



1.3.2	Problématique de l'optimisation multiobjectif . . . . .	13
1.3.2.1	Limites de l'optimisation multiobjectif classique en gé- néral . . . . .	15
1.3.2.2	Recours à l'optimisation multiobjectif dans ce travail de recherche . . . . .	16
1.4	Objectif général . . . . .	17
1.5	Méthodologie . . . . .	17
1.6	Contributions escomptées et l'originalité du sujet . . . . .	20
1.6.1	Contributions escomptées . . . . .	21
1.6.1.1	Énoncé des contributions à atteindre . . . . .	21
1.6.1.2	Approches suggérées . . . . .	21
1.6.2	Originalité du sujet de recherche . . . . .	23
1.7	Structure de thèse . . . . .	24
<b>CHAPITRE 2 MODÉLISATION ET SIMULATION DU SYSTÈME À L'ÉTUDE</b>		<b>26</b>
2.1	Introduction . . . . .	26
2.2	Modèle dynamique du véhicule . . . . .	29
2.3	Composants électriques . . . . .	34
2.3.1	Modèle dynamique de la pile à combustible . . . . .	35
2.3.2	Modèle dynamique de la batterie . . . . .	39
2.3.3	Modèle dynamique du supercondensateur . . . . .	40
2.3.4	Topologies des convertisseurs statiques . . . . .	42
2.3.5	Convertisseur de freinage . . . . .	46
2.3.6	Machine électrique . . . . .	48
2.3.7	Onduleur de tension triphasé . . . . .	49
2.4	Partie de la gestion d'énergie . . . . .	52
2.5	Conclusion . . . . .	53
<b>CHAPITRE 3 STRATÉGIE DE GESTION D'ÉNERGIE À BASE DE RÈGLES</b>		<b>54</b>

3.1	Introduction . . . . .	55
3.2	État de l'art sur les stratégies de gestion à base de règles . . . . .	55
3.3	Formulation mathématique de la stratégie à base de règles proposée . . . . .	57
3.3.1	Présentation de la méthode . . . . .	57
3.3.2	Développement de la méthode . . . . .	59
3.3.3	Description du modèle de simulation . . . . .	62
3.4	Présentation des résultats de simulation . . . . .	65
3.4.1	Configuration PAC/B . . . . .	67
3.4.1.1	Résultats de simulation pour le parcours urbain <b>UDDS</b> . . . . .	67
3.4.1.2	Résultats de simulation pour le parcours autoroute <b>HW-FET</b> . . . . .	70
3.4.1.3	Analyse des résultats dans la configuration PAC/B . . . . .	74
3.4.2	Configuration PAC/SC . . . . .	75
3.4.2.1	Résultats de simulation pour le parcours urbain <b>UDDS</b> . . . . .	76
3.4.2.2	Résultats de simulation pour le parcours autoroute <b>HW-FET</b> . . . . .	81
3.4.2.3	Analyse des résultats obtenus dans la configuration PAC/SC . . . . .	83
3.5	Conclusion . . . . .	88
CHAPITRE 4 STRATÉGIE DE GESTION D'ÉNERGIE À BASE DE LA LOGIQUE FLOUE . . . . .		90
4.1	Introduction . . . . .	91
4.2	État de l'art sur la gestion d'énergie à base de la logique floue . . . . .	91
4.3	Fondements théoriques de la logique floue . . . . .	93
4.3.1	Appartenance d'un ensemble floue et un ensemble classique . . . . .	93
4.3.2	Fonction d'appartenance . . . . .	94
4.4	Stratégie de la gestion d'énergie proposée . . . . .	96
4.5	Validation de la stratégie sur trois configurations : PAC/B, PAC/SC et PAC/B/SC . . . . .	98

4.5.1	Configuration PAC/B et la configuration PAC/SC . . . . .	98
4.5.1.1	Régulation du courant au niveau du hacheur bidirectionnel . . . . .	98
4.5.1.2	Régulateur de la tension du bus CC . . . . .	100
4.5.2	Configuration PAC/B/SC . . . . .	100
4.6	Résultats de simulation obtenus . . . . .	102
4.6.1	Résultats de simulation des configurations PAC/B, PAC/SC et PAC/B/SC	102
4.6.1.1	Analyse des résultats obtenus . . . . .	108
4.6.2	Résultats de simulation de la configuration PAC/SC . . . . .	108
4.6.2.1	Cas du parcours urbain <b>UDDS</b> . . . . .	109
4.6.2.2	Cas du parcours autoroute <b>HWFET</b> . . . . .	112
4.6.2.3	Analyse des résultats obtenus . . . . .	114
4.7	Conclusion . . . . .	120

## CHAPITRE 5 OPTIMISATION LOCALE À BASE DE LA COMMANDE OPTI-

MALE . . . . .	122	
5.1	Introduction . . . . .	122
5.2	État de l'art . . . . .	123
5.3	Formulation mathématique . . . . .	125
5.3.1	Formulation du problème d'optimisation . . . . .	125
5.3.2	Principe de minimum de Pontryagin . . . . .	126
5.4	Formulation et résolution du problème de la commande optimale . . . . .	128
5.4.1	Formulation du problème de la commande optimale . . . . .	128
5.4.2	Résolution du problème de la commande optimale . . . . .	131
5.5	Résultats de simulation et discussion . . . . .	133
5.5.1	Cas du parcours urbain <b>UDDS</b> . . . . .	136
5.5.2	Cas du parcours autoroute <b>HWFET</b> . . . . .	144
5.5.3	Analyse des résultats obtenus . . . . .	145
5.6	Conclusion . . . . .	151

CHAPITRE 6	OPTIMISATION ÉNERGÉTIQUE BASÉE SUR LA CHAÎNE DE MARKOV ET LA COMMANDE OPTIMALE . . . . .	153
6.1	Introduction . . . . .	153
6.2	État de l'art . . . . .	154
6.3	Modèle de la chaîne de Markov . . . . .	156
6.4	Résultats de simulation et discussion . . . . .	160
6.5	Conclusion . . . . .	165
CHAPITRE 7	ÉTUDE COMPARATIVE DES RÉSULTATS AVEC DES RÉFÉRENCES . . . . .	167
7.1	Introduction . . . . .	168
7.2	Définition des critères de comparaison . . . . .	168
7.2.1	Parcours et conditions de roulage . . . . .	169
7.2.2	État de charge du supercondensateur . . . . .	173
7.2.3	Consommation de la pile à combustible . . . . .	173
7.2.4	Rendement de la pile à combustible . . . . .	174
7.2.5	Étude menant à la réalisation d'une stratégie proposée . . . . .	174
7.2.6	Temps de calcul . . . . .	174
7.2.7	Robustesse d'une stratégie . . . . .	175
7.3	Comparaison des stratégies proposées entre elles . . . . .	175
7.4	Synthèse de la comparaison . . . . .	176
7.4.1	Comportement du supercondensateur . . . . .	176
7.4.2	Comportement de la pile à combustible . . . . .	177
7.4.3	Temps de simulation . . . . .	178
7.5	Étude comparative . . . . .	178
7.6	Limites des solutions proposées . . . . .	181
7.7	Conclusion . . . . .	182
CHAPITRE 8	CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS . . . . .	183

8.1	Conclusion générale . . . . .	183
8.2	Contributions apportées . . . . .	186
8.3	Recommandations . . . . .	187
	RÉFÉRENCES . . . . .	188
	ANNEXE A : DURÉE DE VIE DES SOURCES D'ÉNERGIE . . . . .	200
A.1	Durée de vie de la pile à combustible . . . . .	200
A.2	Durée de vie du supercondensateur . . . . .	201
A.3	Durée de vie de la batterie . . . . .	202
	ANNEXE B : RAPPELS THÉORIQUES SUR L'OPTIMISATION MULTIOBJEC-	
	TIF . . . . .	205
B.1	Introduction . . . . .	205
B.2	Techniques de résolution classiques . . . . .	206
B.2.1	Méthode de pondération . . . . .	206
B.2.2	Méthode de compromis . . . . .	207
B.3	Méthode à base des algorithmes évolutionnaires . . . . .	208
B.4	Méthode floues . . . . .	209
B.5	Conclusion . . . . .	209
	ANNEXE C : MODÉLISATION DE LA BATTERIE . . . . .	211
C.1	Introduction . . . . .	211
C.2	État de l'art sur la modélisation de la batterie . . . . .	211
C.3	Modèle standard de la batterie . . . . .	213
C.4	Modèle proposé de la batterie . . . . .	214
C.5	Présentation et l'analyse des résultats de simulation . . . . .	218
C.5.1	Effet de la température . . . . .	218
C.5.2	Effet du courant de la charge . . . . .	223
C.5.3	Effet de la durée de vie . . . . .	224

C.6 Conclusion . . . . .	225
ANNEXE D : QUELQUES PRISES D'ÉCRAN DU SIMULATEUR UTILISÉ . . .	226
ANNEXE E : SUPERCONDENSATEUR . . . . .	232
ANNEXE F : MACHINE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS . . . . .	238
F.1 Modèle abc de la machine synchrone . . . . .	238
F.1.1 Flux statorique et rotorique . . . . .	238
F.1.2 Équation des tensions statoriques et rotoriques . . . . .	239
F.1.3 Matrice des inductances . . . . .	239
F.2 Transformation de Clarke . . . . .	240
F.3 Transformation de Park . . . . .	241
F.4 Expression du couple électromagnétique . . . . .	242
F.5 Équation mécanique . . . . .	242
ANNEXE G : RÉSUMÉ DES RÉFÉRENCES CHOISIES . . . . .	244
G.1 Référence 1 . . . . .	244
G.1.1 Présentation de l'article 1 . . . . .	244
G.1.2 Résultats obtenus dans la référence 1 . . . . .	245
7.1.2.1 Stratégie à base de règles . . . . .	245
7.1.2.2 Programmation dynamique . . . . .	247
7.1.2.3 Commande prédictive . . . . .	248
G.2 Référence 2 . . . . .	249
G.2.1 Présentation de l'article 2 . . . . .	249
G.2.2 Résultats obtenus dans la référence 2 . . . . .	250
G.3 Référence 3 . . . . .	251
G.3.1 Présentation de l'article 3 . . . . .	251
G.3.2 Résultats obtenus dans la référence 3 . . . . .	252
G.4 Référence 4 . . . . .	253

G.4.1	Présentation de l'article 4 . . . . .	253
G.4.2	Résultats obtenus dans la référence 4 . . . . .	254
G.5	Référence 5 . . . . .	256
G.5.1	Présentation de l'article 5 . . . . .	256
G.5.2	Résultats obtenus dans la référence 5 . . . . .	256
ANNEXE H : INFORMATIONS SUR LE MATÉRIEL UTILISÉ . . . . .		258
ANNEXE I : LISTE DE PUBLICATIONS . . . . .		259
ANNEXE J : PHOTOS UTILISÉES . . . . .		261

## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Différents types de véhicules hybrides . . . . .	3
Tableau 1.2	classification de l'optimisation multiobjectif par rapport à l'optimisation en temps réel (locale) et l'optimisation hors ligne(globale)	14
Tableau 2.1	Paramètres du véhicule . . . . .	33
Tableau 2.2	Paramètres de la pile à combustible . . . . .	37
Tableau 2.3	Paramètres de la machine électrique . . . . .	49
Tableau 4.1	Règles du contrôleur de logique floue . . . . .	97
Tableau 6.1	Séquences d'un parcours routier . . . . .	158
Tableau 6.2	Calcul du nombre d'occurrences . . . . .	158
Tableau 6.3	Consommation d'hydrogène . . . . .	165
Tableau 7.1	Comparaison de consommation d'hydrogène des quatre stratégies proposées dans ce travail de recherche . . . . .	170
Tableau 7.2	Étude comparative . . . . .	179

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Véhicule à pile à combustible et les différents dispositifs [1] . . .	4
Figure 1.2	Avantages et inconvénients des stratégies hors ligne et en temps réel existantes . . . . .	10
Figure 1.3	Principaux thèmes abordés . . . . .	13
Figure 1.4	Représentation schématique du système à l'étude . . . . .	18
Figure 1.5	Description schématique de la méthode d'optimisation proposée .	20
Figure 2.1	Schéma synoptique du système complet . . . . .	27
Figure 2.2	Schéma Simulink global du modèle dynamique du système [39] .	28
Figure 2.3	Modèle dynamique du véhicule sous SimDrive [39] . . . . .	29
Figure 2.4	Forces appliquées sur le véhicule en mouvement [39] . . . . .	30
Figure 2.5	Forces appliquées sur la roue en contact avec le sol et en mouve- ment [39] . . . . .	30
Figure 2.6	Modèle de simulation du véhicule . . . . .	32
Figure 2.7	Résultats de simulation du modèle du véhicule . . . . .	34
Figure 2.8	Modèle Simulink de la partie électrique . . . . .	35
Figure 2.9	Modèle de la pile à combustible disponible dans MATLAB/Simulink [39] . . . . .	37
Figure 2.10	Variation du courant de la pile à combustible en fonction de la puissance de sortie . . . . .	38
Figure 2.11	Consommation en oxygène et en hydrogène, la tension, le courant et le rendement de la pile à combustible . . . . .	39
Figure 2.12	Circuit équivalent d'un supercondensateur . . . . .	41
Figure 2.13	Courant et tension du supercondensateur [45] . . . . .	42
Figure 2.14	Hacheurs utilisées (a) Hacheur abaisseur et (b) Hacheur abais- seur/élevateur . . . . .	43
Figure 2.15	Modèle Simulink simplifié de l'interrupteur électronique [39] . .	44

Figure 2.16	Montages de deux hacheurs à deux quadrants [39] . . . . .	44
Figure 2.17	Résultats de simulation des deux modèles . . . . .	45
Figure 2.18	Convertisseur de freinage dynamique dynamique . . . . .	46
Figure 2.19	Modèle Simulink du convertisseur de freinage dynamique . . . . .	47
Figure 2.20	Modèle Simulink de la commande de l'interrupteur . . . . .	47
Figure 2.21	Modèle Simulink de la résistance variable . . . . .	48
Figure 2.22	Modèle Simulink de la machine électrique, de l'onduleur triphasé et de sa commande . . . . .	50
Figure 2.23	Modèle simplifié et modèle détaillé du motopropulseur [39] . . . . .	50
Figure 2.24	Résultats de simulation des deux modèles . . . . .	51
Figure 3.1	Différents modes de fonctionnement d'un véhicule hybride à pile à combustible . . . . .	58
Figure 3.2	Représentation schématique de l'algorithme à base de règles . . . . .	63
Figure 3.3	Modèle Simulink de l'algorithme à base de règles . . . . .	63
Figure 3.4	Blocs de calcul de la puissance de la batterie et la pile à com- bustible (a) Lors de l'accélération du véhicule, (b) Lors de la dé- célération ou freinage du véhicule et (c) Quand l'accélération du véhicule est nulle . . . . .	64
Figure 3.5	Blocs de calcul de la puissance de la batterie et la pile à combus- tible lors de l'accélération du véhicule (a) État de charge supérieur à $SOC_{max}$ , (b) État de charge inférieur à $SOC_{min}$ et (c) État de charge entre $SOC_{min} < SOC < SOC_{max}$ . . . . .	66
Figure 3.6	Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour le parcours <b>UDDS</b> avec la configuration PAC/B . . . . .	68
Figure 3.7	Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour $m_v =$ $1600 \text{ kg}$ et $V = 2 \times V_{ref}$ de la configuration PAC/B . . . . .	69
Figure 3.8	Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour $m_v =$ $2000 \text{ kg}$ et $V = 2 \times V_{ref}$ de la configuration PAC/B . . . . .	70

Figure 3.9	Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour $m_v = 1600 \text{ kg}$ et $V = V_{ref}$ dans le cas de la configuration PAC/B . . . . .	71
Figure 3.10	Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour $m_v = 2000 \text{ kg}$ et $V = V_{ref}$ de la configuration PAC/B . . . . .	72
Figure 3.11	Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour $m_v = 1600 \text{ kg}$ et $V = 2 \times V_{ref}$ de la configuration PAC/B . . . . .	73
Figure 3.12	Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour $m_v = 2000 \text{ kg}$ et $V = 2 \times V_{ref}$ de la configuration PAC/B . . . . .	74
Figure 3.13	Configuration PAC/SC et le bloc de la stratégie à base de règles . . . . .	75
Figure 3.14	Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour $m_v = 1625 \text{ kg}$ et $V = V_{ref}$ pour la configuration PAC/SC . . . . .	77
Figure 3.15	Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour $m_v = 2500 \text{ kg}$ et $V = V_{ref}$ pour la configuration PAC/SC . . . . .	78
Figure 3.16	Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour $m_v = 1625 \text{ kg}$ et $V = 2 \times V_{ref}$ pour la configuration PAC/SC . . . . .	79
Figure 3.17	Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour $m_v = 2500 \text{ kg}$ et $V = 2 \times V_{ref}$ pour la configuration PAC/SC . . . . .	80
Figure 3.18	Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour $m_v = 1625 \text{ kg}$ et $V = V_{ref}$ pour la configuration PAC/SC . . . . .	81
Figure 3.19	Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour $m_v = 1625 \text{ kg}$ et $V = 2 \times V_{ref}$ pour la configuration PAC/SC . . . . .	82
Figure 3.20	Agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère ou freine . . . . .	84
Figure 3.21	Agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère pour un parcours urbain avec $V = V_{ref}$ et une masse de (a) $m_v = 1625 \text{ kg}$ et (b) $m_v = 2500 \text{ kg}$ . . . . .	86

Figure 3.22	Agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère pour un parcours urbain avec $V = 2 \times V_{ref}$ et une masse de (a) $m_v = 1625 \text{ kg}$ et (b) $m_v = 2500 \text{ kg}$ . . . . .	87
Figure 4.1	Différence entre la théorie des ensembles classiques et la théorie des ensembles flous . . . . .	94
Figure 4.2	Fonction d'appartenance . . . . .	95
Figure 4.3	Différentes transitions de la fonction d'appartenance . . . . .	95
Figure 4.4	Fonctions d'appartenance de l'état de charge du supercondensateur	96
Figure 4.5	Augmentation de l'état de charge de la batterie pour un contrôleur standard . . . . .	97
Figure 4.6	Contrôleur à logique floue . . . . .	97
Figure 4.7	Fonctions d'appartenance du contrôleur à logique floue . . . . .	98
Figure 4.8	Configuration PAC/B ou PAC/SC avec un régulateur de courant au niveau du hacheur bidirectionnel . . . . .	99
Figure 4.9	Configuration PAC/B/SC avec un régulateur de courant au niveau du hacheur réversible . . . . .	101
Figure 4.10	Vitesse mesurée et la vitesse de référence du véhicule . . . . .	103
Figure 4.11	Puissances de la configuration FC/B . . . . .	104
Figure 4.12	État de charge de la batterie pour la configuration FC/B . . . . .	104
Figure 4.13	Puissances de la configuration FC/SC . . . . .	105
Figure 4.14	État de charge du supercondensateur pour la configuration FC/SC	105
Figure 4.15	Puissances pour la configuration FC/B/SC . . . . .	106
Figure 4.16	L'état de charge du supercondensateur et de la batterie pour la configuration FC/B/SC . . . . .	106
Figure 4.17	Tensions de la configuration FC/B . . . . .	107
Figure 4.18	Tensions de la configuration FC/SC . . . . .	107
Figure 4.19	Tensions de la configuration FC/B/SC . . . . .	107

