (tolerance +/- 2 mm)
Weight	3.3 kg	Kilograms (tolerance +/- 150g)
Model name	LFP100AHA TALL	Alternative product mark TS-LFP100AHA, WB-LYP100AHA(A)

Datasheet de La batterie Plomb Gel 110Ah/12V :

CARACTERISTIQUES MECANIQUES PHYSICAL SPECIFICATIONS		
TENSION NOMINALE / NOMINAL VOLTAGE		12 V
CAPACITE / NOMINAL CAPACITY (20HR)		100 Ah
DIMENSIONS	Longueur / Length	307 mm
	Largeur / Width	169 mm
	Hauteur / Total Height (with terminal)	215 mm
MASSE / WEIGHT		32,8 Kg
Densité de l'électrolyte		1,28
Bac et COUVERCLE		ABS
POIGNEES DE TRANSPORT		OUI / YES
TYPE DE BORNE / STANDARD TERMINAL		Insert femelle M6 / Female insert M6
COUPLE DE SERRAGE / CLAMPING TORQUE		6 Nm
CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES ELECTRICAL SPECIFICATIONS		
CAPACITE / RATED CAPACITY 1,75 V/élément - 1,75 V/cell	100 Hour rate	111,0 Ah
	20 hour rate	100,0 Ah
	5 hour rate	77,4 Ah
INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LA CAPACITE / CAPACITY AFFECTED BY TEMPERATURE	40°C (104°F)	109%
	20°C (68°F)	100%
	0°C (32°F)	78%
Resistance Interne/ Internal Resistance	3,9 milliohms (25°C, 77°F) batterie chargée - Fully charged battery	
INTENSITE Max / CCA - 18°C	580Amp	
INTENSITE Max / CCA - 0°C	780 Amp	
Courant de Court-circuit	2900 A	
AUTODECHARGE - Self discharge	Moins de 0,1% par mois à 20°C	
T° d'utilisations	-15°C à +50°C	
Courant Max de charge / Max charging current		0,25 C20
Tension de charge / Charging voltage	Floating	2,27 V/elt à 20°C
	Cyclage	2,40 V/elt à 20°C
CERTIFICATIONS	UL: BS6290 Part4 - EUROBAT - I EC 60896-21/22-2004	
TRANSPORTS	N° ONU 2800 Non soumis reglementation transport matières dangereuses- IATA - IMDG Disposition A67	

Annexe C : Exemple de dimensionnement pour un système trois sources (PAC, Batteries et supercondensateurs)

Dans cette annexe, nous présenterons un exemple de la méthode de dimensionnement basée sur l'approche fréquentielle, cette méthode a été détaillée dans le troisième et le quatrième chapitre de ce manuscrit. Le système multi-sources choisi est un système trois sources comprenant une pile à combustible, un module de batteries et un pack de supercondensateurs. La PAC est la source d'énergie principale du système multi-sources, les batteries et les supercondensateurs sont les sources auxiliaires de puissance. Le cycle de conduite utilisé pour ce dimensionnement est le FTP-75.

Comme il a été déjà expliqué dans le troisième et le quatrième chapitre, l'approche fréquentielle décompose les sollicitations de la charge suivant le type et le nombre des sources contenues dans le système multi-sources. Dans cet exemple, la décomposition de la demande de la charge donnera naissance à trois différentes composantes : une composante basse fréquence, une composante moyenne fréquence et une composante haute fréquence. Ces trois composantes permettront respectivement de dimensionner la PAC, le module des batteries et le pack des supercondensateurs.

Les demandes de la charge en termes de puissance et d'énergie dans le cas du cycle FTP-75 sont présentés respectivement dans les figures C.1 et C.2. Ces sollicitations sont obtenues en utilisant le modèle dynamique du véhicule présenté dans le troisième chapitre.

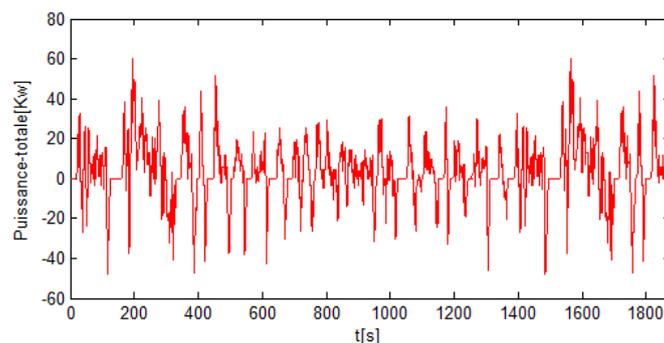


Figure C. 1: Sollicitations du véhicule en termes de puissance pour le cycle FTP-75.

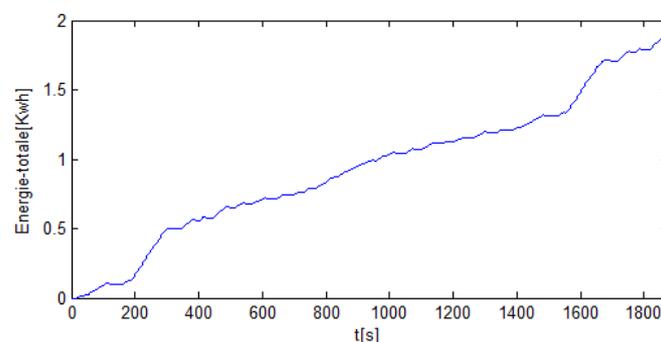


Figure C. 2: Sollicitations du véhicule en termes d'énergie en termes d'énergie pour le cycle FTP-75.

Dimensionnement de la pile à combustible :

Le dimensionnement de la PAC est basé sur la composante basse fréquence extraite de la demande de la charge. Les courbes de puissance et d'énergie représentant la composante basse fréquence sont respectivement illustrées dans les figures C.3 et C.4.