Figure 4.20	Consommation de l'hydrogène pour les configurations PAC/B, PAC/SC et PAC/B/SC . . . . .	108
Figure 4.21	Résultat de la logique floue avec $m_v = 1625 \text{ kg}$ et $V = V_{ref}$ . . .	109
Figure 4.22	Résultats de simulation de la logique floue avec $m_v = 2500 \text{ kg}$ et $V = V_{ref}$ . . . . .	110
Figure 4.23	Résultat de simulation de la logique floue avec $m_v = 1625 \text{ kg}$ et $V = 2 \times V_{ref}$ . . . . .	112
Figure 4.24	Résultats de simulation de la logique floue avec $m_v = 2500 \text{ kg}$ et $V = 2 \times V_{ref}$ . . . . .	113
Figure 4.25	Résultats de simulation de la logique floue avec $m_v = 1625 \text{ kg}$ et $V = V_{ref}$ . . . . .	114
Figure 4.26	Résultats de simulation de la logique floue avec $m_v = 1625 \text{ kg}$ et $V = 2 \times V_{ref}$ . . . . .	115
Figure 4.27	Agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère et freine (a) $m_v = 1625 \text{ kg}$ , $V = V_{ref}$ et (b) $m_v = 2500 \text{ kg}$ , $V = 2 \times V_{ref}$ . . . . .	116
Figure 4.28	Agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère pour un parcours urbain de vitesse $V = V_{ref}$ et une masse de (a) $m_v = 1625 \text{ kg}$ et (b) $m_v = 2500 \text{ kg}$ . . . . .	118
Figure 4.29	Agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère pour un parcours urbain de vitesse $V = 2 \times V_{ref}$ et une masse de (a) $m_v = 1625 \text{ kg}$ et (b) $m_v = 2500 \text{ kg}$ . . . . .	119
Figure 5.1	Représentation schématique du contrôleur à base de la commande optimale . . . . .	133
Figure 5.2	Implémentation du contrôleur dans l'environnement Simulink . .	133

Figure 5.3	Configuration de la pile à combustible/Supercondensateur . . . .	135
Figure 5.4	Vitesses du véhicule avec : (a) $m_v = 1625 \text{ kg}$ et $V_{ref} = V_{UDDS}$ (b) $m_v = 2500 \text{ kg}$ et $V_{ref} = 2.V_{UDDS}$ . . . . .	136
Figure 5.5	Puissances du moteur, de la pile à combustible et du supercondensateur avec : (a) $m_v = 1625 \text{ kg}$ et $V_{ref} = V_{UDDS}$ (b) $m_v = 2500 \text{ kg}$ et $V_{ref} = 2 \times V_{UDDS}$ . . . . .	137
Figure 5.6	États de charge du supercondensateur avec : (a) $m_v = 1625 \text{ kg}$ and $V_{ref} = V_{UDDS}$ (b) $m_v = 2500 \text{ kg}$ and $V_{ref} = 2 \times V_{UDDS}$ . .	138
Figure 5.7	Fonction d'état adjoint avec (a) $m_v = 1625 \text{ kg}$ et $V_{ref} = V_{UDDS}$ (b) $m_v = 2500 \text{ kg}$ et $V_{ref} = 2 \times V_{UDDS}$ . . . . .	139
Figure 5.8	Courants du moteur, de la pile à combustible et du supercondensateur avec : (a) $m_v = 1625 \text{ kg}$ et $V_{ref} = V_{UDDS}$ (b) $m_v = 2500 \text{ kg}$ and $V_{ref} = 2 \times V_{UDDS}$ . . . . .	140
Figure 5.9	Tensions du moteur, de la pile à combustible et du supercondensateur avec : (a) $m_v = 1625 \text{ kg}$ and $V_{ref} = V_{UDDS}$ (b) $m_v = 2500 \text{ kg}$ and $V_{ref} = 2 \times V_{UDDS}$ . . . . .	141
Figure 5.10	Résultats de la commande optimale pour $m_v = 2500 \text{ kg}$ et $V = V_{ref}$	142
Figure 5.11	Résultats de la commande optimale pour $m_v = 1625 \text{ kg}$ et $V = 2 \times V_{ref}$ . . . . .	143
Figure 5.12	Résultat de la commande optimale pour $m_v = 1625 \text{ kg}$ et $V = V_{ref}$	144
Figure 5.13	Résultat de la commande optimale pour $m_v = 1625 \text{ kg}$ et $V = 2 \times V_{ref}$ . . . . .	146
Figure 5.14	Agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère et freine (a) $m_v = 1625 \text{ kg}$ , $V = V_{ref}$ et (b) $m_v = 2500 \text{ kg}$ , $V = 2 \times V_{ref}$ . . . . .	147

Figure 5.15	Agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère pour un parcours urbain de vitesse $V = V_{ref}$ et une masse de (a) $m_v = 1625 \text{ kg}$ et (b) $m_v = 2500 \text{ kg}$ . . . . .	149
Figure 5.16	Agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère pour un parcours urbain de vitesse $V = 2 \times V_{ref}$ et une masse de (a) $m_v = 1625 \text{ kg}$ et (b) $m_v = 2500 \text{ kg}$ . . . . .	150
Figure 6.1	Processus de Markov et l'interaction entre les états . . . . .	157
Figure 6.2	Présentation d'une chaîne de Markov à quatre états . . . . .	160
Figure 6.3	Système de gestion d'énergie à base d'une chaîne de Markov . . .	161
Figure 6.4	Modèle Simulink de la stratégie de gestion d'énergie proposée . .	162
Figure 6.5	Résultats de simulation avec et sans chaîne de Markov . . . . .	163
Figure 6.6	Agrandissement des résultats de simulation . . . . .	164
Figure C.1	Circuit équivalent simplifié d'une batterie . . . . .	214
Figure C.2	Effet de la température de la batterie lithium-ion sur $\alpha$ . . . . .	215
Figure C.3	Effet de la durée de vie de la batterie lithium-ion sur $\beta$ . . . . .	215
Figure C.4	Effet de la température sur la durée de vie de la batterie lithium-ion	215
Figure C.5	Bloc de calcul du cycle de vie de la batterie . . . . .	216
Figure C.6	Bloc de calcul de la capacité disponible de la batterie . . . . .	216
Figure C.7	Bloc de calcul de la température de la batterie . . . . .	217
Figure C.8	Nouveau modèle de la batterie . . . . .	217
Figure C.9	Schéma Simulink du deux modèles de la batterie (a) nouveau modèle (b) ancien modèle . . . . .	218
Figure C.10	Résultats du nouveau modèle dynamique et du modèle standard à $25 \text{ }^\circ\text{C}$ de la batterie à (a) $SOC_0 = 100\%$ et (b) $SOC_0 = 5\%$ . . .	219
Figure C.11	Résultats du nouveau modèle dynamique et du modèle standard à $25 \text{ }^\circ\text{C}$ et sur une période de $3600\text{s}$ . . . . .	220

Figure C.12	Résultats du nouveau modèle dynamique de la batterie et les résultats du modèle standard en mode (a) charge et (b) décharge . . .	221
Figure C.13	Résultats de simulation du nouveau modèle dynamique et du modèle standard durant 3600s (a) en mode charge et (b) en mode décharge . . . . .	222
Figure C.14	Effets sur le comportement de la batterie (a) effet du courant de la charge et (b) effet de la température . . . . .	223
Figure C.15	Effet du courant de la charge sur le comportement de la batterie en mode (a) charge et (b) décharge . . . . .	224
Figure C.16	Effet de la durée de vie de la batterie sur son fonctionnement en mode (a) charge et (b) décharge . . . . .	225
Figure D.1	Paramètres de la pile à combustible utilisée [39] . . . . .	226
Figure D.2	Bloc de calcul du couple moteur . . . . .	227
Figure D.3	Sous système de gestion d'énergie à base de règles . . . . .	228
Figure D.4	Sous système de gestion d'énergie avec un contrôleur à base de la logique floue . . . . .	229
Figure D.5	Sous système de gestion d'énergie avec un contrôleur à base de la commande optimale . . . . .	230
Figure D.6	Paramètres de la batterie utilisée [39] . . . . .	231
Figure G.1	Configuration du véhicule hybrid avec un supercondensateur [28]	244
Figure G.2	Puissance du moteur thermique et du moteur électrique pour un parcours urbain avec la stratégie à base de règles [28] . . . . .	246
Figure G.3	Vitesse du véhicule et l'état de charge du supercondensateur pour un parcours urbain avec la stratégie à base de règles [28] . . . . .	246
Figure G.4	État de charge du supercondensateur pour un parcours urbain avec la programmation dynamique [28] . . . . .	247
Figure G.5	Puissances du moteur thermique et du moteur électrique pour un parcours urbain avec la commande prédictive [28] . . . . .	248

Figure G.6	Vitesse du véhicule et l'état de charge du supercondensateur pour un parcours urbain avec la commande prédictive [28] . . . . .	249
Figure G.7	Configuration du véhicule à pile à combustible et à batterie [29] . .	250
Figure G.8	Comparaison de résultats de l'état de charge de la batterie entre les stratégies proposées [29] . . . . .	251
Figure G.9	Courbes de la puissance demandée, puissance de la pile à combustible et la puissance du supercondensateur [30] . . . . .	252
Figure G.10	Variation de l'état de charge du supercondensateur en fonction de la puissance demandée [30] . . . . .	253
Figure G.11	Configuration du véhicule à pile à combustible et batterie [31] . .	254
Figure G.12	Puissance de la batterie de la pile à combustible et l'État de charge de la batterie pour un parcours urbain [31] . . . . .	255
Figure G.13	Configuration d'un véhicule hybride avec batterie de stockage [33]	256
Figure G.14	Superposition de résultats obtenus par la programmation dynamique et la méthode proposée [33] . . . . .	257
Figure H.1	Informations à propos du matériel utilisé . . . . .	258

## LISTE DES ANNEXES

Annexe A	DURÉE DE VIE DES SOURCES D'ÉNERGIE ÉTUDIÉES . . .	200
Annexe B	RAPPELS THÉORIQUES SUR L'OPTIMISATION MULTIOB- JECTIF . . . . .	205
Annexe C	MODÉLISATION DE LA BATTERIE . . . . .	211
Annexe D	QUELQUES PRISES D'ÉCRAN DU SIMULATEUR UTILISÉ .	226
Annexe E	SUPERCONDENSATEUR . . . . .	232
Annexe F	MODÉLISATION DE LA MACHINE SYNCHRONE À AIMANTS PERMANENTS . . . . .	238
Annexe G	RÉSUMÉ DES RÉFÉRENCES CHOISIES . . . . .	244
Annexe H	INFORMATIONS SUR LE MATÉRIEL UTILISÉ . . . . .	258
Annexe I	LISTE DE PUBLICATIONS . . . . .	259
Annexe J	PHOTOS UTILISÉES . . . . .	261

## LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

<i>FC</i>	Pile à combustible
<i>B</i>	Batterie
<i>SC</i>	Supercondensateur
<i>ECMS</i>	Stratégie de minimisation de la consommation équivalente
<i>LMS</i>	Stratégie de minimisation des pertes
<i>RTCS</i>	La stratégie de la consommation en temps réel
<i>DP</i>	Programmation dynamique
<i>PMP</i>	Principe de Minimum de Pontryagin
<i>CLF</i>	Contrôleur de la logique floue
<i>BR</i>	Stratégie de gestion à base de règles
<i>LF</i>	Stratégie à base de la logique floue
<i>CO</i>	Stratégie à base de la commande optimale
<i>CMCO</i>	Stratégie à base de la chaîne de Markov et la commande optimale
<i>PEMFC</i>	Pile à combustible à membrane échangeuse de proton
<i>UDDS</i>	Dynamometer Driving Schedule
<i>HWFET</i>	The Highway Fuel Economy Driving Schedule
<i>PI</i>	Régulateur proportionnel-intégral
<i>J</i>	Fonction d'objectif
$m_v$	Masse du véhicule
<i>g</i>	Accélération gravitationnelle
$\alpha$	Angle d'inclinaison du véhicule
$F_d$	Force aérodynamique
$\rho$	Densité de l'air
$C_d$	Coefficient de pénétration de l'air

$A$	Surface frontale du véhicule en coupe frontale
$V_x$	Vitesse longitudinale du véhicule
$F_x$	Force de contact des roues avant et arrière du véhicule au sol
$O_2\%$	Pourcentage d'oxygène dans le combustible
$T$	Temperature
$P_{air}$	Pression d'alimentation absolue de l'air
$V_{lpm(air)}$	Débit d'air
$V_{lpm(fuel)}$	Débit d'écoulement du combustible
$H_2\%$	Pourcentage d'hydrogène dans le combustible
$P_{fuel}$	Pression absolue d'alimentation du carburant
$z$	Nombre d'électrons en mouvement
$U_{O_2}$	Débits d'oxygène
$U_{H_2}$	Débits d'hydrogène
$Q_{max}$	Capacité maximum
$V_0$	Tension constante
$A$	Tension exponentielle
$B$	Capacité exponentielle
$q$	Capacité disponible
$K$	Constante de polarisation
$V_{Bus}$	Tension au bornes du Bus CC
$P_{dem}$	Puissance demandée
$P_{dem.max}$	Puissance demandée
$P_{sec}$	Puissance de la source secondaire
$\overline{SOC}$	Moyenne de l'état de charge
$SOC_{sec}$	État de charge de la source secondaire
$i_{sec-ref}$	Courant de référence de la source secondaire

$SOC_{sec.min}$	État de charge de la source secondaire minimale
$SOC_{sec.max}$	État de charge de la source secondaire maximale
$V_{sec}$	Tension aux borne de la source secondaire
$P_{fc}$	Puissance de la pile à combustible
$P_{fc-ref}$	Puissance de référence de la pile à combustible
$P_{fc.CLF1}$	Puissance de pile à combustible obtenue à partir du premier contrôleur à logique floue
$P_{fc.CLF2}$	Puissance de pile à combustible obtenue à partir du deuxième contrôleur à logique floue
$P_{fc.min}$	Puissance de la pile à combustible minimale
$P_{fc.max}$	Puissance de la pile à combustible maximale
$V_{fc}$	Tension de la pile à combustible
$V_{cell}$	Tension d'une cellule de la pile à combustible
$N_{cell}$	Nombre de cellules de la pile à combustible
$P_B$	Puissance de la batterie
$P_{B-ref}$	Puissance de référence de la batterie
$i_{B-ref}$	Courant de référence de la batterie
$P_{B.min}$	Puissance de la batterie minimale
$P_{B.max}$	Puissance de la batterie maximale
$Q_{max}$	Capacité maximale de la batterie
$SOC_B$	État de charge de la batterie
$P_{sc}$	Puissance du supercondensateur
$P_{sc-ref}$	Puissance de référence du supercondensateur
$i_{sc-ref}$	Courant de référence du supercondensateur
$V_{sc}$	Tension du supercondensateur
$I_{sc}$	Courant du supercondensateur

$V_{max}$	Tension maximale du supercondensateur
$SOC_{sc}$	État de charge du supercondensateur
$N_p$	Connexion de plusieurs supercondensateurs en parallèle
$N_s$	Connexion de plusieurs supercondensateurs en série
$ESR_{sc}$	Résistance interne du supercondensateur
$C$	Capacité du supercondensateur
$SOE$	État d'énergie
$P_{H_2}(t)$	Puissance de l'hydrogène de la pile à combustible
$s(t)$	Facteur multiplicateur
$s_{dis}$	Constante de décharge
$s_{chg}$	Constante de charge
$p(t)$	Facteur de probabilité
$V_{ref}$	Vitesse de référence
$V_v$	Vitesse du véhicule
$LHV_{H_2}$	Faible valeur calorifique de l'hydrogène
$\dot{m}_{fc}$	Consommation instantanée de la pile à combustible
$\eta$	Rendement de la pile à combustible
$\bar{\eta}$	Rendement moyen de la pile à combustible
$\dot{m}_{sc}$	Consommation instantanée équivalente en hydrogène du supercondensateur
$t$	Temps
$t_i$ ou $t_0$	Temps initial
$t_f$	Temps final ou durée du parcours
$m_{S_i}$	Nombre total de transitions
$m_{(S_i, S_j)}$	Nombre d'occurrences d'une transition
$S$	État observé
$p$	Matrice de transition

$\mu_f$	Fonction d'appartenance du sous ensemble flou $f$
$\mu_f(X)$	Degré d'appartenance de l'élément $X$
$x(k)$	Vecteur d'état
$u(k)$	Vecteur de commande
$N$	Temps d'un cycle routier
$L$	Consommation instantanée
$H$	Hamiltonien
$\dot{\lambda}$	Fonction d'état adjoint
$\alpha$	Facteur de pondération

## CHAPITRE 1

### INTRODUCTION GÉNÉRALE

#### Sommaire

<b>1.1</b>	<b>Cadre général de la recherche</b>	<b>2</b>
<b>1.2</b>	<b>État de l'art</b>	<b>5</b>
1.2.1	Stratégies d'optimisation hors ligne	5
1.2.2	Stratégies de gestion d'énergie en temps réel	6
1.2.2.1	Stratégies de gestion d'énergie à base de règles	6
1.2.2.2	Stratégies de gestion d'énergie instantanées	7
1.2.2.3	Stratégies d'optimisation globale	8
1.2.2.4	Stratégies d'optimisation avec un algorithme de pré- diction	9
<b>1.3</b>	<b>Problématique</b>	<b>11</b>
1.3.1	Problématique de l'optimisation énergétique d'un véhicule à pile à combustible	11
1.3.2	Problématique de l'optimisation multiobjectif	13
1.3.2.1	Limites de l'optimisation multiobjectif classique en général	15
1.3.2.2	Recours à l'optimisation multiobjectif dans ce travail de recherche	16
<b>1.4</b>	<b>Objectif général</b>	<b>17</b>
<b>1.5</b>	<b>Méthodologie</b>	<b>17</b>
<b>1.6</b>	<b>Contributions escomptées et l'originalité du sujet</b>	<b>20</b>
1.6.1	Contributions escomptées	21
1.6.1.1	Énoncé des contributions à atteindre	21

1.6.1.2	Approches suggérées . . . . .	21
1.6.2	Originalité du sujet de recherche . . . . .	23
<b>1.7</b>	<b>Structure de thèse . . . . .</b>	<b>24</b>

Dans la quête d'un véhicule non polluant qui protège et préserve l'environnement, plusieurs projets portant sur la pile à combustible et son utilisation ont été amorcés ces dernières années. Certes, alimentée à partir de l'hydrogène produit à partir des sources d'énergie renouvelable, la pile à combustible n'émet aucune émission et peut offrir un bon rendement énergétique. Elle constitue ainsi une source d'énergie propre et durable qui permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre.

Bien que certains progrès ont été accomplis tant au niveau de la pile à combustible (sa construction, sa modélisation, sa caractérisation, etc.) qu'au niveau des convertisseurs statiques qui l'interfacent à la charge, la gestion et l'optimisation énergétique préoccupent encore plusieurs chercheurs et industriels. Toutefois, est-ce que toutes ces préoccupations et les problèmes qui y interviennent ont été suffisamment et adéquatement abordés pour que ce véhicule soit fiable et compétitif ?

## **1.1 Cadre général de la recherche**

La nécessité de minimiser les émissions nocives de  $CO_2$  et les gaz à effet de serre a mené, ces dernières années, à l'émergence des véhicules hybrides. Le tableau 1.1 montre les différents types de véhicules hybrides. On y trouve notamment les véhicules électriques à batterie, les véhicules hybrides thermiques et les véhicules hybrides à pile à combustible.

Tableau 1.1 Différents types de véhicules hybrides

Véhicule hybrides		
Véhicules électriques à batterie	Véhicules hybrides thermiques	Véhicules hybrides à pile à combustible
Nissan Leaf Mitsubishi iMiEV Kia : Soul EV Audi : E-Tron, A2 E-Tron, Urban Concept BMW : i3, i8, Mini E, Active E Toyota : EV-Racer, iQ EV ...	Audi : A3 e-Tron Chevrolet : Volt Cadillac : ELR Fisker : Karma, Atlantic Ford : C-Max Energi Mitsubishi : Outlander PHEV Opel : Ampera Porsche : Cayenne e-Hybrid Toyota : Prius plug'in Volvo : V60	Toyota Fuel Cell Vehicle BMW : i3 Hyundai : Tuscon, iX35 Mercedes : Ener-G-Force, NECAR et F-cell Nissan : Terra Concept Honda : FCX Clarity, CR-X Michelin : Hy-light, Hy-light2, F-City H2 Hummer : Hummer O2 Forde : Focus FCV

Dans ce travail de recherche, les véhicules hybrides à pile à combustible ont été retenus. Vu le comportement énergétique du véhicule et les caractéristiques de la pile, on doit combiner au moins deux sources d'énergie : une principale (ou primaire) et une autre auxiliaire (ou secondaire). La pile à combustible joue le rôle de la source primaire, alors que la source secondaire est un dispositif de stockage d'énergie comme les batteries de traction ou les supercondensateurs. La figure 1.1 montre un véhicule à pile à combustible et les différents dispositifs.

Dans ce type de véhicule, la source secondaire joue plusieurs rôles. En effet, lors des accélérations, elle apporte un supplément de puissance à la source primaire, et au moment des freinages et des descentes répétitifs, elle permet, en tant que source réversible, de récupérer la puissance et réduire en conséquence les pertes.

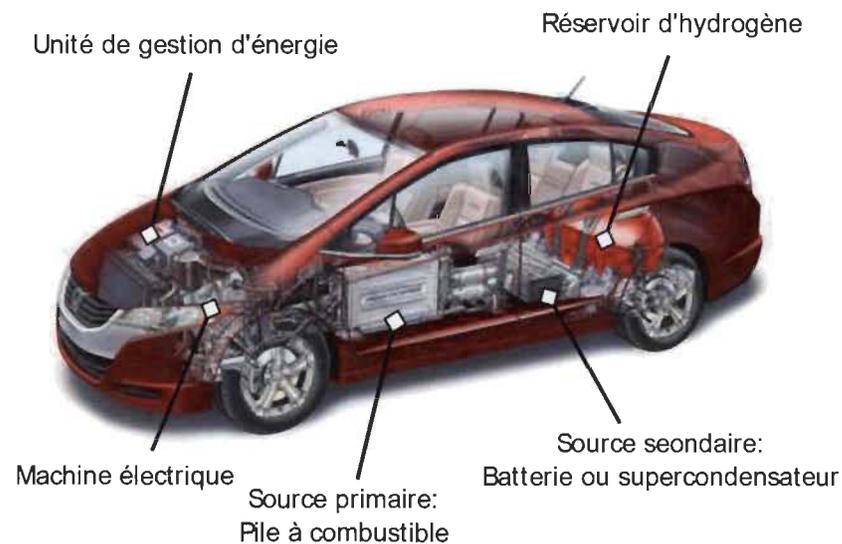


Figure 1.1 Véhicule à pile à combustible et les différents dispositifs [1]

Toutefois, la combinaison de ces deux sources nécessite, d'une part, une topologie de convertisseurs statiques inhérents, et d'autre part, l'adoption d'une optimisation énergétique adéquate pour assurer, entre autres, la répartition appropriée de l'énergie entre ces sources et la charge (la machine de traction). C'est pourquoi, plusieurs techniques d'optimisation énergétique ont émergé récemment. Elles peuvent être subdivisées en deux groupes :

**Le premier groupe** concerne l'optimisation hors ligne ou dite globale. Elle consiste à calculer et imposer la consommation minimale d'hydrogène. Dans ce cas, la connaissance précise du parcours et des conditions de roulage est absolument nécessaire.

**Le deuxième groupe** concerne l'optimisation en temps réel ou dite locale. Elle tente de minimiser la consommation de la pile à combustible pendant son fonctionnement et répartir adéquatement la puissance disponible. Dans cette approche, le parcours et les conditions de roulage futures sont généralement inconnus et l'état de charge de la source secondaire doit être maintenu borné pour garantir une longue durée de vie.

Ce travail de recherche se limite au deuxième groupe qui correspond à l'optimisation en temps réel. Une stratégie sera proposée, développée et appliquée sur un véhicule hybride à pile à combustible et supercondensateur. Les parcours et les conditions de roulage sont tous les deux inconnus. En plus, la masse du véhicule et la vitesse du parcours seront considérés variables.

## 1.2 État de l'art

Comme mentionné plus haut, les stratégies de gestion et d'optimisation énergétique peuvent être classifiées en deux catégories : les stratégies d'optimisation hors ligne et les stratégies de gestion énergétique en temps réel. Celles de la première catégorie sont aussi appelées stratégies d'optimisation globales. La plus connue est celle basée sur la programmation dynamique. Les stratégies de la deuxième catégorie comptent plusieurs méthodes telles que les stratégies à base de règles, les stratégies de gestion instantanées et les stratégies d'optimisation locale.

### 1.2.1 Stratégies d'optimisation hors ligne

Les stratégies d'optimisation hors ligne sont fondées sur une connaissance a priori des conditions de roulage et des cycles de conduite préétablis. Les algorithmes issus de ces stratégies permettent d'améliorer les performances du système en minimisant à la fois la consommation de l'hydrogène, et en maintenant borné l'état de charge de la source secondaire. Ces stratégies ont un important avantage. Elles permettent d'évaluer la qualité des stratégies de gestion en temps réel, puisqu'elles déterminent le minimum de consommation théorique atteignable en temps réel [2].

Plusieurs algorithmes d'optimisation hors ligne ou dites algorithmes d'optimisation globale ont été envisagés [3], [4], [5]. Par exemple, les algorithmes issus de la commande

optimale permettent d'obtenir des solutions optimales. L'intérêt de la commande optimale est qu'elle permet de diminuer le temps de calcul, d'améliorer la qualité de la solution obtenue et elle peut être appliquée en temps réel. Cependant, pour cette méthode, la connaissance du parcours et des conditions de roulage est essentielle pour déduire le vecteur d'état adjoint. La programmation dynamique [6] et la programmation dynamique stochastique [7] font partie de cette classe. Elles ont comme principal inconvénient le temps de calcul prohibitif nécessaire pour obtenir une solution à la fonction objectif. Pour contourner ce problème, on utilise ces méthodes uniquement dans des parcours routiers courts. Donc l'utilisation des stratégies d'optimisation globale en temps réel reste complexe.

### **1.2.2 Stratégies de gestion d'énergie en temps réel**

Ces dernières années, de nombreux travaux de recherche s'intéressent à la synthèse des stratégies de gestion d'énergie en temps réel. L'objectif principal de ces stratégies est de résoudre le problème d'optimisation en temps réel quel que soit le type du parcours routier. Toutefois, les stratégies proposées n'offrent, jusqu'à présent, que des solutions sous optimales du problème. Parmi les approches de gestion d'énergie en temps réel les plus connues, on cite :

- les stratégies de gestion d'énergie à base de règles ;
- les stratégies de gestion d'énergie instantanées ;
- les stratégies d'optimisation globale ;
- les stratégies d'optimisation avec un algorithme de prédiction.

#### **1.2.2.1 Stratégies de gestion d'énergie à base de règles**

Ces stratégies de gestion énergétique consistent à gérer un ensemble de règles. Une étude de rendement des composants énergétiques et l'expérience acquise sur les éléments de la chaîne de traction conduisent à définir et à générer ces règles. Ces dernières peuvent

être exploitées avec un simple algorithme implémenté directement dans le système de gestion. Elles sont généralement utilisées par la logique floue (Fuzzy Logic). Il a été démontré que cette dernière stratégie est robuste [8], [9], et elle permet une gestion énergétique de tous les composants du système. Elle apporte aussi une solution rapide et exploitable en temps réel [4]. Un contrôleur à base de règles peut aussi garantir la gestion d'au moins deux objectifs [10]. L'inconvénient de cette stratégie réside dans la détermination de ces règles d'une façon empirique [11][12]. Pour remédier à ce réglage empirique, une stratégie basée sur les algorithmes génétiques a été proposée dans les références [13][14][15].

### 1.2.2.2 Stratégies de gestion d'énergie instantanées

Les stratégies de gestion d'énergie instantanées consistent à analyser les comportements des flux énergétiques existants. Parmi ces stratégies, on y trouve trois méthodes répondues LMS<sup>1</sup>, ECMS<sup>2</sup> et RTCS<sup>3</sup>.

D'abord, la méthode LMS [4] est basée sur la minimisation instantanée de la somme globale des pertes dans le groupe motopropulseur. Ensuite, la méthode ECMS, fréquemment utilisée, vise à minimiser la consommation équivalente du carburant [4]. Ses avantages sont la robustesse et la meilleure économie d'hydrogène. Son inconvénient majeur réside dans le choix des hypothèses à poser sur les points de fonctionnement futurs pour calculer la consommation équivalente. Dans la référence [16], on a proposé une stratégie ECMS adaptative utilisant un système GPS<sup>4</sup>. Plusieurs travaux de comparaison ont été effectuée entre cette méthode et la programmation dynamique (DP). Les résultats obtenus sont presque identiques surtout dans les parcours urbains et semi-urbains. Dans la référence [17], la stratégie ECMS a été développée afin de déterminer en temps réel la distribution optimale de la puissance. Elle ne nécessite aucune procédure de réglage. Dans

---

1. Loss Minimization Strategy
2. Equivalent Consumption Minimization Strategy
3. Real Time Consumption Strategy
4. Global Positioning System

la référence [18], une autre méthode ECMS a été proposée. Elle n'exige pas le recours à l'optimisation hors ligne, mais la distance du trajet à parcourir est requise. Pour faire l'optimisation des performances du système, une autre stratégie ECMS a été développée avec une nouvelle approche pour recharger les batteries afin de déterminer en temps réel la distribution optimale de la puissance [19]. Enfin, la stratégie RTCS a été proposée dans [20]. Elle optimise les émissions d'énergie. Les critères d'optimisation de cette stratégie ont été déterminés par des paramètres définis par l'utilisateur.

### 1.2.2.3 Stratégies d'optimisation globale

Dans plusieurs travaux de recherche, on a utilisé la théorie de la commande optimale basée sur le formalisme de Lagrange, et l'optimisation globale [3],[4],[5] pour effectuer l'optimisation énergétique en temps réel de véhicules hybrides.

L'avantage de cette méthode est qu'elle permet d'obtenir une optimisation optimale hors ligne, et on n'a besoin d'identifier qu'un seul paramètre ; à savoir le multiplicateur de Lagrange ( $\lambda$ ). Ce multiplicateur est calculé pour atteindre une valeur spécifique de l'état de charge (*SOC*) du dispositif de stockage, et aborder la valeur finale pour un cycle routier donné. Par contre, sa limitation se manifeste lors de son utilisation en temps réel. L'algorithme issu de cette stratégie a été implémenté dans le système de gestion d'énergie en boucle ouverte. Puisque la valeur du multiplicateur de Lagrange est fortement dépendante des conditions de conduite, cela a mené à un état de charge du dispositif de stockage incontrôlé, par conséquent il est souvent non borné. Pour contourner ce problème, des modifications ont été proposées dans la référence [21]. Dans ce travail, un algorithme issu de la commande optimale a été implémenté en boucle fermée et le multiplicateur de Lagrange a été estimé en temps réel. Ces modifications ont permis de gérer l'état de charge de la batterie et le maintenir borné, et d'économiser la consommation du carburant. Toutefois, la connaissance des conditions de roulage et de l'état de charge actuel de la batterie

sont nécessaires pour l'estimation du multiplicateur de Lagrange.

Dans la référence [22], une étude de la commande optimale basée sur le principe de minimum classique a été réalisée en mode hors ligne. Les résultats de cette étude ont été exploités et sont appliqués en temps réel. Le paramètre de Lagrange a été adapté grâce à un simple algorithme de prédiction, mais cela n'a pas garanti une optimisation adéquate.

Rappelant que la stratégie d'optimisation globale hors ligne permet d'en déduire la stratégie de gestion applicable en temps réel. Dans la référence [4], les méthodes dites directes utilisent l'algorithme Formalisme de Lagrange (FL). Cet algorithme consiste à réguler en temps réel le paramètre de Lagrange  $\lambda$  pour maintenir borné l'état de charge de la batterie. Dans la référence [3], il a été proposé d'adapter le paramètre  $\lambda$  en temps réel. Les conditions de roulage passées du véhicule enregistrées au fur et à mesure sont requises pour adapter ce paramètre. Ainsi, l'état de charge du dispositif de stockage est régulé et maintenu borné.

#### **1.2.2.4 Stratégies d'optimisation avec un algorithme de prédiction**

Dans la référence [23], les auteurs ont proposé une approche de gestion de l'énergie avec un algorithme de prédiction. Elle a été employée dans les véhicules à pile à combustible et batterie. Elle a été validée à l'aide d'un simulateur de véhicules électriques développé dans l'environnement Matlab/Simulink. Elle a permis de déterminer la puissance nette demandée en utilisant un parcours routier a priori connu. L'énergie demandée par la charge est obtenue à partir de la puissance nette de la pile à combustible quand elle fonctionne à son rendement maximal. Cette méthode a montré une amélioration significative du rendement du système et une prédiction assez précise de la consommation de l'hydrogène.

Dans la référence [24], une approche basée sur la commande prédictive a été proposée.

On y a utilisé les informations du système de transport pour réduire la consommation de l'hydrogène. Cette approche se caractérise par une structure simple et un temps de calcul réduit ; ce qui favorise son utilisation en temps réel. Elle permet une économie de la consommation de l'hydrogène comparable à celle des stratégies ECMS et A-ECMS<sup>5</sup>.

D'un autre côté, d'autres méthodes basées sur la programmation dynamique stochastique ont été proposées dans les références [7] [25] [26] [27]. On leur a associé les chaînes de Markov pour prédire les conditions de roulage futures. Les réseaux de neurones ont été utilisés pour leur grande capacité d'extrapolation et pour leur capacité de mener à une réduction de la consommation d'énergie. Par contre, ils exigent une base de données de grande capacité et un processus d'apprentissage complexe.

Dans cette section, les stratégies de gestion et d'optimisation énergétique d'un véhicule hybride ont été présentées et classées. La figure 1.2 résume les avantages et les inconvénients des stratégies hors ligne et en temps réel existantes. La stratégie qui devrait être utilisée dans ce travail de recherche doit tenir compte des avantages et des inconvénients de chacune des stratégies selon les résultats des travaux de recherche déjà existants.

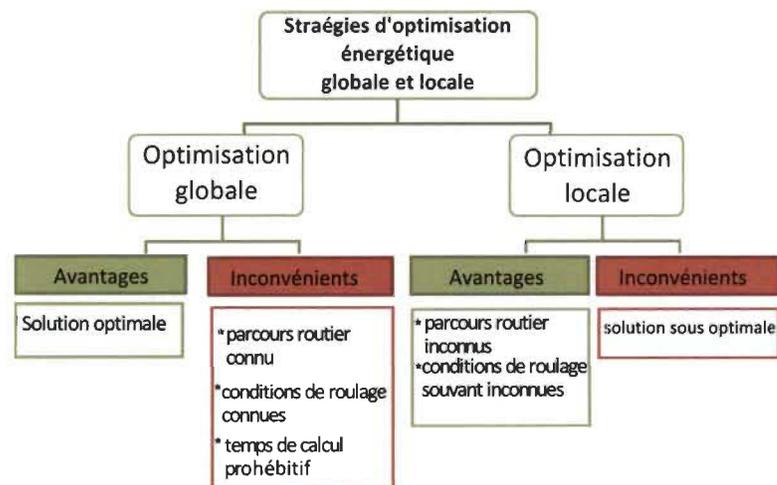


Figure 1.2 Avantages et inconvénients des stratégies hors ligne et en temps réel existantes

5. Adaptive Equivalent Minimisation Consumption Strategy

### 1.3 Problématique

Tel que mentionné dans l'état de l'art, l'optimisation énergétique d'un véhicule hybride à pile à combustible épaulée par un dispositif de stockage (supercondensateurs, batteries) représente toujours une préoccupation et un défi pour plusieurs chercheurs. En effet, il faut quels que soient le parcours suivi, les conditions de roulage, la vitesse et la masse du véhicule :

- ✓ répartir convenablement la puissance exigée par la charge entre les sources afin de minimiser la consommation d'hydrogène et garder borné l'état de charge de la source auxiliaire,
- ✓ augmenter les durées de vie des composants du véhicule et surtout celles de la pile à combustible et de la source secondaire qui représentent les deux éléments les plus coûteux
- ✓ réduire le temps d'exécution de la stratégie de gestion retenue.

#### 1.3.1 Problématique de l'optimisation énergétique d'un véhicule à pile à combustible

D'après l'état de connaissances, plusieurs stratégies d'optimisation énergétique ont été proposées afin d'assurer le partage de la puissance disponible entre les sources d'énergie et la charge. Comme il a été mentionné précédemment, on y trouve les stratégies d'optimisation hors ligne et l'optimisation en temps réel.