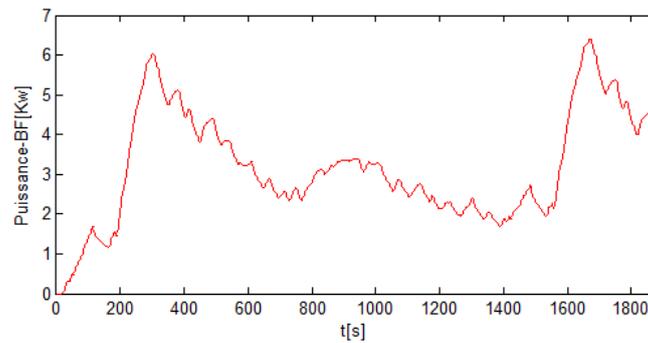


Figure C. 3: Courbe de puissance pour la composante basse fréquence.

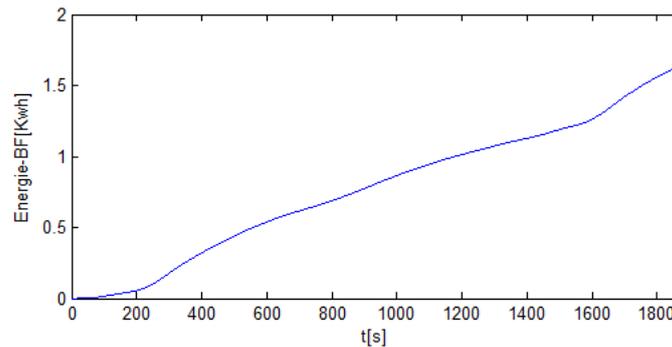


Figure C. 4: Courbe d'énergie pour la composante basse fréquence.

Nous rappelons que la pile à combustible est dimensionnée en termes de puissance autrement dit en se basant sur la courbe de puissance pour la composante basse fréquence. La puissance maximale de dimensionnement est égale à 6,5kW (Figure C.3), nous prenons en compte l'ajout d'un pourcentage de 15% pour les auxiliaires de la PAC.

Le nombre de cellule en série pour une pile à combustible est calculé en utilisant l'équation (3.24). La tension du bus continu est fixée à 374V, pour une cellule le point de fonctionnement nominal est obtenu pour une tension de 0,65V. Le résultat du calcul donne un nombre de cellules en série égale à 288 unités.

$$N_{S_Fc} = \frac{V_{Fc}}{V_{Cell}} = \frac{V_{Bus}}{2 \cdot V_{Cell}} = \frac{374V}{2 \cdot 0.65V} = 288 \quad (C.1)$$

La surface active des cellules de la PAC est calculée en utilisant le système d'équations (3.25), la densité du courant est prise égale à 0.6A/cm². Le résultat du calcul donne une surface active égale à 67cm².

Dimensionnement du module des batteries :

Le dimensionnement du module des batteries est basé sur la composante moyenne fréquence extraite de la demande de la charge. Les courbes de puissance et d'énergie représentant la composante moyenne fréquence sont respectivement illustrées dans les figures C.5 et C.6.

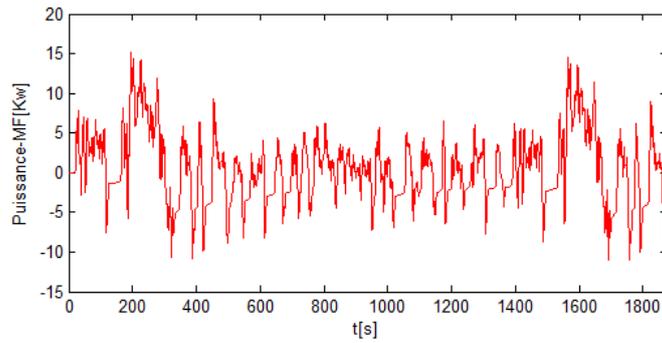


Figure C. 5: Courbe de puissance pour la composante moyenne fréquence.

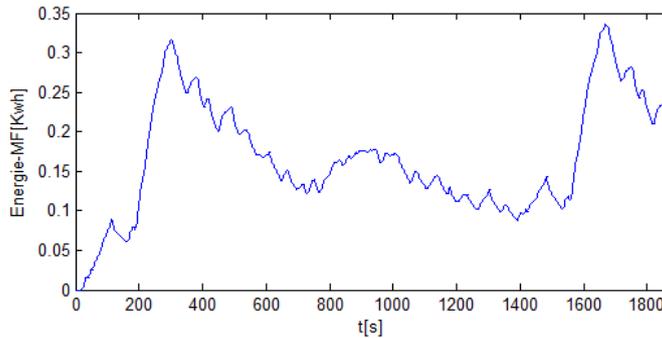


Figure C. 6: Courbe d'énergie pour la composante moyenne fréquence.

Nous rappelons que dans le cas des batteries, le dimensionnement est réalisé en termes de puissance et d'énergie, le choix se portera sur le dimensionnement le plus contraignant. Le calcul du nombre de batteries en série est basé sur l'équation (3.13). Le résultat du calcul donne $N_{S_Bat}=59$ ou $V_{Bus}=374V$ et $V_{el_Bat}=3.2V$.

$$N_{S_Bat} = \frac{V_{Bat_max}}{V_{el_Bat}} = \frac{V_{Bus}}{2 \cdot V_{el_Bat}} = 59 \quad (C.2)$$

Le calcul du nombre de cellules en parallèle repose sur les équations (3.7), (3.8), (3.9), (3.10), (3.11), (3.12), (3.13), (3.14), (3.15) et (3.16). Les différents paramètres utilisés dans les équations de dimensionnement sont présentés dans le tableau C.1.

Tableau C.1: Paramètres du dimensionnement du module des batteries.

Paramètres	Symbole	Valeur
Tension maximale du module des batteries	V_{Bat_max}	187V
Tension du bus continu	V_{Bus}	374V
Puissance maximale de décharge	P_{Tract_max}	15.5Kw
Puissance maximale de charge	P_{Tract_min}	-11,2Kw
Tension d'une cellule de batterie	V_{el_Bat}	3.2V
Courant maximale de charge	I_{el_Ch}	300A
Courant maximale de décharge	I_{el_Dch}	300A
Capacité d'une cellule	C_{el_Bat}	100Ah
Profondeur de décharge des batteries	DoD_{Bat}	70%
Energie de traction maximale	E_{Tract_max}	340Wh
Energie de traction minimale	E_{Tract_min}	0 Wh

Les valeurs de P_{Tract_min} et P_{Tract_max} sont obtenus à partir de la figure C.5, ou P_{Tract_min} et P_{Tract_max} sont respectivement les puissances maximales de charge et décharge (Les puissances

de la composante moyenne fréquence assignée aux batteries durant les modes de charge et décharge). Les valeurs de E_{Tract_min} et E_{Tract_max} sont obtenus à partir de la figure D.6. Il s'agit des énergies de traction, elles sont obtenues en intégrant les valeurs des puissances. La valeur choisie pour la profondeur de décharge DoD_{Bat} est égale à 70%. Les valeurs des courants maximales de charge I_{el_Dch} et décharge I_{el_Ch} ainsi que celle de la capacité d'une cellule C_{el_Bat} sont disponibles dans la datasheet du constructeur (Annexe B et référence [107]).

La valeur de N_{P_Bat} obtenue par les calculs est inférieure à 1, nous prenons donc $N_{P_Bat}=1$. La valeur obtenue est principalement due à la grande capacité des batteries utilisées (100Ah).

Dimensionnement du pack des supercondensateurs

Le dimensionnement du pack des supercondensateurs est basé sur la composante haute fréquence extraite de la demande de la charge. Les courbes de puissance et d'énergie représentant la composante haute fréquence sont respectivement illustrées dans les figures C.7 et C.8.

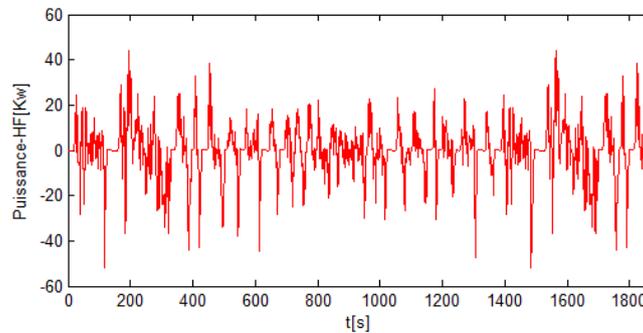


Figure C. 7: Courbe de puissance pour la composante haute fréquence.

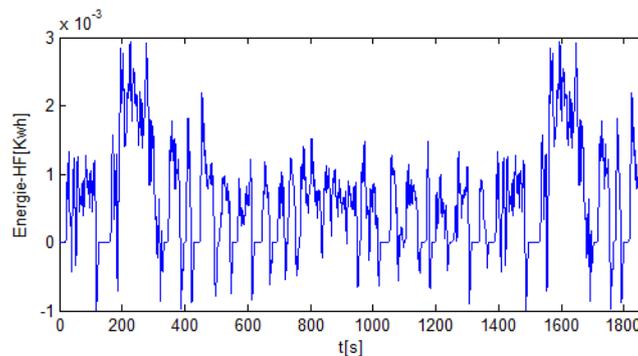


Figure C. 8: Courbe d'énergie pour la composante haute fréquence.

Comme c'est le cas pour les batteries, le dimensionnement des supercondensateurs est réalisé en termes de puissance et d'énergie, le choix se portera sur le dimensionnement le plus contraignant, sauf que pour les supercondensateurs nous privilégions un dimensionnement en puissance. Le calcul du nombre des supercondensateurs en série est basé sur l'équation (3.19). Le résultat du calcul donne $N_{S_Sc}=70$.

$$N_{S_Sc} = \frac{V_{Sc_max}}{V_{el_Sc}} = \frac{V_{Bus}}{2 \cdot V_{el_Sc}} = 70 \quad (C.3)$$

Le calcul du nombre de cellules en parallèle repose sur les équations (3.17), (3.18), (3.19), (3.20), (3.21) et (3.22). Les différents paramètres utilisés dans les équations de dimensionnement sont présentés dans le tableau C.2.

Tableau C.2: Paramètres du dimensionnement du pack des supercondensateurs.

Paramètres	Symbole	Valeur
Tension maximale du module des supercondensateurs	V_{Sc_max}	187V
Tension du bus continu	V_{Bus}	374V
Puissance maximale de décharge	$P_{Sc_max_Dch}$	45Kw
Puissance maximale de charge	$P_{Sc_max_Ch}$	-52Kw
Tension d'un élément de supercondensateur	V_{el_Sc}	2.7V
Capacité d'un supercondensateur	C_{el_Sc}	3000F
Profondeur de décharge des supercondensateurs	DoD_{Sc}	75%
Energie de traction maximale	E_{Sc_max}	3Wh
Energie de traction minimale	E_{Sc_min}	-1Wh
la puissance spécifique utilisable dans un élément de supercondensateur	P_{el_Sc}	2.950Kw

La valeur de la puissance spécifique utilisable dans un élément de supercondensateur P_{el_Sc} est fournie par le constructeur (Annexe B et référence [83]). Les valeurs de $P_{Sc_max_Ch}$, E_{Sc_min} ont un signe négatif car il s'agit d'une récupération d'énergie (une charge).

La valeur de N_{P_Sc} obtenue après les calculs est inférieur à 1, nous prenons donc $N_{P_Sc}=1$. La valeur obtenue est principalement due à la grande capacité des supercondensateurs utilisés (3000F).