Dans les stratégies d'optimisation globale ou hors ligne, une meilleure stratégie pour un parcours et conditions de roulage connus est recherchée. La solution optimale du problème d'optimisation supposé bien formulé est calculée hors ligne. L'optimum est atteint en s'appuyant sur des données exhaustives du parcours routier et des conditions de roulage. Toutefois, ces méthodes d'optimisation sont confrontées à des problèmes souvent

difficiles empêchant leur concrétisation en temps réel et limitant leur utilisation dans des parcours a priori inconnus. Parmi ces problèmes, on peut citer :

- ✓ la connaissance du parcours et des conditions de roulage est nécessaire voir exigée,
- ✓ la recherche et le calcul menant à la solution globale sont souvent difficiles à cause de la non linéarité du problème d'optimisation et les contraintes propres au système,
- ✓ le temps prohibitif de calcul et de traitement,
- ✓ leur implementation nécessite une réorganisation des résultats afin qu'ils soient adaptables en temps réel.

Les stratégies d'optimisation en temps réel sont directement applicables en ligne dans le véhicule. Lors du traitement, on doit tenir compte à la fois du type des spécificités du parcours et des conditions futures de roulage souvent les deux sont inconnus. Ce qui exige un calcul très rapide et complexe. Par ailleurs, on constate que ces stratégies mènent souvent à des solutions sous optimales et locales qui ne garantissent pas une solution optimale sur l'ensemble du parcours.

De plus, les stratégies d'optimisation en temps réel explorées dépendent de certains paramètres et des facteurs liés au point de fonctionnement futur du véhicule. Elles nécessitent aussi une étude d'optimisation hors ligne en utilisant divers algorithmes comme le principe du minimum de Pontryagin ou la programmation dynamique. Ce groupe nécessite également une connaissance du parcours et une importante base de données pour stocker les résultats. De leur côté, les autres stratégies comme celles basées sur les réseaux neurones ou les algorithmes génétiques semblent donner de bons résultats, cependant, elles dépendent, elles aussi, des données enregistrées dans des bases de données de grande capacité et des études approfondies effectuées en mode hors ligne. La figure 1.3 résume les principaux thèmes qui seront abordés dans ce travail de recherche.

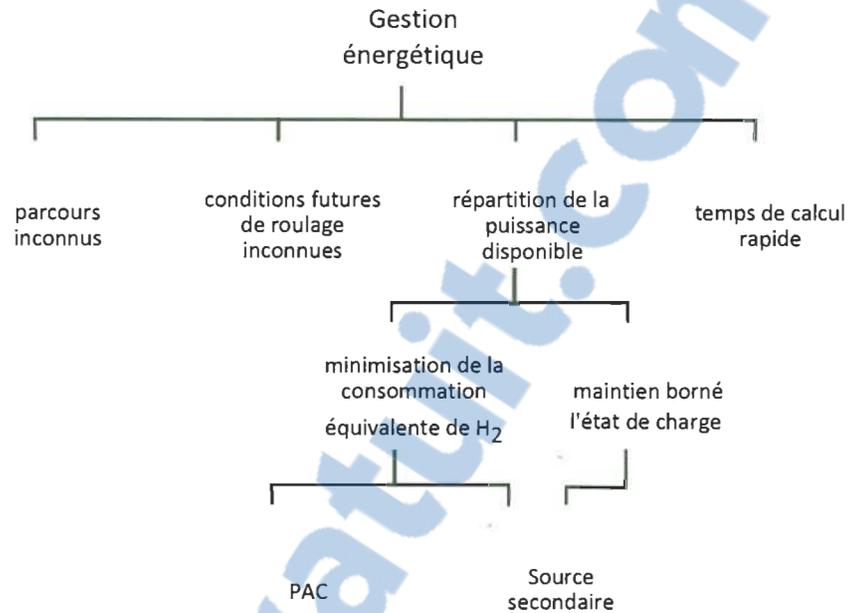


Figure 1.3 Principaux thèmes abordés

### 1.3.2 Problématique de l'optimisation multiobjectif

L'optimisation multiobjectif regroupe plusieurs objectifs à atteindre pour qu'un système soit performant. Dans notre cas, on a fixé deux objectifs à atteindre. Ces deux objectifs visent à minimiser la consommation équivalente d'hydrogène de source d'énergie principale et à améliorer la durée de vie de la source secondaire. Le deuxième objectif pourrait être atteint en maintenant borné l'état de charge de la source secondaire (voir l'annexe A pour la justification).

Le tableau 1.2 donne une classification de l'optimisation multiobjectif par rapport à l'optimisation en temps réel et l'optimisation hors ligne.

Tableau 1.2 – classification de l'optimisation multiobjectif par rapport à l'optimisation en temps réel (locale) et l'optimisation hors ligne(globale)

Stratégies à base	Optimisation locale	Optimisation globale	Optimisation multiobjectif	Exemple de références
de règles déterministes	oui	peut être déterminée hors ligne	oui	[10], [28]
de la logique floue	oui	peut être déterminée hors ligne	oui	[8], [9], [29]
de la commande prédictive	oui	-	-	[28]
des méthodes multiobjectifs classiques	non	oui	oui	-
des algorithmes génétiques	peut être appliquée en ligne	oui	oui	[13], [15]
de réseaux neurones	peut être appliquée en ligne	oui	oui	[30]
de la commande optimale	peut être appliquée en ligne	oui	-	[31], [32]
de la programmation dynamique	-	oui	-	[28], [33]

de la programmation dynamique stochastique	-	oui	-	[7], [26]
de la programmation dynamique déterministe	-	oui	-	[33]

### 1.3.2.1 Limites de l'optimisation multiobjectif classique en général

Les méthodes de résolution d'un problème d'optimisation multiobjectif sont nombreuses. La référence [34] en présente plusieurs. Comme son nom l'indique, le problème est formulé comme une fonction qui regroupe plusieurs objectifs à atteindre. Ces méthodes sont appelées optimisation multiobjectif classique. L'annexe B résume la théorie de ces méthodes. La plus connue d'entre elles est la méthode de pondération des fonctions objectives. Dans cette méthode, le problème est modélisé en une seule équation regroupant tous les objectifs à atteindre. Chaque objectif est multiplié par un coefficient de pondération. La résolution de cette équation soulève le problème de ces coefficients de pondération. Sachant la nature et les conditions de roulage variables durant le fonctionnement du système, alors déterminer ces coefficients reste difficile voir impossible.

Pour contourner cette problématique, une autre méthode appelée méthode de compromis est adoptée. Elle permet de choisir un seul objectif majeur à optimiser et de transformer les autres objectifs en contraintes d'inégalité. Cependant, la connaissance des paramètres du système est essentielle et une étude hors ligne est souvent requise.

Dans les méthodes classiques d'optimisation multiobjectif, le fait de passer par une étude hors ligne rend leur utilisation dans ce travail de recherche non appropriée voir indésirable. Dans ce cas, le coût sera très élevé pour la recherche de la solution au problème

d'optimisation en passant par de nombreuses évaluations de la fonction objectif.

### **1.3.2.2 Recours à l'optimisation multiobjectif dans ce travail de recherche**

Dans ce travail de recherche, le problème d'optimisation est bi-objectif. En effet, seulement deux objectifs seront considérés : minimiser la consommation de l'hydrogène de la source principale et améliorer la durée de vie de la source secondaire en maintenant borné son l'état de charge. On considère le cas où, le parcours routier et les conditions de roulage au présent et au futur sont supposés inconnus.

Intégré ces deux objectifs dans un même problème d'optimisation multiobjectif classique est possible. Toutefois, une étude hors ligne est nécessaire pour calculer certains paramètres liés à la stratégie d'optimisation multiobjectif retenue.

Dans ce travail de recherche, le coût lié à une stratégie d'optimisation est pris en compte et doit être au minimum possible. Le choix portera sur une stratégie applicable en temps réel et sans recours à une étude hors ligne pour minimiser le coût lié au calcul de la solution et son adaptation en temps réel. La stratégie proposée doit aussi s'adapter à n'importe quel parcours routier avec des conditions de roulages futures inconnues. L'utilisation de l'une des méthodes d'optimisation multiobjectif classique qui nécessite des paramètres pré-calculés est donc à écarter.

On propose dans ce travail de recherche de résoudre ce problème d'optimisation à deux objectifs avec l'une des stratégies d'optimisation monoobjectif. Dans ce cas, la fonction objectif sera de minimiser la consommation équivalente de la source d'énergie principale du véhicule. Le deuxième objectif sera formulé comme une contrainte et qui s'ajoute aux autres contraintes quels que soient les conditions de roulage et le parcours routier suivi.

Dans ce cas, la solution optimale de ce problème sera de chercher la meilleure répartition de la puissance demandée entre les deux sources avec le moins d'hydrogène consommé tout en respectant les contraintes les plus prépondérantes du système. Ces contraintes servent entre autres à maintenir borné l'état de charge de la source secondaire, pour garder la puissance de la source primaire et la puissance de la source secondaire dans les zones de fonctionnement adéquates (encadrées entre les valeurs maximales et les valeurs minimales).

#### **1.4 Objectif général**

L'objectif général de ce travail de recherche consiste à élaborer une nouvelle stratégie d'optimisation énergétique à deux objectifs en temps réel pour un véhicule hybride à pile à combustible. Cette stratégie d'optimisation devrait :

- ✓ s'adapter à n'importe quel type de parcours routier ainsi qu'aux conditions de conduite inconnues,
- ✓ réduire la consommation de l'hydrogène pendant le fonctionnement du véhicule et assurer une meilleure distribution d'énergie entre les sources et la charge,
- ✓ améliorer l'autonomie et la durée de vie des sources d'énergie utilisées dans le véhicule.

#### **1.5 Méthodologie**

La stratégie d'optimisation énergétique en temps réel sera implémentée dans un véhicule hybride à pile à combustible et un dispositif de stockage. Cette stratégie réalise un objectif majeur à savoir la minimisation de la consommation de l'hydrogène du véhicule en temps réel. La figure 1.4 donne une représentation schématique du système à l'étude.

Cette stratégie concerne deux objectifs et doit respecter plusieurs contraintes. Les deux

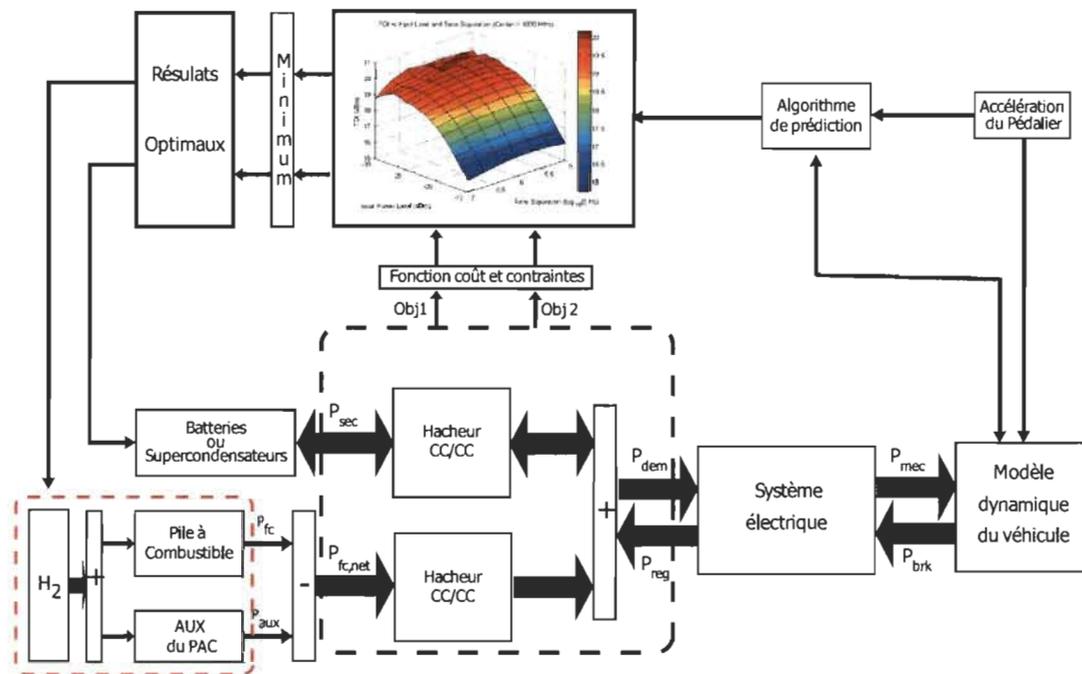


Figure 1.4 Représentation schématique du système à l'étude

objectifs visent à maintenir borné l'état de charge de la source de stockage afin d'augmenter sa durée de vie, et à optimiser (minimiser) la consommation d'hydrogène de la pile à combustible durant un parcours routier quelconque. La source secondaire épaulé la source primaire lors des accélérations et des montés et récupère le maximum d'énergie lors des freinages régénératifs et des descentes. La puissance récupérée permet de charger le dispositif du stockage afin de donner un apport de puissance à la pile à combustible lors des accélérations. Pour valider la robustesse de la stratégie, la masse du véhicule sera aussi prise en compte. Cette robustesse assure une gestion d'énergie avec un minimum de consommation d'hydrogène quelle que soit la variation de la masse du véhicule pendant le parcours routier.

Les contraintes à prendre en considération sont liées au fonctionnement de chaque composant du système. Ainsi, la puissance du dispositif de stockage est encadrée entre des valeurs extrémales et son état de charge doit demeurer borné. La source primaire comporte aussi une limitation de puissance et elle doit fournir une puissance encadrée

entre sa puissance maximale et sa puissance minimale. On tient également compte de certaines contraintes liées à la machine électrique comme le couple et la puissance électrique demandée.

Tel que mentionné dans la section précédente, la méthode proposée combine trois stratégies afin d'optimiser la consommation d'énergie du véhicule à pile à combustible. La figure 1.5 donne une description schématique de la méthode d'optimisation proposée. En effet, cette approche comporte :

1. **une stratégie de gestion en temps réel** : celle-ci se base sur la ECMS, et elle assure la répartition de la puissance entre les composants du système et minimise, à chaque instant, la consommation en hydrogène.
2. **une stratégie d'optimisation globale appliquée en temps réel** : elle se fonde sur le principe du minimum de Pontryagin et calcule le minimum de la consommation.
3. **un algorithme de prédiction** : celui-ci utilise les chaînes de Markov et permet de prédire à la foi les conditions de roulage futures et la consommation en hydrogène.

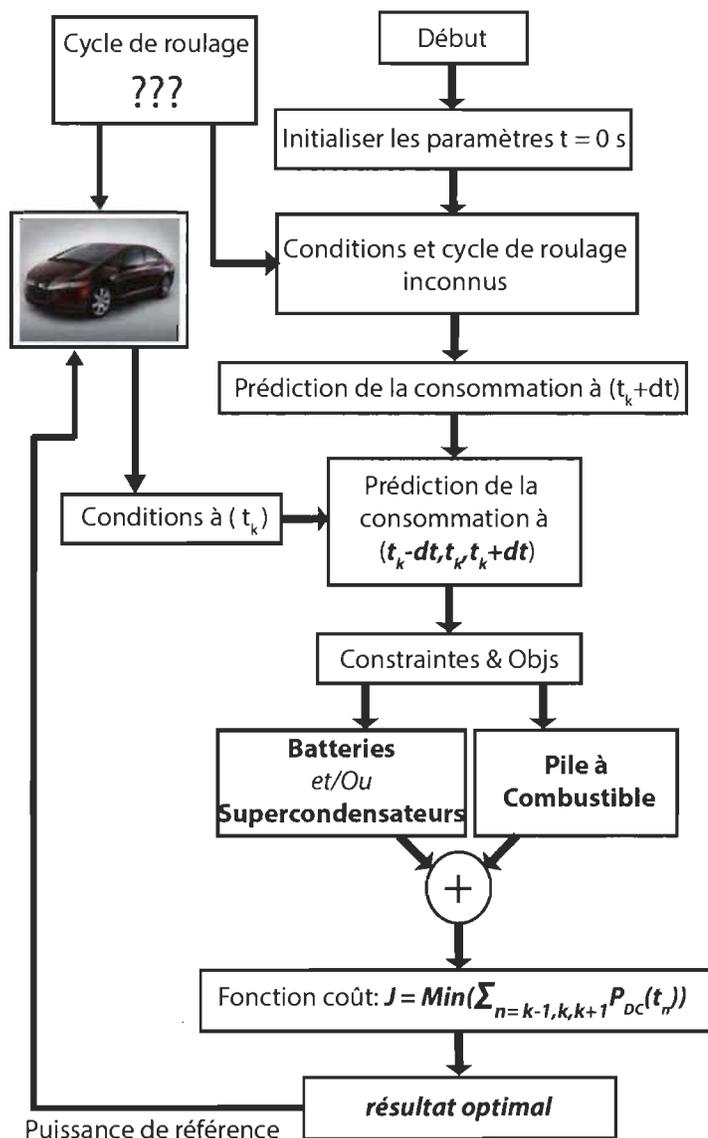


Figure 1.5 Description schématique de la méthode d'optimisation proposée

## 1.6 Contributions escomptées et l'originalité du sujet

La réalisation d'une stratégie d'optimisation en temps réel pour un parcours quelconque avec des conditions de roulages inconnues présente un important défi.

## 1.6.1 Contributions escomptées

### 1.6.1.1 Énoncé des contributions à atteindre

Le respect des exigences suivantes s'avère une grande contribution dans l'application des stratégies d'optimisation en temps réel. La stratégie proposée :

- ✓ doit s'adapter à n'importe quelle condition de roulage tels que l'accélération, la décélération, le freinage, la montée, la descente, le changement de masse, le temps final du parcours, etc. Il doit aussi s'adapter à tout parcours routier (semi-urbain, urbain et autoroute).
- ✓ ne doit pas avoir recours à un système de localisation GPS, ou à de bases de données de grandes tailles.
- ✓ doit être facile à mettre en œuvre.
- ✓ doit prévenir des situations extrêmes inconnues telle que la nature de la puissance demandée à haute ou de brusque demande de puissance et à grande vitesse.

### 1.6.1.2 Approches suggérées

D'abord, la première stratégie sera à base de règles définies avec expertise considérant la nature du système étudié et les objectifs à atteindre. Cette stratégie est instantanée et répond aux deux objectifs cités précédemment. Elle sera combinée avec le principe de minimisation de la consommation équivalente (ECMS).