Productions scientifiques

Les travaux effectués durant cette thèse ont permis de participer à différentes conférences internationales. Nous avons également proposé un article pour une revue IEEE Transactions on Transportation Electrification, le papier est en cours de la deuxième phase d'évaluation, il existe aussi d'autres articles de revues en cours de finalisation.

Ismail Oukkacha, Cheikh Tidane Sarr, Mamadou Baïlo Camara, Brayima Dakyo and Jean-Yves Parade, “*Energetic performances booster for Electric Vehicle Applications using Transient power control and Supercapacitors-Batteries/Fuel Cell*”, IEEE Transactions on Transportation Electrification (en cours d'évaluation).

Ismail Oukkacha, Mamadou Baïlo Camara, Brayima Dakyo, “*Electric Vehicles Energy Management using Lithium-batteries and Ultracapacitors*”, IEEE International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), April 2017.

Ismail Oukkacha, Mamadou Baïlo Camara, Brayima Dakyo and Jean-Yves Parade, “*Onboard energy management for electric vehicles applications — Using fuel cell and ultracapacitors*”, IEEE Industrial Electronics Society Conference (IECON), October 2017.

Ismail Oukkacha, Mamadou Baïlo Camara, Brayima Dakyo, “*Electric vehicles energy management using direct torque control -space vector pulse width modulation combined to polynomial controllers*”, IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), November 2017.

Marwa Turki, **Ismail Oukkacha**, Nicolas Langlois, Adnan Yassine, Mamadou Baïlo Camara, Brayima Dakyo, “*A New Tuning Approach for MPC Applied to a Disturbed DC Motor*”, IEEE International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CODIT), April 2017.

Ismail Oukkacha, Mamadou Baïlo Camara, Brayima Dakyo, “*Energy management in Electric Vehicle based on frequency sharing approach, using Fuel cells, Lithium batteries and Supercapacitors*”, IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), October 2018.

Références

- [1] Gianfranco Pistoia, Boryann Liaw, 'Behavior of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles Battery Health, Performance, Safety, and Cost', Springer, 2018.
- [2] Simona Onori, Lorenzo Serrao, Giorgio Rizzoni, 'Hybrid Electric Vehicles Energy Management Strategies', Springer, 2016.
- [3] C.Zheng, W.Li and Q.Liang, 'An Energy Management Strategy of Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicle Applications', IEEE Transactions on Sustainable Energy, Volume.9, Issue.4, pp.1880-1888, Oct.2018.
- [4] S.Dusmez and A.Khaligh, 'A Supervisory Power-Splitting Approach for a New Ultracapacitor–Battery Vehicle Deploying Two Propulsion Machines', IEEE Transactions on Industrial Informatics, Volume.10, Issue.3, pp.1960-1971 Aug.2014.
- [5] M.Tabari and AYazdani, 'An Energy Management Strategy for a DC Distribution System for Power System Integration of Plug-In Electric Vehicles', IEEE Transactions on Smart Grid, Volume.7, Issue.2, pp.659-668, Mar.2016.
- [6] J.Shen and A.Khaligh, 'A Supervisory Energy Management Control Strategy in a Battery/Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System', IEEE Transactions on Transportation Electrification, Volume.1, Issue.3, pp.223-231, Oct.2015.
- [7] H.Tian, X.Wang, Z.Lu, Y.Huang and G.Tian, 'Adaptive Fuzzy Logic Energy Management Strategy Based on Reasonable SOC Reference Curve for Online Control of Plug-in Hybrid Electric City Bus', IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Volume.19, Issue.5, pp.1607-1617, May.2018.
- [8] Walid Hankache, 'Gestion optimisée de l'énergie électrique d'un groupe électrogène hybride à pile à combustible', Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse, 2008.
- [9] Cossi Rockys Akli, 'Conception systémique d'une locomotive hybride autonome. Application à la locomotive hybride de démonstration et d'investigations en énergétique LHyDIE développée par la SNCF', Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse, 2008.
- [10] H.Lin, J.Jiang, S.Weil, L.Cheng, 'Optimisation control for the efficiency of an on-board hybrid energy storage system in tramway based on fuzzy control', IEEE International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG), Apr.2017.
- [11] A.Melero-Perez, W.Gao, J.J.Fernandez-Lozano, 'Fuzzy logic energy management strategy for fuel cell/ultracapacitor/battery hybrid vehicle with Multiple-Input DC/DC converter', IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Sep.2009.
- [12] S.Zhang, R.Xiong, F.Sun, 'Model predictive control for power management in a plug-in hybrid electric vehicle with a hybrid energy storage system', Applied Energy, 2017.