Les résultats et l'expertise que nous aurons acquis sur le fonctionnement du système grâce à cette stratégie à base de règles va amener à proposer la deuxième stratégie à base de la logique floue. Cette dernière est connue plus souple et moins agressive que la stratégie à base de règles. Elle est aussi considérée parmi les méthodes d'optimisation

multiobjectif<sup>6</sup>. On présentera alors un contrôleur à base de la logique floue implémenté en temps réel. On constatera que l'état de charge du supercondensateur est mieux géré par rapport à la stratégie à base de règles surtout lors de brusques demandes de puissance du groupe motopropulseur lorsqu'il fonctionne à grande vitesse.

Ensuite, on proposera la troisième stratégie basée sur la commande optimale résolue par le principe du minimum de Pontryagin. Cette stratégie sera reformulée en une stratégie biobjectif. La minimisation de la consommation équivalente sera considérée comme le problème à optimiser. L'équation d'optimisation dépendra dans ce cas de la puissance de la pile à combustible, de la puissance du supercondensateur et de son état de charge. De plus cette équation sera formulée pour aboutir à une régulation de l'état de charge du supercondensateur en temps réel. Les contraintes liées au système étudié seront aussi prises en compte. Aucun paramètre ne sera alors calculé hors ligne. Cette stratégie sera simple à implémenter comme un contrôleur à base de commande optimale. Dans ces conditions, le coût de calcul sera minimisé.

Pour vérifier l'efficacité de cette stratégie, on testera le contrôleur à base de la commande optimale à des conditions extrêmes ( une grande vitesse et une grande masse du véhicule). Par conséquent, dans ces conditions extrêmes, la dynamique de chaque composant du système jouera un rôle important. En effet, la dynamique ou la réponse à une demande brusque est moins rapide chez la pile à combustible que chez le supercondensateur dont sa dynamique est beaucoup plus rapide. C'est pourquoi lors d'une demande brusque de puissance et en réponse à une augmentation de vitesse ou à la façon dont l'utilisateur manipule le véhicule (comportement de la conduite agressive), le système ne réagit pas rapidement pour stabiliser ce pique de puissance demandée. Dans ce cas, la pile à combustible ne peut pas fournir plus que sa puissance maximale, et le supercondensateur l'épaule pour composer ce manque de puissance en dépit de son état de charge. Pour ces raisons, on proposera un algorithme de prédiction pour corriger cette probléma-

---

6. Voir l'annexe B pour plus de détails

tique. Même si le comportement des utilisateurs ne peut pas être prédit avec exactitude, une étude statistique peut être entretenue pour avoir une idée sur le comportement global durant une période d'utilisation d'un véhicule.

### 1.6.2 Originalité du sujet de recherche

L'originalité de ce travail de recherche se manifeste en plusieurs points ;

1. L'intégration d'un prédicteur basé sur la chaîne de Markov au modèle afin de prédire la puissance demandée dans le futur et éviter certains problèmes cités précédemment. Ce prédicteur est séparé du bloc de la commande optimale, il peut être mis en œuvre avec d'autres stratégies en temps réel, et il est facile à implémenter.
2. La simplification de la commande optimale utilisée en deux équations séparées. La première calcule en temps réel la variable du vecteur d'état adjoint, et la seconde déduit la puissance optimale que la pile à combustible doit fournir. Une étude hors ligne n'est donc pas nécessaire.
3. Dans la plupart des travaux de recherche, le vecteur d'état adjoint est calculé hors ligne. Il est constant ou variable. Cette valeur est ajustée au fil des simulations pour un parcours et/ou des conditions connus. Le problème se pose en temps réel, pour un parcours et des conditions inconnus et la répartition d'énergie n'est donc pas optimale. Cette variable est calculée en temps réel en collectant l'information instantanée disponible pendant le fonctionnement du véhicule.
4. La stratégie proposée est également polyvalente. Elle ne nécessite aucune étude hors ligne. Elle est validée sur deux types de parcours routier urbain et autoroute avec la masse du véhicule variable. Elle est aussi testée à basse et haute vitesse afin d'arriver à des profils de vitesse qui décrivent au mieux certains comportements de l'utilisateur du véhicule (le conducteur).
5. Dans plusieurs travaux de recherche, la source secondaire épaulé la source primaire (la pile à combustible) lors des accélérations. Elle joue un rôle d'assistance et ne dé-

livre qu'une partie de la puissance demandée. Dans ce cas, elle peut être surchargée surtout dans un parcours aux freinages répétitifs et à basse vitesse. Étant donné que le coût de son installation, sa masse et son volume sont considérables, cette source doit être bien utilisée pour rentabiliser le système. Un objectif qui sera atteint dans ce travail de recherche.

6. Un modèle dynamique décrivant le comportement thermique de la batterie a été élaboré. Il a permis de mettre en évidence les effets de la température sur la durée de vie et le comportement dynamique de la batterie. Ce modèle a une très grande importance pour comprendre le comportement thermique de la source secondaire (batterie) et son effet sur le comportement et la durée de vie de tout le système. L'annexe C expose cette modélisation thermique de la batterie.

## 1.7 Structure de thèse

Cette thèse se compose de 6 chapitres et plusieurs annexes. Dans le chapitre 2, on présente l'infrastructure de recherche. On détaille la modélisation des composants électriques et mécaniques du système servant à valider le travail.

Dans le chapitre 3, on présente la stratégie de gestion à base de règles. C'est une stratégie de gestion d'énergie instantanée en temps réel. Les règles sont déduites par expertise et la connaissance du système. Un algorithme est modélisé et ensuite implémenté dans l'environnement MATLAB/Simulink [35].

Dans le chapitre 4, on expose la stratégie de gestion basée sur la logique floue. C'est une méthode de gestion en temps réel. Un contrôleur à logique floue est déterminé par expertise et implémenté dans l'environnement MATLAB/Simulink. Il est validé sur trois architectures différentes [36].

Dans le chapitre 5, on détaille la stratégie d'optimisation basée sur la commande op-

timale. Elle est résolue avec l'approche du principe de minimum de Pontryagin et implémentée dans l'environnement MATLAB/Simulink sous forme de deux équations [37].

Dans le chapitre 6, on présente une stratégie qui combine un prédicteur basé sur les chaînes de Markov et la commande optimale. Ce chapitre met en évidence des phénomènes observés lors des changements brusques de la vitesse ou de la puissance demandée. Ces phénomènes peuvent provoquer des problèmes dévastateurs dans les sources d'énergie (la pile à combustible, batteries, supercondensateur) [38].

Dans le chapitre 7, on procède à la comparaison des stratégies proposées dans ce travail de recherche avec quelques stratégies publiées.

Le chapitre 8 concerne la conclusion générale de ce travail.

## CHAPITRE 2

### MODÉLISATION ET SIMULATION DU SYSTÈME À L'ÉTUDE

#### Sommaire

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>26</b>
<b>2.2</b>	<b>Modèle dynamique du véhicule</b>	<b>29</b>
<b>2.3</b>	<b>Composants électriques</b>	<b>34</b>
2.3.1	Modèle dynamique de la pile à combustible	35
2.3.2	Modèle dynamique de la batterie	39
2.3.3	Modèle dynamique du supercondensateur	40
2.3.4	Topologies des convertisseurs statiques	42
2.3.5	Convertisseur de freinage	46
2.3.6	Machine électrique	48
2.3.7	Onduleur de tension triphasé	49
<b>2.4</b>	<b>Partie de la gestion d'énergie</b>	<b>52</b>
<b>2.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>53</b>

#### 2.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va modéliser et simuler les différents composants du système utilisé pour valider ce travail. La figure 2.1 donne le schéma synoptique du système complet. Il se compose d'au moins deux sources d'énergie : une pile à combustible et un supercondensateur ou d'une batterie. D'abord, la pile à combustible est une pile à combustible à membre échangeuse de proton (PEMFC)<sup>1</sup> de 400 *cell*, 288  $V_{cc}$ , 100 *kW*. Elle est

1. Proton Exchange Membrane Fuel Cell

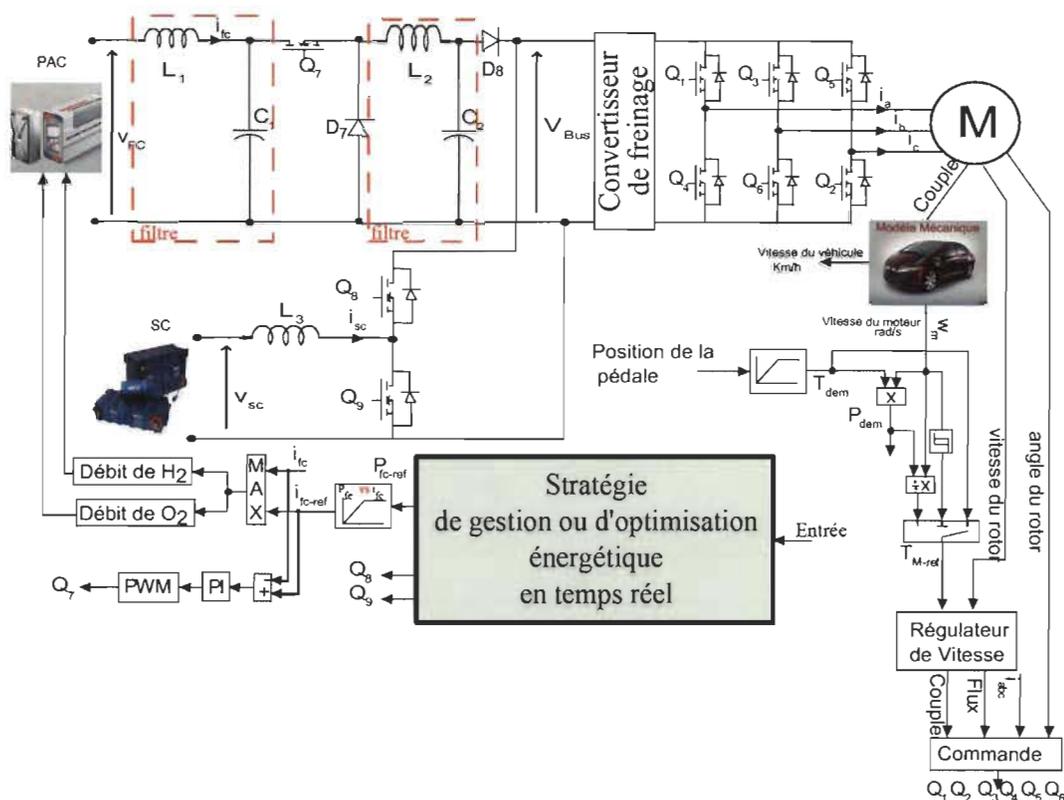


Figure 2.1 Schéma synoptique du système complet

connectée au bus CC par un hacheur abaisseur ayant un filtre à l'entrée et un filtre à la sortie. Le supercondensateur est de type *BMOD0500P016* de la compagnie *MAXWELL Technologies* de 16 V, 500 F. La source auxiliaire (le supercondensateur ou la batterie) est connectée au bus CC par l'intermédiaire d'un hacheur abaisseur/élevateur bidirectionnel en courant.

Le système contient aussi une machine synchrone triphasée à aimants permanents (PMSM), de 288 V<sub>cc</sub>, 8 ples et 100 kW, alimentée par un onduleur triphasé à *MOSFET*.

La figure 2.1 montre également les différents blocs de régulation ainsi que le bloc d'optimisation. La puissance demandée au cours d'un parcours routier est calculée en fonction de la position de la pédale d'accélération. La puissance de la pile à combustible est calculée dans le bloc de la stratégie de gestion ou d'optimisation énergétique. Le courant de référence de la pile à combustible est déduit en utilisant une table (lookup table)

et il est comparé avec le courant mesuré de la pile à combustible pour commander le hacheur abaisseur via un régulateur proportionnel-intégral (PI). Le courant de référence est également utilisé pour imposer la consommation en hydrogène et en oxygène et réguler les débits [39].

La figure 2.2 montre le schéma Simulink global du modèle dynamique du système. L'environnement MATLAB/Simulink et ses boîtes à outils SimPowerSystems et SimDriveline sont utilisés pour modéliser les éléments électriques et mécaniques du véhicule hybride. Il comporte trois blocs : le bloc de la partie mécanique du véhicule, le bloc de la partie électrique qui contient la machine électrique, les convertisseurs et les sources d'énergie (la pile à combustible et la source secondaire) et le bloc de la partie de la gestion d'énergie [40]. Dans les paragraphes suivants, on va détailler le contenu de chaque bloc. L'annexe D présente quelques prises d'écran du simulateur utilisé.

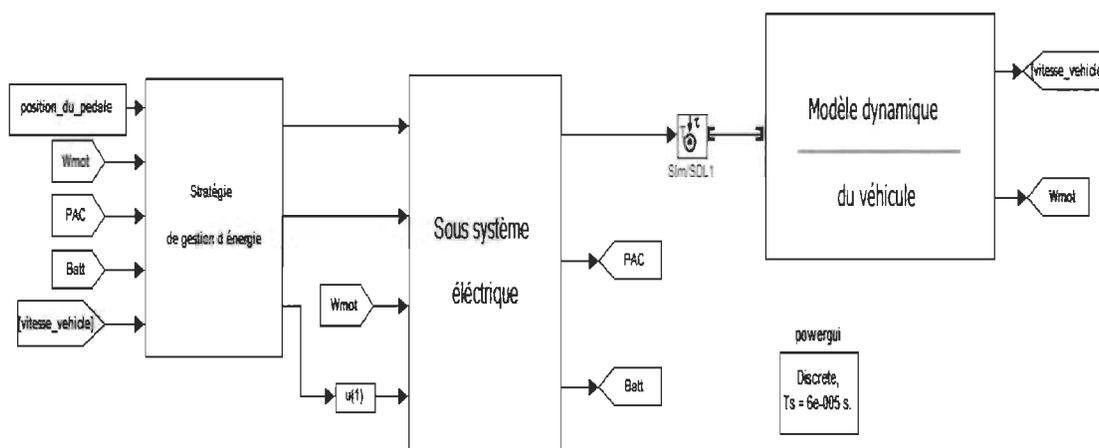


Figure 2.2 Schéma Simulink global du modèle dynamique du système [39]

## 2.2 Modèle dynamique du véhicule

La boîte à outils SimDrive de l'environnement MATLAB/Simulink fournit sous forme d'un bloc le modèle mécanique du véhicule et des roues [39]. La figure 2.3 montre le modèle dynamique du véhicule sous SimDrive avec les deux essieux portant les roues du véhicule.

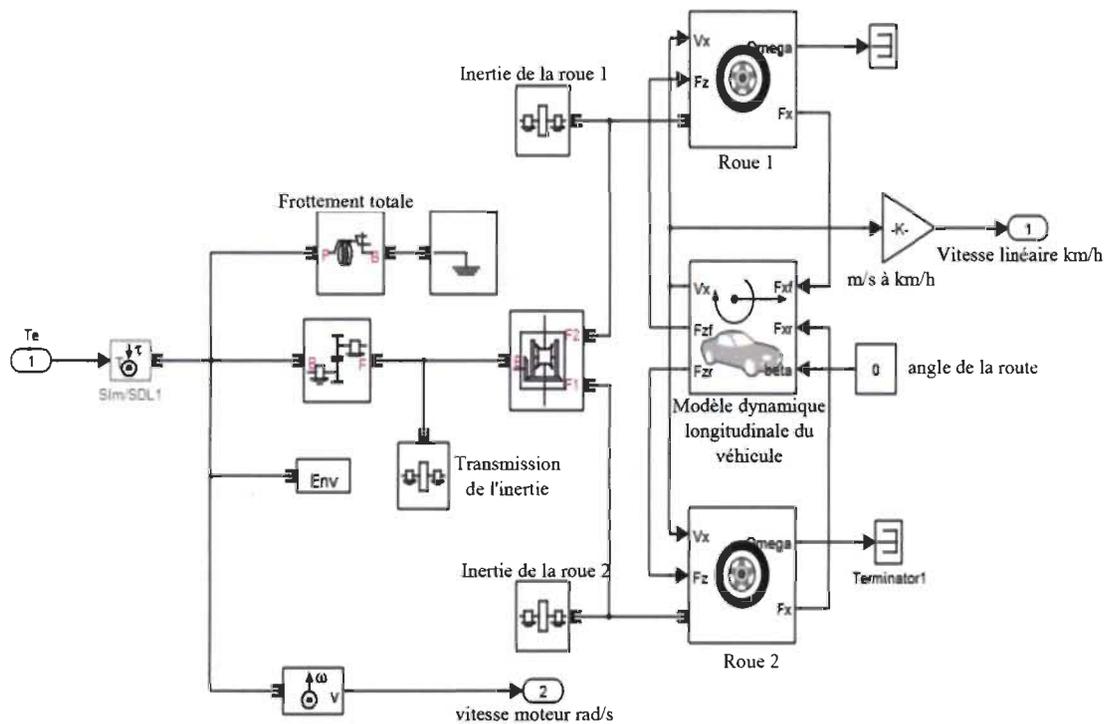


Figure 2.3 Modèle dynamique du véhicule sous SimDrive [39]

La figure 2.4 montre toutes les forces appliquées sur le véhicule en mouvement.

La roue d'un véhicule est constituée d'un pneu souple. Le patinage ou le glissement de la roue est observé quand elle est en contact avec le sol. Le modèle de la roue est disponible dans la boîte à outils SimDriveline. Ce modèle inclut le phénomène de déformation du pneu au contact du sol quand un couple est appliqué sur l'arbre de transmission. La

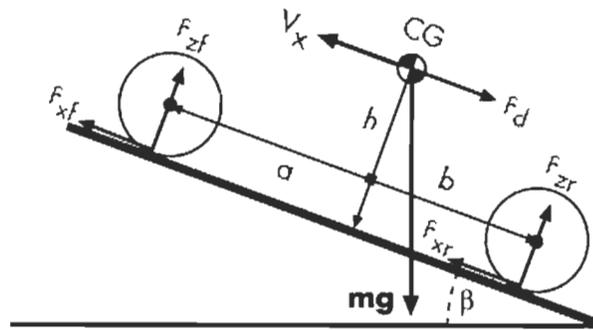


Figure 2.4 Forces appliquées sur le véhicule en mouvement [39]

figure 2.5 indique les forces appliquées sur la roue en mouvement et en contact avec le sol.



Figure 2.5 Forces appliquées sur la roue en contact avec le sol et en mouvement [39]

Les principaux forces qui agissent sur le véhicule sont :

**Le poids du véhicule** qui est présenté par l'équation (2.1).

$$P = M_v g \sin(\beta) \quad (2.1)$$

avec  $M_v$  est la masse du véhicule ( $kg$ ),

$g$  est l'accélération gravitationnelle ( $m/s^2$ ),

$\beta$  est l'angle d'inclinaison de la route.