- [13] Z.Chen, R.Xiong, C.Wang, J.Cao, ‘An on-line predictive energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles to counter the uncertain prediction of the driving cycle’, *Applied Energy*, 2017.
- [14] Y.L.Murphey, J.Park, Z.Chen, M.L.Kuang, M.A.Masrur, A.M.Phillips ‘Intelligent Hybrid Vehicle Power Control—Part I: Machine Learning of Optimal Vehicle Power’, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Volume.61, Issue.8, Oct.2012.
- [15] Z.Chen, C.C.Mi, J.Xu, X.Gong, C.You, ‘Energy Management for a Power-Split Plug-in Hybrid Electric Vehicle Based on Dynamic Programming and Neural Networks’, *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Volume.63, Issue.4, May.2014.
- [16] N.Sulaiman, M.A.Hannan, A.Mohamed, E.H.Majlan, W.R.Wan Daud, ‘A review on energy management system for fuel cell hybrid electric vehicle: Issues and challenges’, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015.
- [17] H.Li, A.Ravey, A.N’Diaye, A.Djerdir, ‘A review of energy management strategy for fuel cell hybrid electric vehicle’, *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, Dec.2017.
- [18] Ali Castaings, ‘Gestion d’énergie de véhicules multi-sources électriques et hybrides au travers de la représentation énergétique macroscopique’, *Thèse de Doctorat de l’université de Lille I*, 2016.
- [19] Ministère de la transition écologique et solidaire, Commissariat général au développement durable, les comptes des transports en 2016, Tome 1, 54e rapport de la Commission des comptes des transports de la Nation, Juillet 2017.
- [20] Ministère de la transition écologique et solidaire, Commissariat général au développement durable, Chiffres clés du climat France, Europe et Monde, édition 2018.
- [21] Allegre Anne-Laure, ‘Méthodologies de modélisation et de gestion de l’énergie des systèmes de stockage mixtes pour véhicules électriques hybrides’, *Thèse de Doctorat de l’université de Lille I*, 2010.
- [22] Agence De l’Environnement et de la Maitrise de l’Energie (ADEME), Evolution du marché, caractéristiques environnementales et techniques véhicules particuliers neufs vendus en France, édition 2017.
- [23] Kraa Okba, ‘Control and Energy Management of an Electrical Vehicle’, *Thèse de Doctorat de l’université Mohamed Khider Biskra*, 2015.
- [24] Z.Q.Zhu, D.Howe, ‘Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles’, *Proceedings of the IEEE*, Volume.95, Issue.4, pp.746-765, Apr.2007.
- [25] Itani Khalid, ‘Récupération d’énergie pour système intégré moteur roue, application au véhicule électrique’, *Thèse de Doctorat de l’université de Paris-Saclay*, 2017.
- [26] J.G.Hayes, G.A.Goodarzi, ‘Electric Powertrain Energy Systems, Power Electronics and Drives for Hybrid, Electric and Fuel Cell Vehicles’, *Wiley*, 2018.

- [27] Espanet Christophe, 'Modélisation et conception optimale de moteurs sans balais à structure inversée, Application au moteur-roue', Thèse de Doctorat de l'université de Franche-Comté, 1999.
- [28] '<http://www.smartgrids-cre.fr/>', dernière consultation le 02/09/2019.
- [29] Devillers Nathalie, 'Caractérisation et modélisation de composants de stockage électrochimique et électrostatique', Thèse de Doctorat de l'Université de Franche Comté, 2012.
- [30] S.J.Moura, J.B.Siegel, D.J.Siegel, H.K.Fathy, A.G.Stefanopoulou, 'Education on Vehicle Electrification: Battery Systems, Fuel Cells, and Hydrogen', IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Sep.2010.
- [31] Mamadou Baïlo Camara, 'Supercondensateurs pour échange dynamique d'énergie à bord du véhicule électrique hybride : Modélisation, étude des convertisseurs et commande', Thèse de Doctorat de l'université de Franche Comté, 2007.
- [32] '<http://www.car-engineer.com/fr/les-differents-cycles-de-conduite/>', Dernière visite le 17 septembre 2019.
- [33] K.Bellache, M.B.Camara, B.Dakyo, 'Transient Power Control for Diesel generator assistance in Electric Boat Applications using Supercapacitors and Batteries', IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, Volume.6, Issue.1, pp.416-428, Mar.2018.
- [34] A.Tani, M.B.Camara, B.Dakyo, 'Energy Management Based on Frequency Approach for Hybrid Electric Vehicle Applications: Fuel-Cell/Lithium-Battery and Ultracapacitors', IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume.61, Issue.8, pp.3375-3386, Oct.2012.
- [35] M.A.Tankari, M.B.Camara, B.Dakyo, G.Lefebvre 'Use of Ultracapacitors and Batteries for Efficient Energy Management in Wind–Diesel Hybrid System', IEEE Transactions on Sustainable Energy, Volume.4, Issue.2, pp.414-424, Apr.2013.
- [36] Z.Zhou, M.B.Camara and B.Dakyo, 'Coordinated Power Control of Variable-Speed Diesel Generators and Lithium-Battery on a Hybrid Electric Boat', IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume.66, Issue.7, pp.5775-5784, Jul.2017.
- [37] Mahamadou Abdou Tankari, 'Système multi-sources de production d'énergie électrique : méthode de dimensionnement d'un système hybride et mise en œuvre expérimentale de l'optimisation de la gestion d'énergie', Thèse de Doctorat de l'université du Havre, 2010.
- [38] Abdallah Tani, 'Structures des convertisseurs modulaires associés aux technologies de stockage : Applications aux domaines résidentiels et véhicules électriques', Thèse de Doctorat de l'université du Havre, 2013.
- [39] Kousseila Bellache, 'Caractérisation Multi-physique des éléments de stockage électrochimique et électrostatique dédiés aux systèmes Multi sources - Approche systémique pour la gestion dynamique d'énergie électrique', Thèse de Doctorat de l'université du Havre, 2018.