**La force aérodynamique** affecte les performances du véhicule pendant l'accélération. Le module de cette force est donné par l'équation (2.2) [39], [41].

$$|F_d| = \frac{1}{2} C_d \rho A V_x^2 \quad (2.2)$$

avec  $\rho$  est la densité de l'air ( $kg/m^3$ )

$C_d$  est le coefficient de pénétration de l'air ( $N.s^2/kg.m$ )

$A$  est la surface frontale du véhicule en coupe frontal ( $m^2$ )

$V_x$  est la composante longitudinale de la vitesse du véhicule ( $m/s$ ).

**La force longitudinale**  $F_x$  exercée par la roue sur le sol au point de contact est une fonction  $f$  qui dépend du point de glissement de la roue  $k'$  et la force verticale appliquée par la charge  $F_z$  en ( $N$ ). Elle est décrite par l'équation (2.3) [39].

$$F_x = f(k', F_z) \quad (2.3)$$

Ces forces affectent le déplacement du véhicule. L'équation dynamique regroupant ces forces est donnée par l'expression (2.4) :

$$m_v \dot{V}_x = F_x + F_d - P \quad (2.4)$$

La conformité ou la déformation longitudinale de la roue  $u$  en ( $m$ ) est donnée par l'équation (2.5) [39].

$$\frac{du}{dt} = V'_{sx} + V_{sx} \quad (2.5)$$

La vitesse de glissement de la roue en un point de contact avec le sol est présentée par l'équation (2.6) [39].

$$V'_{sx} = V_x - r_e \Omega' \quad (2.6)$$

La vitesse de glissement de la roue est exprimée par l'équation (2.7) [39].

$$V_{sx} = V_x - r_e \Omega \quad (2.7)$$

avec  $V'_{sx}$  en (m/s),

$V_{sx}$  en (m/s),

$r_e$  est le rayon de roulement efficace en (m),

$\Omega'$  est la vitesse angulaire en un point de contact (rad/s),

$\Omega$  est la vitesse angulaire de la roue (rad/s).

Le patinage et le point de contact de glissement de la roue sont donnés respectivement par les équations (2.8) et (2.9) [39].

$$k = - \frac{V_{sx}}{|V_x|} \quad (2.8)$$

$$k' = - \frac{V'_{sx}}{|V_x|} \quad (2.9)$$

La figure 2.6 montre le modèle de simulation du véhicule et la figure 2.7 donne les résultats de simulation.

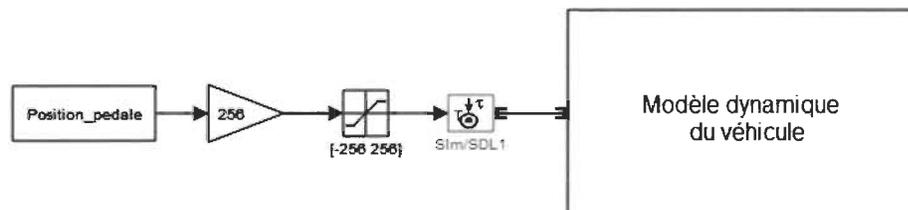


Figure 2.6 Modèle de simulation du véhicule

La position de la pédale d'accélérateur fournit le signal d'entrée qui varie entre 0 à 1 et la pédale de frein varie de -1 à 0. Elle est décrite par la figure 2.7.(a). Le couple appliqué au niveau de l'arbre de transmission est obtenu en multipliant la valeur de la position de la

pédale par 256 (N). Ce couple est représenté sur la figure 2.7.(b). La vitesse du véhicule donnée par l'équation (2.4) est présentée sur la figure 2.7.(c).

La figure 2.7.(d) donne la force de contact des roues avant et arrière  $F_x$ . La force de contact de la roue arrière est la même que celle avant et les deux sont générées par la force de friction et la force verticale  $F_z$ . Les deux masses du véhicule considérées dans cet exemple sont respectivement de  $m_v = 1625 \text{ kg}$  et de  $m_v = 2500 \text{ kg}$ . Elles agissent sur la force verticale  $F_z$ .

La figure 2.7.(e) représente la force verticale appliquée sur la roue. La figure 2.7.(f) montre la vitesse du moteur au niveau de l'arbre de transmission. La figure 2.7.(g) représente la vitesse angulaire de la roue. La vitesse linéaire de sortie du véhicule est représentée sur la figure 2.7.(h).

Tel que mentionné, deux masses du véhicule ont été considérées  $m_v = 1625 \text{ kg}$  et  $m_v = 2500 \text{ kg}$  dans cet exemple. Pour atteindre la vitesse souhaitée, le conducteur doit exercer plus de force sur la pédale d'accélérateur d'où la différence de position dans la figure 2.7.(a). Le couple varie et croît en augmentant la masse du véhicule. Les forces de contact des roues augmentent car la force verticale exercée sur la roue est plus élevée.

Les paramètres utilisés du véhicule dans la simulation sont donnés par le tableau 2.1.

Tableau 2.1 Paramètres du véhicule

Dimensions	Longueur (inches)	190,3
	Largeur (inches)	72,7
	Hauteur (inches)	57,8
	Bande de roulement (avant/arrière) (inches)	62,2/62,8
	Empattement (véhicule) (inches)	110,2
Masse passagers	Masse du véhicule (kg)	1625
	Nombre de passagers	4
	Vitesse maximale (mph)	100

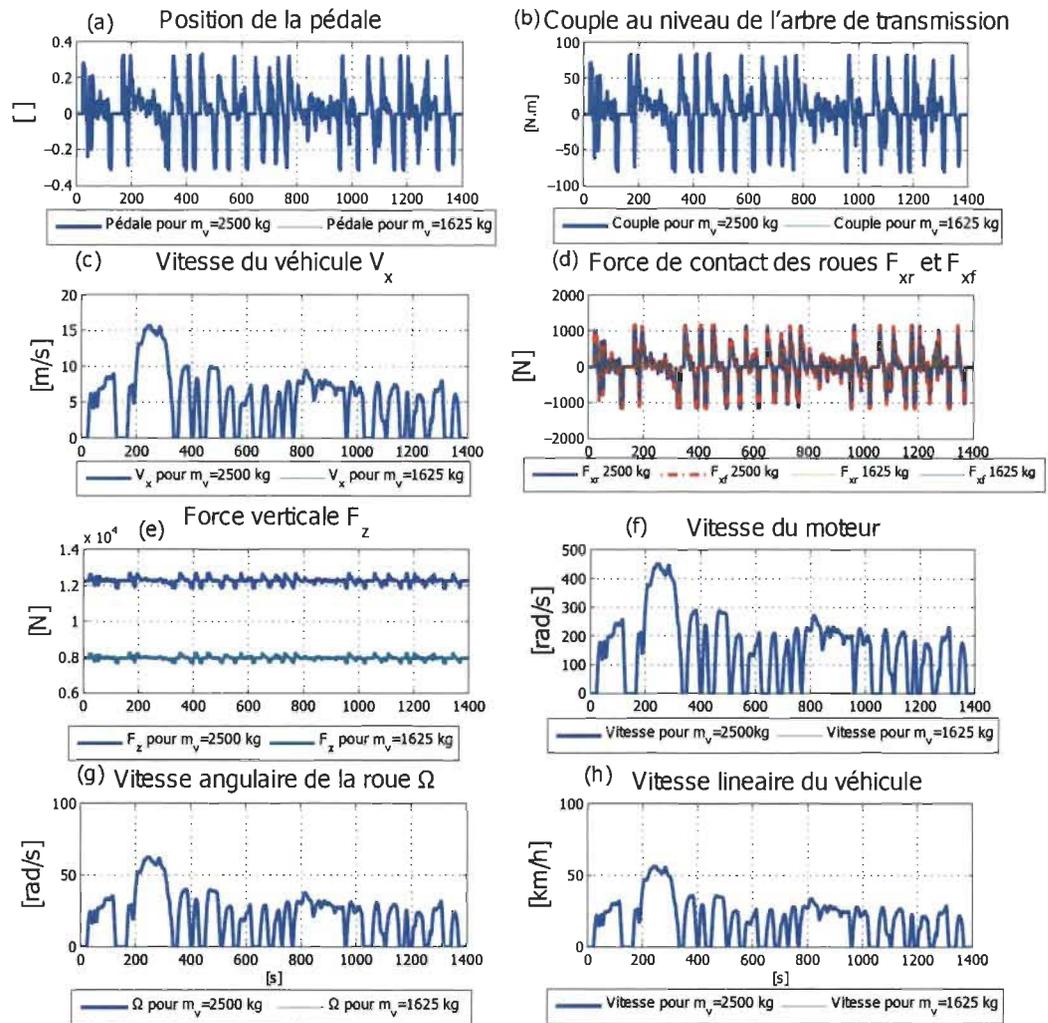


Figure 2.7 Résultats de simulation du modèle du véhicule

### 2.3 Composants électriques

La figure 2.8 montre le modèle Simulink de la partie électrique. Il se compose d'une pile à combustible, d'une batterie, de deux hacheurs, d'un convertisseur de freinage, d'un onduleur triphasé et d'une machine synchrone à aimants permanents. Une limitation de puissance a été ajoutée à ce système pour protéger la batterie des pics de puissance. Cette puissance est retournée au système lors du freinage du véhicule.



La boîte à outils SimPowerSystems de l'environnement MATLAB/Simulink contient un modèle dynamique de la pile à combustible [39]. La pression, la température, les taux et la composition de l'hydrogène et de l'air pendant le fonctionnement de la pile à combustible peuvent être mesurés en temps réel à l'aide de ce modèle. La tension de sortie totale de la pile à combustible  $V_{fc}$  est calculée en multipliant le nombre de cellules  $N_{cell}$  par la tension de sortie de chaque cellule  $V_{cell}$  (équation ((2.10)). Les débits d'oxygène et d'hydrogène sont calculés respectivement par les équations (2.11) et (2.12) [39].

$$U_{O_2} = \frac{60000RTN_{i_{fc}}}{zFP_{air}V_{lpm(air)}O_2\%} \quad (2.11)$$

$$U_{H_2} = \frac{60000RTN_{i_{fc}}}{zFP_{fuel}V_{lpm(fuel)}H_2\%} \quad (2.12)$$

Avec

$$R = 8.3145j/(molK),$$

$$F = 96485As/mol,$$

$O_2\%$  = pourcentage d'oxygène dans le combustible,

$T$  = temperature en (K),

$V_{lpm(air)}$  = débit d'air ( $l/min$ ),

$V_{lpm(fuel)}$  = débit d'écoulement du combustible ( $l/min$ ),

$H_2\%$  = Pourcentage d'hydrogène dans le combustible (%),

$P_{air}$  = pression absolue d'alimentation de l'air ( $atm$ ),

$P_{fuel}$  = pression absolue d'alimentation du carburant ( $atm$ ),

$z$  = Nombre d'électrons en mouvement.

La pile à combustible est une source de tension unidirectionnelle en courant. Par conséquent, elle ne permet pas de récupérer l'énergie de freinage et elle ne peut pas supporter les pics de puissance de la charge pendant un parcours routier. Son utilisation seule augmente la consommation en hydrogène et le coût du système de traction. Une source d'énergie secondaire est ajoutée pour l'épauler, ce qui diminue la consommation

en hydrogène et fournit les piques de puissance demandée par la charge. Les paramètres de la pile à combustible utilisée sont donnés dans le tableau 2.2.

Tableau 2.2 Paramètres de la pile à combustible

Tension en circuit ouvert	V	400
Rendement nominal de la pile à combustible	%	57
Température de fonctionnement	$^{\circ}C$	95
Débit d'air nominal	<i>lpm</i>	1698
Pression nominale de l'alimentation d'hydrogène	<i>bar</i>	3
Pression nominale de l'alimentation de l'air	<i>bar</i>	3
Composition nominale en $H_2$ (air)	%	99.95
Composition nominale en $O_2/H_2O$ (air)	%	21/1

La figure 2.9 montre le modèle de la pile à combustible disponible dans MATLAB/Simulink. Ce modèle est constitué de quatre blocs qui calculent la tension en circuit ouvert et d'une partie électrique constituée d'une résistance interne, d'une diode et d'une source de tension variable.

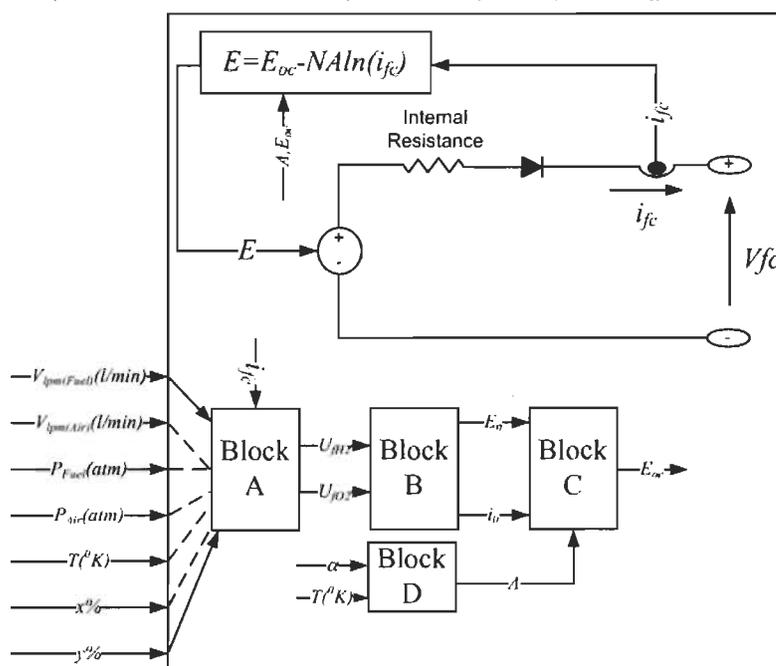


Figure 2.9 Modèle de la pile à combustible disponible dans MATLAB/Simulink [39]

La figure 2.10 représente la variation du courant de la pile à combustible en fonction de la puissance de sortie. Cette relation peut être approximée par une équation de deuxième ordre (équation (2.13)). Les coefficients  $a$ ,  $b$  et  $c$  peuvent être déterminés d'une façon empirique.

$$I_{fc} = a P_{fc}^2 + b P_{fc} + c \quad (2.13)$$

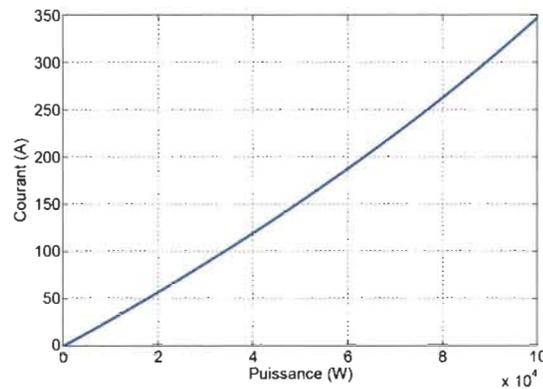


Figure 2.10 Variation du courant de la pile à combustible en fonction de la puissance de sortie

La figure 2.11 représente la consommation en oxygène et hydrogène, la tension, le courant et le rendement de la pile à combustible. Au démarrage de la pile à combustible, la puissance de référence en entrée est de 400 W. Le courant mesuré est de 0.8 A et la tension mesurée est de 410 V. Le rendement de la pile à combustible est au maximum 75 %. Dès le fonctionnement de la pile, on constate des changements dans sa tension et dans son courant ce qui affecte son rendement. On observe aussi, qu'à chaque changement brusque dans la demande d'énergie à la pile à combustible, le rendement de cette dernière chute jusqu'à 24 %.

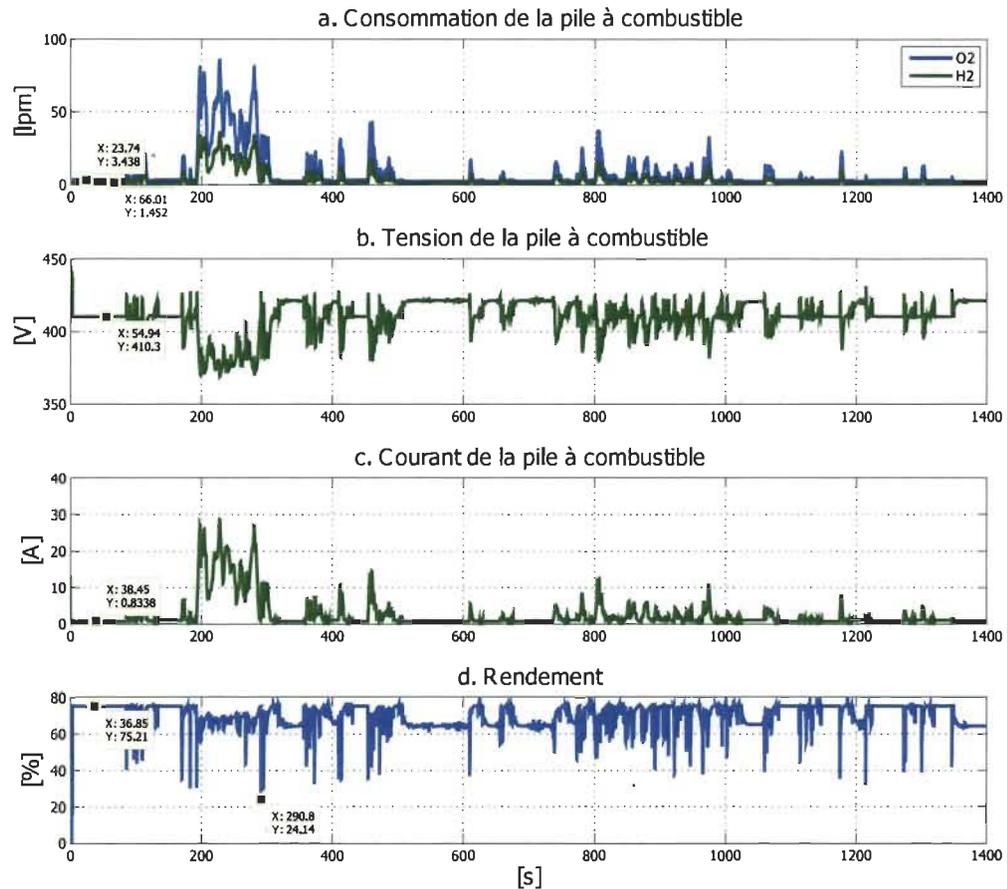


Figure 2.11 Consommation en oxygène et en hydrogène, la tension, le courant et le rendement de la pile à combustible

### 2.3.2 Modèle dynamique de la batterie

Une batterie est une pile électrochimique qui transforme l'énergie chimique en énergie électrique. Son utilisation dans les véhicules électriques est justifiée par son densité d'énergie élevée par rapport aux piles à combustible. Différents types de batteries sont utilisés dans les véhicules électriques. Dans cette étude, on considère uniquement la batterie lithium-ion en raison de sa meilleure réponse par rapport aux autres types de batteries et de sa large utilisation dans le domaine de transport. Pour les simulations, on utilise le modèle dynamique de la batterie disponible dans la boîte à outils SimPowerSystems de l'environnement MATLAB/Simulink.