- [40] A.Tani, M.B.Camara, B.Dakyo and Y.Azzouz, 'DC/DC and DC/AC Converters Control for Hybrid Electric Vehicles Energy Management-Ultracapacitors and Fuel Cell', IEEE Transactions on Industrial Informatics, Volume.9, Issue.2, pp.686-696, May.2013.
- [41] Ali Jaafar, 'Contribution à la modélisation, l'analyse et l'optimisation de lois de commande pour convertisseurs DC-DC de puissance', Thèse de Doctorat de Supélec, 2011.
- [42] Matheepot Phattanasak, 'Etude, modélisation et mise en œuvre de convertisseurs DC-DC isolés multiport et modulaires', Thèse de Doctorat de l'université de Lorraine, 2012.
- [43] Damien Guilbert, 'Tolérance aux défauts et optimisation des convertisseurs DC/DC pour véhicules électriques à pile à combustible', Thèse de Doctorat de l'université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2014.
- [44] Nicolas Videau, 'Convertisseurs continu-continu non isolés à haut rapport de conversion pour piles à combustible et électrolyseurs - apport des composants GAN', Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse, 2014.
- [45] Karuna Mudliyar, 'High frequency Inverter', Master thesis, Manipal Institute of Technology, 2013.
- [46] The Dung Nguyen, 'Etude de stratégies de modulation pour onduleur triphasé dédiées à la réduction des perturbations du bus continu en environnement embarqué', Thèse de Doctorat de l'université de Technologie de Compiègne, 2011.
- [47] Ismail Oukkacha, 'Contrôle des moteurs synchrones pour les applications mini-drones', Mémoire de projet de fin d'études, Université de Toulouse, 2015.
- [48] Mohamad Koteich, 'Commande vectorielle sensorless des moteurs brushless des mini-drones', Mémoire de projet de fin d'études, Supélec, 2012.
- [49] Sébastien Carriere, 'Synthèse croisée de régulateurs et d'observateurs pour le contrôle robuste de la machine synchrone', Thèse de Doctorat de l'université de Toulouse, 2010.
- [50] Flavia Khatounian 'Contribution à la modélisation, l'identification et à la commande d'une interface haptique a un degré de liberté entraînée par une machine synchrone a aimants permanents.', Thèse de Doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, 2006.
- [51] Amor Khalief, 'Contribution à la commande vectorielle sans capteur mécanique des machines synchrones à aimants permanents', Thèse de Doctorat de l'université d'Aix-Marseille, 2012.
- [52] Khedidja Kendouci, 'Contribution à la commande sans capteur mécanique d'une machine synchrone à aimants permanents', Thèse de Doctorat de l'université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, 2012.
- [53] Jawad Ahmed Farooq, 'Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents ', Thèse de Doctorat de l'université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2008.

- [54] Rachid Errouissi, 'Contribution à la commande prédictive non linéaire d'une machine synchrone à aimants permanents', Thèse de Doctorat de l'université de Québec à Chicoutimi, 2010.
- [55] Sylvain Baudoin, 'Etude d'un système hybride pile à combustible / micro-turbine dans un contexte micro-réseau rural isolé', Thèse de Doctorat préparée à l'université de Bordeaux et l'université du Pays Basque, 2015.
- [56] Yohann Chatillon, 'Méthodes électrochimiques pour la caractérisation des piles à combustible de type PEM en empilement', Thèse de Doctorat de l'université de Lorraine, 2013.
- [57] P.Menanteau, M.M.Quéméré, A.L.Duigou, S.L.Bastard, 'Une analyse économique de la production d'hydrogène à partir d'électricité éolienne pour des usages transport', Revue de l'Energie, 2010.
- [58] Emmanuel Frappé, 'Architecture de convertisseur statique tolérante aux pannes pour générateur pile à combustible modulaire de puissance-traction 30kW', Thèse de Doctorat de l'université de Pais Sud, 2012.
- [59] Théophile Hordé, 'Etude de systèmes pile à combustible hybridés embarqués pour l'aéronautique', Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2012.
- [60] Y-X.Wang, K.Ou, Y-B.Kim, 'Modeling and experimental validation of hybrid proton exchange membrane fuel cell/battery system for power management control', International Journal of Hydrogen Energy, Volume.40, Issue.35, pp.11713-11721, Sep.2015.
- [61] Clément Départure, 'Commande par inversion d'un véhicule à pile à combustible et supercondensateurs', Thèse de Doctorat préparée en cotutelle à l'université du Québec trois rivières et l'université de Lille I, 2017.
- [62] Alireza Payman, 'Contribution à la Gestion de l'Energie dans les Systèmes Hybrides Multi-sources Multi-charges', Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [63] Paul Kreczanik, 'Etude 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 de l'université Claude Bernard, 2011.
- [64] H.J.Bergveld, W.S.Kruijt and Peter H.L.Notten, 'Battery Management Systems: Design by Modelling', Springer, 2002.
- [65] Zoran Stević, 'New Generation of Electric Vehicles', InTech, 2012.
- [66] Guillaume Dillenseger, 'Caractérisation de nouveaux modes de maintien en charge pour batteries stationnaires de secours', Thèse de Doctorat de l'université de Montpellier II, 2004.

- [67] 'https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion', Dernière visite le 20 septembre 2019.
- [68] K.Bellache, M.B.Camara, B.Dakyo, 'Characterization and Electric Behavior Modeling of Lithium-Battery using Temporal Approach for Parameters Computing', International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Oct.2018.
- [69] An Li, 'Analyse expérimentale et modélisation d'éléments de batterie et de leurs assemblages : application aux véhicules électriques et hybrides', Thèse de Doctorat de l'université Claude Bernard-Lyon I, 2013.
- [70] L.Zhang, H.Peng, Z.Ning, Z.Mu, C.Sun, 'Comparative Research on RC Equivalent Circuit Models for Lithium-Ion Batteries of Electric Vehicles', Applied Sciences, Sep.2017.
- [71] Aurélien Lièvre, 'Développement d'un système de gestion de batterie lithium-ion à destination de véhicules « mild hybrid » Détermination des indicateurs d'état (SoC, SoH et SoF)', Thèse de Doctorat de l'université Claude Bernard-Lyon 1, 2015.
- [72] Y.Cao, R.C.Kroeze, P.T.Krein, 'Multi-timescale Parametric Electrical Battery Model for Use in Dynamic Electric Vehicle Simulations', IEEE Transactions on Transportation Electrification, Volume.2, Issue.4, pp.432-442, Dec.2016.
- [73] M.Einhorn, F.V.Conte, C.Kral, J.Fleig, 'Comparison, Selection, and Parameterization of Electrical Battery Models for Automotive Applications', IEEE Transactions on Power Electronics, Volume.28, Issue.3, pp.1429-1437, Mar.2013.
- [74] C.Zhang, K.Li, S.McLoone, Z.Yang, 'Battery Modeling Methods for Electric Vehicles - A Review', European Control Conference (ECC), Jun.2014.
- [75] C.Zhang, K.Li, J.Deng, S.Song, 'Improved Real-time State-of-Charge Estimation of LiFePO₄ Battery Based on a Novel Thermoelectric Model', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume.64, Issue.1, pp.654-663, Jan.2017.
- [76] S.Liu, J.Jiang, W.Shi, Z.Ma, L.Y.Wang, H.Guo, 'Butler-Volmer Equation Based Electrical Model for High-Power Lithium Titanate Batteries Used in Electric Vehicles', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume.62, Issue.12, pp.7557-7568, Dec.2015.
- [77] Guven Alcicek, 'Contribution à l'étude du vieillissement et à l'intégration des supercondensateurs dans une chaîne de propulsion électrique (CPE) haute tension pour des applications véhicule électrique', Thèse de Doctorat de l'université de Belfort Montbéliard, 2014.
- [78] I.Oukkacha, M.B.Camara and B.Dakyo, "Electric Vehicles Energy Management using Lithium-batteries and Ultracapacitors", IEEE International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Apr.2017.
- [79] K.Bellache, M.B.Camara, Z.Zhou, B.Dakyo, 'Energy Management in Hybrid Electric Boat Based on Frequency Distribution Approach - Using Diesel, Lithium-Battery and Supercapacitors', IEEE Vehicle Power and Propulsion (VPPC), Oct.2015.

- [80] M.A.Tankari, G.Lefebvre, K.Bellache, M.B.Camara, B.Dakyo, ‘Supercapacitor lifetime estimation based on Rainflow Cycle Counting Method’, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Oct.2015
- [81] L.Zubieta, R.Bonert, ‘Characterization of Double-Layer Capacitors for Power Electronics Applications’, IEEE Transactions on Industry Applications, Volume.36, Issue.1, pp.199-205, Jan/Feb.2000.
- [82] M.Andriollo, M.Caramanna, A.Tortella, ‘Equivalent Circuit Models for the Analysis of a Commercial Ultracapacitor Module’, International Annual Conference (AEIT), Oct.2016.
- [83] X.Chang, D.Lei, S.Zhang, S.Li, Y.Yang, ‘Novel Supercapacitor Model Parameter Identification Methods’, International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE), Sep.2017.
- [84] Y.Parvini, J.B.Siegel, A.G.Stefanopoulou, A.Vahidi, ‘Supercapacitor Electrical and Thermal Modeling, Identification, and Validation for a Wide Range of Temperature and Power Applications’, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume.63, Issue.3, pp.1574-1585, Mar.2016.
- [85] K.Bellache, M.B.Camara and B.Dakyo, ‘Supercapacitors Characterization and Modeling using combined electro-thermal stress approach’, IEEE Trans on Industry Applications, pp.1817-1827, Volume.55, Issue.2, Mar-Apr.2019.
- [86] Haroun Aouzellag, ‘Optimisation de la gestion énergétique des véhicules hybrides’, Thèse de Doctorat de l’université de Bejaia, 2017.
- [87] Technical specifications for the e-up Volkswagen electric car, 2017 model (<http://www.volkswagen.fr/fr/models/up/documentation.html>).
- [88] Datasheet Maxwell Technologies, K2 Ultracapacitors-2.7V Series, Document number: 1015370.5.
- [89] Jérôme Lachaize, ‘Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction’, Thèse de Doctorat de l’institut national polytechnique de Toulouse, 2004.
- [90] A.Formentini, A.Trentin, M.Marchesoni, P.Zanchetta, P.Wheeler, ‘Speed Finite Control Set Model Predictive Control of a PMSM Fed by Matrix Converter’, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume.62, Issue.11, pp.6786-6796, Nov.2015.
- [91] J.J.V.Sanjuan, J.L.Flores, E.Y.Mendoza, M.E.Tlaxcaltecatl, ‘A sensorless passivity-based control for PMSM’, IEEE International Conference on Electronics, Communications and Computers (CONIELECOMP), Feb.2018.
- [92] Samantha Lacroix, ‘Modélisation et commande d’une chaîne de conversion pour véhicule électrique intégrant la fonction de charge des batteries’, Thèse de Doctorat de l’université Paris Sud, 2013.

- [93] Mohamad Koteich, 'Comande Vectorielle Sensorless des Moteurs Brushless de Mini-Drones', Mémoire de Master, Supelec, 2012.
- [94] J.Liu, H.Li, Y.Deng, 'Torque Ripple Minimization of PMSM Based on Robust ILC Via Adaptive Sliding Mode Control', IEEE Transactions on Power Electronics, Volume.33, Issue.4, pp.3655-3671, Apr.2018.
- [95] Z.Haoyu, Y.Gang, Z.Lidan, M.Boshan, L.Dongdong, 'Sliding mode control based on six-phase PMSM speed control system', IEEE Industrial Electronics Society Conference (IECON), Nov.2017.
- [96] D.Faustner, W.Kemmettmüller, A.Kugi, 'Flatness-Based Torque Control of Saturated Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Machines', IEEE Transactions on Control Systems Technology, Volume.24, Issue.4, pp.1201-1213, Jul.2016.
- [97] A.Fezzani, S.Drid, A.Makouf, L.C.Alaoui, 'Speed sensorless flatness-based control of PMSM using a second order sliding mode observer', IEEE Ecological Vehicles and Renewable Energies Conference (EVER), Mar.2013.
- [98] Robin, M.P.R.Prasad, 'Current and speed control of a permanent magnet synchronous motor using PID and LQR', IEEE International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT), Jul.2017.
- [99] M.Brasel, 'A gain-scheduled multivariable LQR controller for permanent magnet synchronous motor', IEEE International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Sep.2014.
- [100] A.A.Ahmed, J-S.Kim, Y.Lee, 'Model predictive torque control of PMSM for EV drives: A comparative study of finite control set and predictive dead-beat control schemes', IEEE International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Dec.2016.
- [101] Z.Liu, J.Du, U.Stimming, Y.Wang, 'Adaptive passivity-based control for speed regulation of permanent magnet synchronous motor', IEEE International Conference on Industrial Electronics and Applications, Jul.2014.
- [102] C.Liu, W.Zhang, 'Adaptive backstepping speed control for IPMSM with uncertain parameters', IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), Jul.2017.
- [103] Y.Xu, Y.Fan, Y.Zhong, 'An improved Direct Torque Control method of PMSM based on backstepping control', International Power Electronics and Motion Control Conference, Jun.2012.
- [104] Mohamed Khanchoul, 'Contribution au développement de la partie électromécanique d'un compresseur pour climatisation de véhicule électrique', Thèse de Doctorat de l'université Paris Sud, 2012.
- [105] M.Khanchoul, M.Hilairret, 'Design and comparison of different RST controllers for PMSM control', IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Nov.2011.