Le modèle équivalent de la batterie se compose d'une résistance interne et d'une tension fixe  $V_{Batt}$ . Le paramètre  $V_{Batt}$  peut être calculé par deux différentes équations [39], [40], [43]. Si le courant est positif, alors la batterie est en mode décharge,  $V_{Batt} = V_{discharge}$ , comme représenté dans l'équation (2.14). Si le courant est négatif, la batterie se trouve dans le mode charge,  $V_{Batt} = V_{charge}$ . Les équations (2.14) et (2.15) présentent respectivement la tension de la batterie dans le mode décharge et le mode charge.

$$V_{discharge} = V_0 - \frac{K \cdot Q_{max}}{Q_{max} - q} \cdot i^* - \frac{K \cdot Q_{max}}{Q_{max} - q} \cdot q + A \cdot \exp(-B \cdot q) \quad (2.14)$$

$$V_{charge} = V_0 - \frac{K \cdot Q_{max}}{0.1 * Q_{max} - q} \cdot i^* - \frac{K \cdot Q_{max}}{Q_{max} - q} \cdot i \cdot t + A \cdot \exp(-B \cdot q) \quad (2.15)$$

Avec  $Q_{max}$  est la capacité maximale (Ah),  $V_0$  est la tension à vide (V),  $A$  est la tension (V) et  $B$  est la capacité (Ah)<sup>-1</sup>,  $q = i \cdot t$  est la capacité disponible (Ah), et  $K$  est la constante de polarisation (Ah)<sup>-1</sup>.

L'état de charge *SOC* est déterminé en utilisant l'équation (2.16).

$$SOC_{Batt} = 100 \left( 1 - \frac{\int i(t) dt}{Q} \right) \quad (2.16)$$

L'état de charge de la batterie est borné entre 0% et 100%. Un pourcentage nul correspond à une décharge complète, et un pourcentage de 100% représente l'état de charge d'une batterie complètement chargée.

### 2.3.3 Modèle dynamique du supercondensateur

Un supercondensateur est un condensateur généralement à double couche électrochimique. Il emmagasine de l'énergie électrostatique en polarisant une solution électrolytique. Comme le processus de stockage de l'énergie ne s'agit pas d'une réaction chimique, le comportement en charge ou en décharge est plus rapide, ce qui rend les supercon-

densateurs parfaitement adaptés pour des applications qui requièrent des impulsions de puissance. En plus, le supercondensateur est réversible et peut être chargé et déchargé un nombre très élevé de fois.

Par ailleurs, les supercondensateurs sont en mesure de fournir des courants élevés, et pour certaines applications, ils sont placés en parallèle avec des sources principales pour les épauler et prolonger leur durée vie.

Les supercondensateurs peuvent être modélisés par de nombreux circuits équivalents comme présenté dans la référence [44]. Cependant, il est difficile de réaliser un circuit équivalent d'un supercondensateur en raison des expériences complexes nécessaires pour obtenir les paramètres de modélisation. Le modèle classique  $RC$  est simple et efficace, et ses paramètres peuvent être obtenus à partir de la fiche technique du fabricant. Dans ce travail, on utilise le modèle  $RC$  montré sur la figure 2.12. Le circuit équivalent est consti-

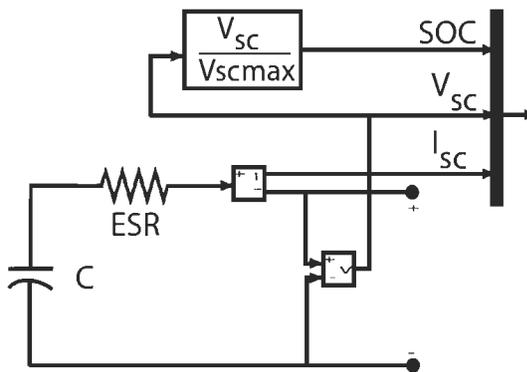


Figure 2.12 Circuit équivalent d'un supercondensateur

tué d'une résistance série  $ESR$  de valeur très faible et d'un condensateur idéal de capacité  $C$ . Dans ce travail, on considère le Module  $BMOD0500 P016B01$  du fabricant Maxwell de  $16 V$ ,  $500 F$  [45]. L'annexe E présente la fiche technique de ce supercondensateur.

L'état de charge (SOC) du supercondensateur est défini par l'équation (2.17).

$$SOC_{sc} = 100 \left( \frac{V_{sc}}{V_{max}} \right) (\%) \quad (2.17)$$

avec  $V_{sc}$  est la tension aux bornes du supercondensateur et  $V_{max}$  est sa tension maximale.

La tension requise et l'énergie ou la capacité requise du système de stockage peut être obtenue par la connexion de plusieurs supercondensateurs en série et en parallèle. La valeur de la résistance interne totale et la capacité totale du pack de supercondensateurs peuvent être calculées en utilisant les équations (2.18) et (2.19) [44].

$$ESR_{total} = N_s \frac{ESR_{sc}}{N_p} \quad (2.18)$$

$$C_{total} = N_p \frac{C_{sc}}{N_s} \quad (2.19)$$

La figure 2.13 montre les courbes du courant et de la tension du supercondensateur données par le fabricant [45]. Cette figure met en évidence la variation du courant et son

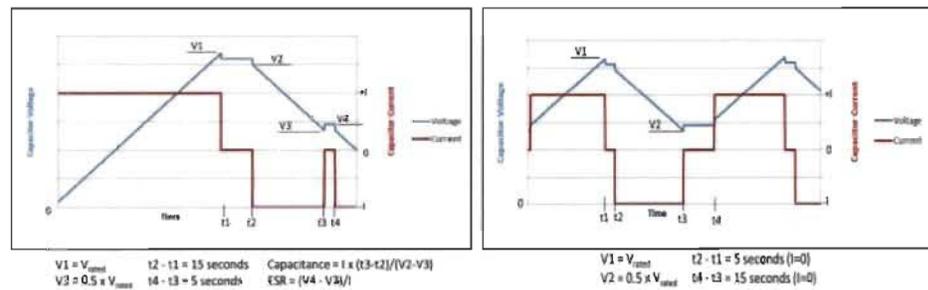


Figure 2.13 Courant et tension du supercondensateur [45]

effet sur la nature de la tension du supercondensateur.

### 2.3.4 Topologies des convertisseurs statiques

Pour l'alimentation du véhicule électrique hybride, trois configurations seront considérées. Dans toutes les configurations, la pile à combustible est la source primaire alors que la batterie et le supercondensateur jouent le rôle de la source secondaire : parfois

seule, parfois les deux ensembles.

La pile à combustible est reliée au bus CC via un hacheur abaisseur (buck) unidirectionnel en courant. Ce hacheur abaisseur est représenté dans la figure 2.14.(a). Les sources d'énergie secondaires sont reliées au bus CC à l'aide d'un convertisseur abaisseur/élevateur (buck/boost) bidirectionnel en courant. Il est montré à la figure 2.14.(b).

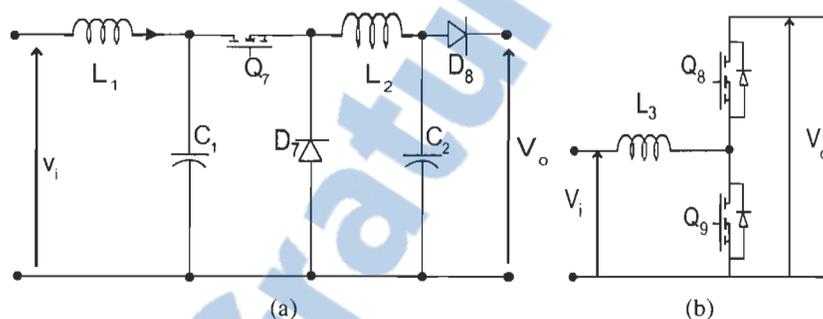


Figure 2.14 Hacheurs utilisées (a) Hacheur abaisseur et (b) Hacheur abaisseur/élevateur

Les deux convertisseurs sont connectés à un même bus CC, qui est souvent utilisé dans le circuit de puissance du véhicule en raison de sa simplicité, de sa faible émission de bruit électromagnétique, et de la simplicité de la mise en oeuvre de la stratégie de gestion de l'énergie et des lois de contrôle.

Dans ce travail, on a également utilisé le modèle simplifié des interrupteurs électriques. La figure 2.15 montre le modèle Simulink des interrupteurs électriques. Les MOSFETS sont remplacés par des sources de courant et de tension commandées. Ce modèle permet de préserver la dynamique de ces interrupteurs électriques, et réduire le temps de simulation du système en raison de la période d'échantillonnage très petite (de l'ordre de microsecondes ( $\mu s$ )).

La figure 2.16 montre le montage à interrupteurs complets et le montage à interrup-

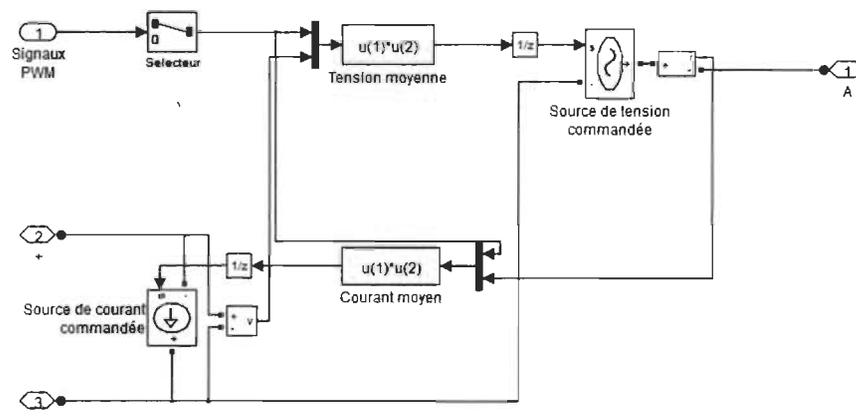


Figure 2.15 Modèle Simulink simplifié de l'interrupteur électronique [39]

teurs simplifiés de deux hacheurs à deux quadrants. La tension d'entrée  $V_{dc} = 400 V$ ,

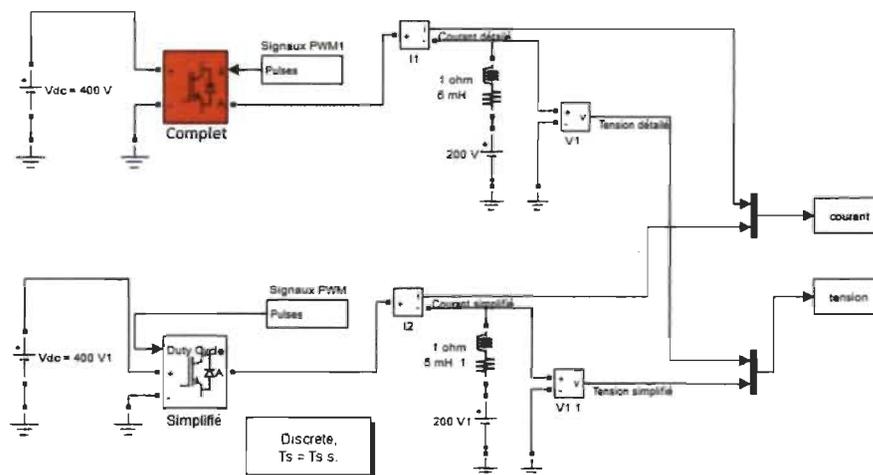


Figure 2.16 Montages de deux hacheurs à deux quadrants [39]

la fréquence de la porteuse des signaux des modulation de largeur d'impulsion (MLI) de  $1080 Hz$  et le rapport cyclique  $\alpha = 80 \%$ . Ce modèle de comparaison est inspiré du modèle de démonstration disponible dans les exemples dans l'environnement MATLAB/Simulink (*power\_1phPWM.mdl*) [39].

La figure 2.17 montre les résultats de simulation des deux modèles. La tension et le courant mesurés au niveau de la charge sont à peu près identiques, mais le temps de simulation pour le modèle simplifié est de  $58 \%$  de celui du modèle à interrupteurs complets.

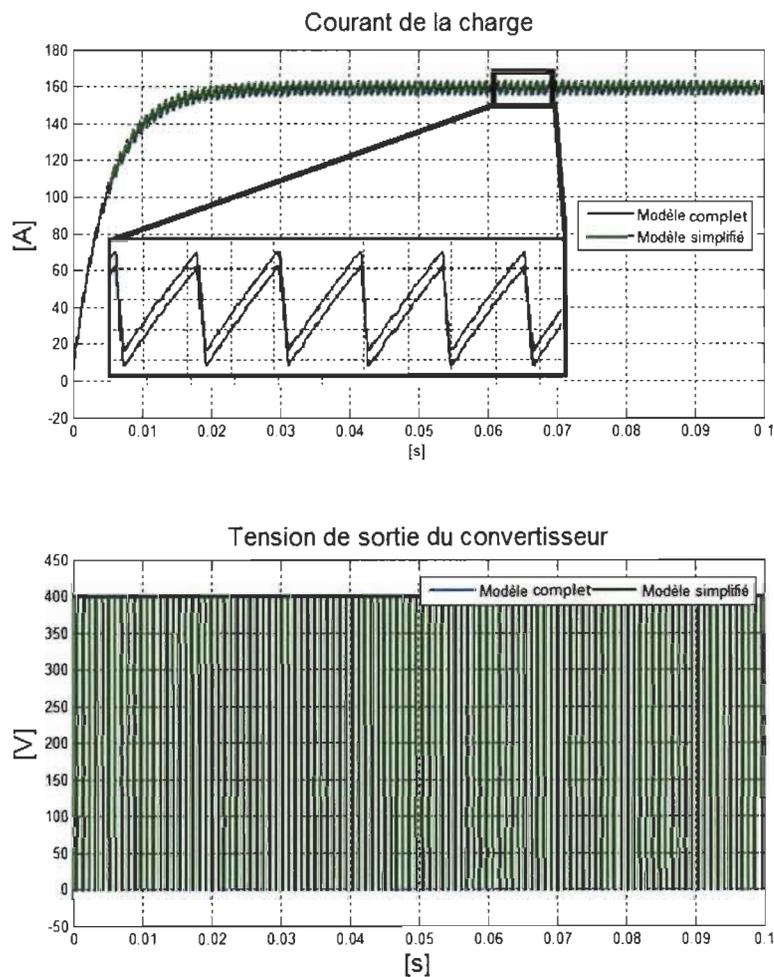


Figure 2.17 Résultats de simulation des deux modèles

En effet, les temps de simulation pour les convertisseurs sont respectivement de 0.48 s et de 0.28 s.

Dans notre cas, le système étudié est beaucoup plus complexe et le temps de simulation est donc un facteur important et il faut le réduire au maximum. On a alors utilisé uniquement les modèles à interrupteurs simplifiés pour tous les convertisseurs statiques.

### 2.3.5 Convertisseur de freinage

Un convertisseur de freinage est mis en place pour absorber le surplus du courant qui n'est pas autorisé par les constructeurs des supercondensateurs et des batteries. La figure 2.18 montre le convertisseur de freinage dynamique. Ce convertisseur est implémenté

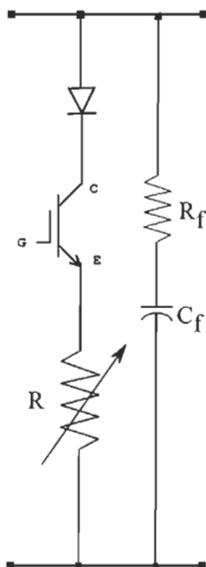


Figure 2.18 Convertisseur de freinage dynamique

dans l'environnement Simulink en utilisant les composants disponibles dans la boîte à outils de SimpowerSystems. La figure 2.19 montre le modèle Simulink du convertisseur de freinage. Il est constitué d'une diode qui assure la circulation du courant dans un seul sens, un interrupteur commandé, une résistance variable, un condensateur  $C_f$  et une résistance  $R_f$ .

La figure 2.20 montre le modèle Simulink de la commande de l'interrupteur. Dans le cas de la batterie, ce commutateur est enclenché quand la puissance au niveau du bus CC ou la puissance demandée lors du freinage est inférieure à sa puissance minimale de valeur  $P_{B.min} = -25 \text{ kW}$ . Également, quand la batterie est chargée lors du freinage et que son état de charge commence à dépasser  $SOC = 80 \%$ , l'interrupteur est activé.

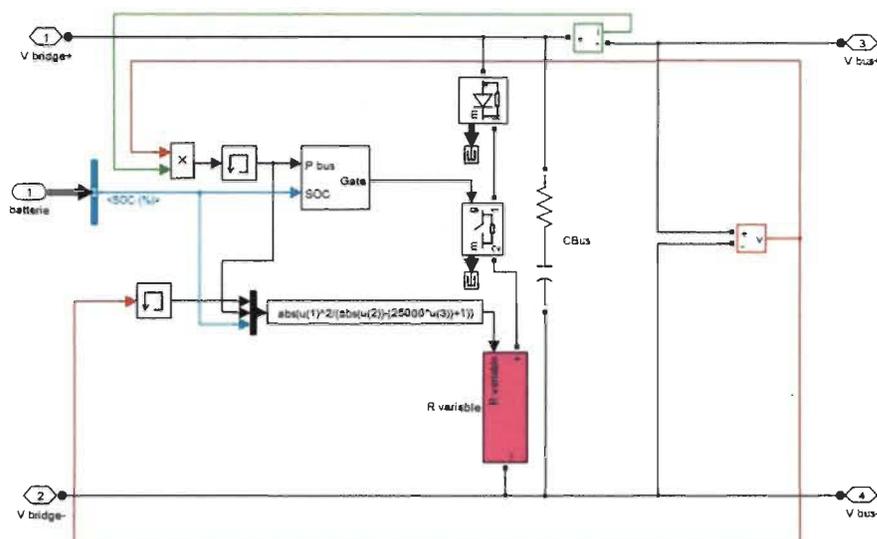


Figure 2.19 Modèle Simulink du convertisseur de freinage dynamique

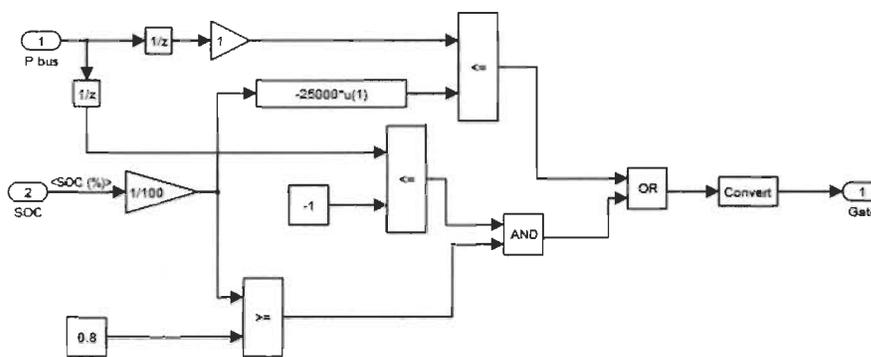


Figure 2.20 Modèle Simulink de la commande de l'interrupteur

La figure 2.21 représente le modèle Simulink de la résistance variable. Cette résistance est calculée en fonction de la puissance demandée et la puissance maximale de la batterie ou du supercondensateur. L'équation (2.20) permet de calculer cette résistance.

$$\begin{aligned}
 R_{variable}(t) &= \frac{V_{Bus}^2(t)}{P_{dem}(t) - P_{B.max}SOC_B(t)} \\
 &= \frac{V_{Bus}^2(t)}{P_{dem}(t) - P_{B.max}SOC_{B.max}}
 \end{aligned}
 \tag{2.20}$$



Tableau 2.3 Paramètres de la machine électrique

Flux induit par les aimants	<i>Wb</i>	0.07
Nombre de pôles		8
Tension nominale	<i>V</i>	288
Puissance nominale	<i>kW</i>	100
Vitesse nominale	<i>rpm</i>	3000
Vitesse Max.	<i>rpm</i>	12500
Couple nominal	<i>Nm</i>	256

### 2.3.7 Onduleur de tension triphasé

Un onduleur de tension triphasé est utilisé. Il est commandé par des signaux MLI. Ces signaux sont générés par le bloc VECT. Ce bloc représente une commande vectorielle à flux orienté. Il calcule entre autres les trois courants de référence des trois phases du moteur. Ainsi, les signaux MLI sont générés en utilisant un régulateur de courant triphasé. Le flux normalisé est calculé en tenant compte la vitesse de la machine pour effectuer une commande à affaiblissement de flux. La figure 2.22 montre le modèle Simulink de la machine électrique, le convertisseur triphasé et de sa commande [39].