- [106] S.Lacroix, M.Hilairret, E.Laboure, 'Design of a battery-charger controller for electric vehicle based on RST controller', IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Sep.2011.
- [107] S.Lacroix, M.Hilairret, E.Laboure, 'A high performance RST controller for on board battery charger', IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Nov.2011.
- [108] I.Oukkacha, C.T.Sarr M.B.Camara, B.Dakyo and J-Y.Parade, 'Energetic performances booster for Electric Vehicle Applications using Transient power control and Supercapacitors-Batteries/Fuel Cell', IEEE Transactions on Transportation Electrification (en cours d'évaluation).
- [109] I.Oukkacha, M.B.Camara and B.Dakyo, 'Energy Management in Electric Vehicle based on frequency sharing approach using Fuel cells, Lithium batteries and Supercapacitors', in proceedings of IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Oct.2018.
- [110] J.Snoussi, S.B.Elghali, M.Benbouzid and M.F.Mimouni, 'Optimal Sizing of Energy Storage Systems Using Frequency-Separation-Based Energy Management for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles', IEEE Transactions on Vehicular Technology, pp.9337-9346, Volume.67, Issue.10, Oct.2018.
- [111] Nissrine AbdAllah, 'Etude et développement d'un concept de locomotive hybride à chaîne de traction électrique autonome propre et durable', Thèse de Doctorat de l'université de technologie de Belfort Montbéliard, 2009.
- [112] GWL Power, Technical specification, Winston-LFP100AHA TALL Cell.
- [113] T.Azib, O.Bethoux, G.Remy, C.Marchand and E.Berthelot, 'An Innovative Control Strategy of a Single Converter for Hybrid Fuel Cell/Supercapacitor Power Source', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Volume.57, Issue.12, pp.4024-4031, Dec.2010.
- [114] G.L.Lopez, R.S.Rodriguez, V.M.Alvarado ,J.F.G.Aguilar, J.E.Mota, and C.Sandoval, "Hybrid PEMFC-supercapacitor system: Modeling and energy management in energetic macroscopic representation", Applied Energy, Volume.205, pp.1478-1494, Nov.2017.
- [115] Tedjani Mesbahi, '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 de l'école centrale de Lille, 2016.
- [116] J.Snoussi, S.B.Elghali, M.Benbouzid and M.F.Mimouni, 'Auto-Adaptive Filtering-Based Energy Management Strategy for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicles', Energies, 2018.
- [117] Adrian Florescu, 'Gestion optimisée des flux énergétiques dans le véhicule électrique', Thèse de Doctorat de l'université Grenoble Alpes, 2012.
- [118] A.Florescu, S.Bacha, I.Munteanu, A.I.Bratcu, A.Rumeau, 'Adaptive frequency-separation-based energy management system for electric vehicles', Journal of Power Sources, Volume.280, pp.410-421, Apr.2015.

- [119] Akram Eddahech, 'Modélisation du vieillissement et détermination de l'état de santé de batteries lithium-ion pour application véhicule électrique et hybride', Thèse de Doctorat de l'université Bordeaux, 2013.
- [120] Habib Al Jed, 'Influence de la recharge rapide sur les performances des accumulateurs lithium des véhicules électriques dans le cadre de l'utilisation postale', Thèse de Doctorat de l'université Bordeaux, 2014.
- [121] Nicolas Denis, 'Système de gestion d'énergie d'un véhicule électrique hybride rechargeable à trois roues', Thèse de Doctorat de l'université de Sherbrooke, 2014.
- [122] Messaoud Mohammedi, 'Gestion de l'énergie pour une chaîne multi-sources', Thèse de Doctorat de l'université Mohamed Khider-Biskra, 2016.
- [123] M.Zandi, A.Payman, J.P.Martin, S.Pierfederici, B.Davat, F.M.Tabar 'Energy Management of a Fuel Cell/Supercapacitor/Battery Power Source for Electric Vehicular Applications', IEEE Transactions on Vehicular Technology, Volume.60, Issue.2, pp.433-443, Feb.2011.
- [124] A.A.Ferreira, J.A.Pomilio, G.Spiazzi, L.A.Silva, 'Energy Management Fuzzy Logic Supervisory for Electric Vehicle Power Supplies System', IEEE Transactions on Power Electronics, Volume.23, Issue.1, pp.107-115, Jan.2008.
- [125] J.S.Martinez, J.Mulot, F.Harel, D.Hissel, M-C.Péra, R.I.John, M.Amiet, 'Experimental validation of a type-2 fuzzy logic controller for energy management in hybrid electrical vehicles', Engineering Applications of Artificial Intelligence, Volume.26, Issue.7, pp.1772-1779, Aug.2013.
- [126] V.Bobek, 'PMSM Electrical Parameters Measurement', Freescale Semiconductor Application Note, Document Number: AN4680, 2013.
- [127] M.Musak, M.Stulrajter, 'Novel methods for parameters investigation of pm synchronous motors', Acta Technica Corviniensis - Bulletin of engineering Tome IV, 2013.
- [128] R.Aissou, 'Techniques de commande d'une éolienne basée sur une machine synchrone à aimants permanents', Thèse de Doctorat de l'université de Bejaïa, 2017.