La figure 2.23 présente les modèles du motopropulseur : le modèle complet et le modèle simplifié. Ce modèle de comparaison est inspiré des deux modèles des deux exemples démonstration (*ac6\_IPMSM.mdl*) et (*ac6\_example.mdl*) [39] disponibles dans l'environnement MATLAB/Simulink.

La figure 2.24 montre les résultats de simulation des deux modèles. Dans le modèle détaillé, l'onduleur est constitué d'un pont universel triphasé. On y utilise le modèle détaillé des IGBT. Le modèle simplifié quant à lui, utilise des modèles de commutateurs IGBT simplifiés comme celui présenté dans la section précédente. Il permet d'alléger la simulation sans trop fausser les résultats.

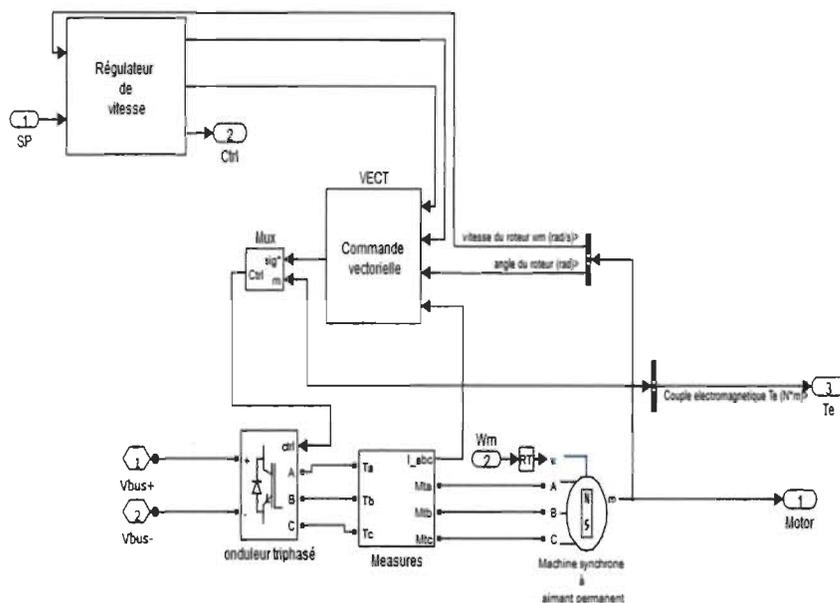


Figure 2.22 Modèle Simulink de la machine électrique, de l'onduleur triphasé et de sa commande

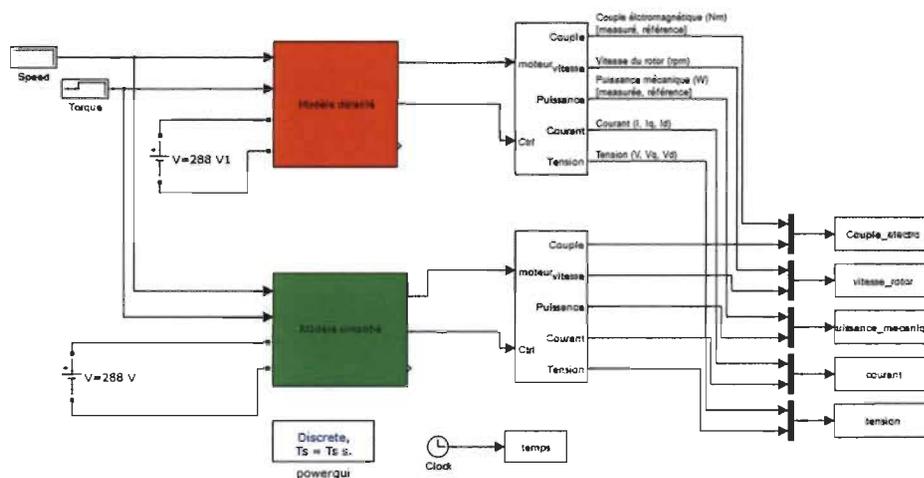


Figure 2.23 Modèle simplifié et modèle détaillé du motopropulseur [39]

À l'instant  $t = 0$  s, la vitesse de référence passe de 3000 *rpm* et la vitesse du rotor prend une rampe pour atteindre la vitesse de référence 3000 *rpm* et la puissance mé-

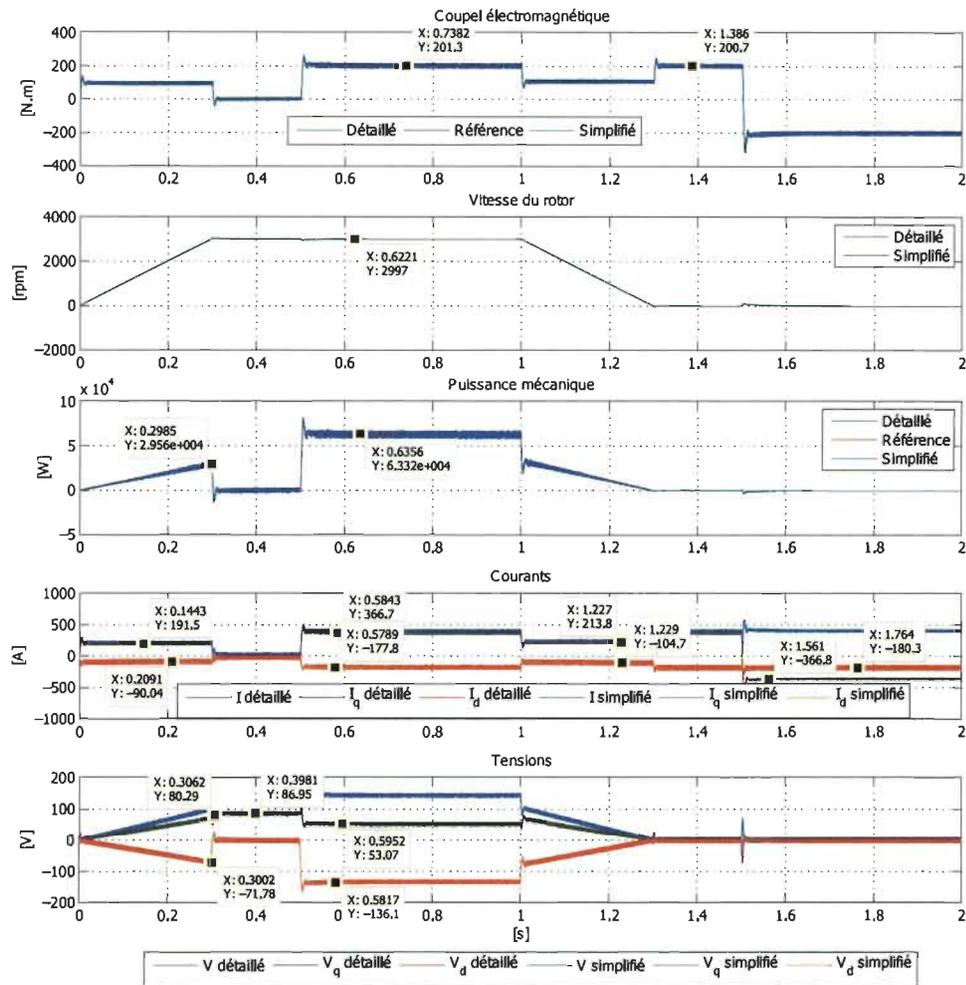


Figure 2.24 Résultats de simulation des deux modèles

canique  $29 \text{ kW}$  augmente au temps  $t = 0.3 \text{ s}$ . Le couple de référence appliqué sur la machine est de  $200 \text{ N.m}$ . Les courants et les tensions réagissent aussi à cette augmentation. Le courant du stator mesuré vaut  $I_q = 190 \text{ A}$  et  $I_d = -90 \text{ A}$ . La tension du stator  $V_q$  passe de  $0 \text{ V}$  à  $80 \text{ V}$  et  $V_d \approx -71 \text{ V}$ .

À l'instant  $t = 0.3 \text{ s}$ , la vitesse du rotor atteint  $3000 \text{ rpm}$  et le couple de référence appliqué sur la machine passe à  $0 \text{ N.m}$ . La puissance mécanique aussi passe à  $0 \text{ W}$ . Le courant du stator mesuré passe à  $I_q = I_d \approx 0 \text{ A}$ . La tension du stator  $V_q$  est  $87 \text{ V}$  et  $V_d \approx 0 \text{ V}$ .

À l'instant  $t = 0.5$  s, la vitesse du rotor est de 3000 *rpm*. Le couple de référence appliqué sur la machine passe à 200 *N.m*. La puissance mécanique aussi passe à 63 *kW*. Le courant du stator mesuré vaut à  $I_q = 366$  A et  $I_d = -177$  A. La tension du stator  $V_q = 53$  V et  $V_d \approx -136$  V.

De  $t = 1$  s à  $t = 1.3$  s, la vitesse de référence décroît de 3000 *rpm* à 0 *rpm*. La vitesse mesurée du rotor prend une rampe alors pour atteindre la vitesse de référence de 0 *rpm*. Le couple de référence appliqué sur la machine passe à 0 *N.m*. La puissance mécanique aussi décroît jusqu'à 0 *W*. Le courant du stator mesuré vaut  $I_q = 213$  A et  $I_d = -104$  A. La tension du stator décroît à  $V_q = V_d \approx 0$  V.

À  $t = 1.5$  s, La charge mécanique passe de 200 *N.m* à -200 *N.m*. La vitesse du moteur se stabilise très rapidement après un léger dépassement. La puissance mécanique est  $\approx 0$  *W*. Le courant du stator mesuré vaut  $I_q \approx -366$  A et  $I_d \approx -180$  A. La tension du stator vaut  $V_q = V_d = 0$  V.

Une perturbation est observée dans toutes les courbes présentées. Elle est causée par le changement brusque du couple de référence appliquée sur la machine.

## 2.4 Partie de la gestion d'énergie

Les stratégies d'optimisation et de gestion seront présentées dans les prochains chapitres. Ces méthodes assurent la distribution de l'énergie entre les différentes sources d'énergie et la charge pendant le fonctionnement du véhicule tout en maintenant l'état de charge de la source secondaire borné. On présentera dans l'ordre la stratégie à base de règles, la stratégie basée sur la logique floue, la commande optimale et la combinaison entre un prédicteur basé sur les chaînes de Markov et la commande optimale.

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a exposé les trois parties du véhicule hybride. Les différents éléments électriques et mécaniques de ce système ont été également décrits et modélisés en détail. La simulation de ces éléments dans l'environnement MATLAB/Simulink a été effectuée. Les résultats de simulation présentés confirment que l'utilisation des modèles simplifiés des interrupteurs à la place des modèles complets donne des résultats assez précis et réduit le temps de simulation. Dans les prochains chapitres, on exposera les différentes méthodes de gestion d'énergie avec les composants cités dans ce chapitre.

## CHAPITRE 3

### STRATÉGIE DE GESTION D'ÉNERGIE À BASE DE RÈGLES

#### Sommaire

<b>3.1</b>	<b>Introduction . . . . .</b>	<b>55</b>
<b>3.2</b>	<b>État de l'art sur les stratégies de gestion à base de règles . . . . .</b>	<b>55</b>
<b>3.3</b>	<b>Formulation mathématique de la stratégie à base de règles proposée</b>	<b>57</b>
3.3.1	Présentation de la méthode . . . . .	57
3.3.2	Développement de la méthode . . . . .	59
3.3.3	Description du modèle de simulation . . . . .	62
<b>3.4</b>	<b>Présentation des résultats de simulation . . . . .</b>	<b>65</b>
3.4.1	Configuration PAC/B . . . . .	67
3.4.1.1	Résultats de simulation pour le parcours urbain <b>UDDS</b>	67
3.4.1.2	Résultats de simulation pour le parcours autoroute <b>HWFET</b> . . . . .	70
3.4.1.3	Analyse des résultats dans la configuration PAC/B . . . . .	74
3.4.2	Configuration PAC/SC . . . . .	75
3.4.2.1	Résultats de simulation pour le parcours urbain <b>UDDS</b>	76
3.4.2.2	Résultats de simulation pour le parcours autoroute <b>HWFET</b> . . . . .	81
3.4.2.3	Analyse des résultats obtenus dans la configuration PAC/SC . . . . .	83
<b>3.5</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>88</b>

### 3.1 Introduction

Ce chapitre concerne la gestion d'énergie à base de règles (*BR*). On étudiera deux configurations : la première utilise la pile à combustible (*PAC*) avec une batterie (*B*) et dans la deuxième, la batterie est remplacée par un supercondensateur (*SC*). La stratégie sera implémentée et simulée sur ces deux configurations.

Cette stratégie est subdivisée en deux catégories [46] :

- ✓ **la stratégie à base de règles déterministes** qui est constituée de plusieurs règles déterminées soit par expertise, soit à l'aide des résultats d'un algorithme d'optimisation hors ligne.
- ✓ **la stratégie à base de règles floues** qui se base sur les concepts de la logique floue.

Dans ce chapitre seulement, la première catégorie est considérée. La stratégie à base de règles déterministes est abordée dans plusieurs travaux de recherche.

Ce chapitre est structuré en quatre sections. La section 3.2 aborde l'état de l'art des stratégies de gestion à base de règles. La section 3.3 décrit la stratégie à base de règles proposée. La section 3.4 présente les résultats de simulation obtenus et la section 3.5 expose la conclusion de ce chapitre.

### 3.2 État de l'art sur les stratégies de gestion à base de règles

La référence [47] détaille la stratégie de gestion d'énergie à multi-niveaux pour un véhicule électrique. Le niveau à long terme est à base de règles définies par expertises. Quant au niveau à court terme, l'optimisation est basé sur l'algorithme recuit simulé.

La référence [48] propose la réalisation d'une stratégie de gestion d'énergie en extrayant les règles de l'algorithme de la programmation dynamique *DP*. L'avantage de cette méthode est qu'elle est quasi-optimale, facile à implémenter et le temps de calcul n'est pas prohibitif.

La référence [49] présente également une stratégie de gestion à base de règles dont ces règles sont extraites à partir des solutions obtenues de la programmation dynamique.

La référence [50] compare la consommation d'hydrogène et l'état de charge final de la batterie de la stratégie à base de règles avec ceux obtenus à l'aide de la commande optimale. Il a été constaté que la consommation de l'hydrogène pour la stratégie à base de règle est supérieure à celle de la commande optimale.

La référence [51] propose une autre stratégie de gestion à base de règles. Ces règles ont été déduites à partir d'une étude sur le comportement du groupe motopropulseur et les solutions de la commande optimale.

La référence [52] compare les résultats de la stratégie à base de règles avec une stratégie basée sur la méthode de la répartition de la puissance optimale en temps réel (real-time power splitting methode). La stratégie proposée a mené à une consommation d'hydrogène 5% de moins que la stratégie à base de règles.

La référence [53] présente et compare deux méthodes de gestion à base de règles. La première est l'élaborée en se basant sur un algorithme de l'optimisation statique (the static optimization algorithm), et la deuxième est extraite à partir de la solution de la programmation dynamique.

### 3.3 Formulation mathématique de la stratégie à base de règles proposée

Dans cette section, on développe la stratégie de gestion à base de règles. La formulation mathématique ainsi que le modèle implémenté dans l'environnement Simulink sont exposés.

#### 3.3.1 Présentation de la méthode

La figure 2.2 du chapitre 2 présente le système retenu dans cette étude. Ce système comporte deux sources d'énergie : la pile à combustible et une source secondaire. Afin de déterminer la décision de distribuer l'énergie entre les sources d'énergie du système et de maintenir borné l'état de charge de la source secondaire, deux méthodes de gestion ont été combinées. La première est la méthode à base de règles. Son principal rôle est d'assurer la distribution de puissance entre les sources pendant le fonctionnement du véhicule. La deuxième méthode est la stratégie de minimisation de la consommation équivalente *ECMS*<sup>1</sup>. Elle est combinée avec la première afin de déterminer la décision de distribuer l'énergie entre les sources d'énergie et de maintenir l'état de charge de la batterie borné.

En résumé, les deux objectifs visés dans cette approche sont la minimisation de la consommation en hydrogène de la pile à combustible et le maintien de l'état de charge de la source secondaire borné.

L'algorithme proposé calcule la puissance demandée du motopropulseur, et déduit la puissance de la pile à combustible et la puissance de la source secondaire. Il gère aussi quatre modes de fonctionnement. La figure 3.1 illustre les différents modes de fonctionnement d'un véhicule hybride à pile à combustible.

1. **Mode moteur** : La pile à combustible fonctionne seule.

---

1. Equivalent Consumption Minimization Strategy

2. **Mode assisté** : La pile à combustible est assistée par la source secondaire dans la phase d'accélération.
3. **Mode recharge** : La pile à combustible recharge la source secondaire.
4. **Mode freinage** : La source secondaire récupère l'énergie du freinage du véhicule.

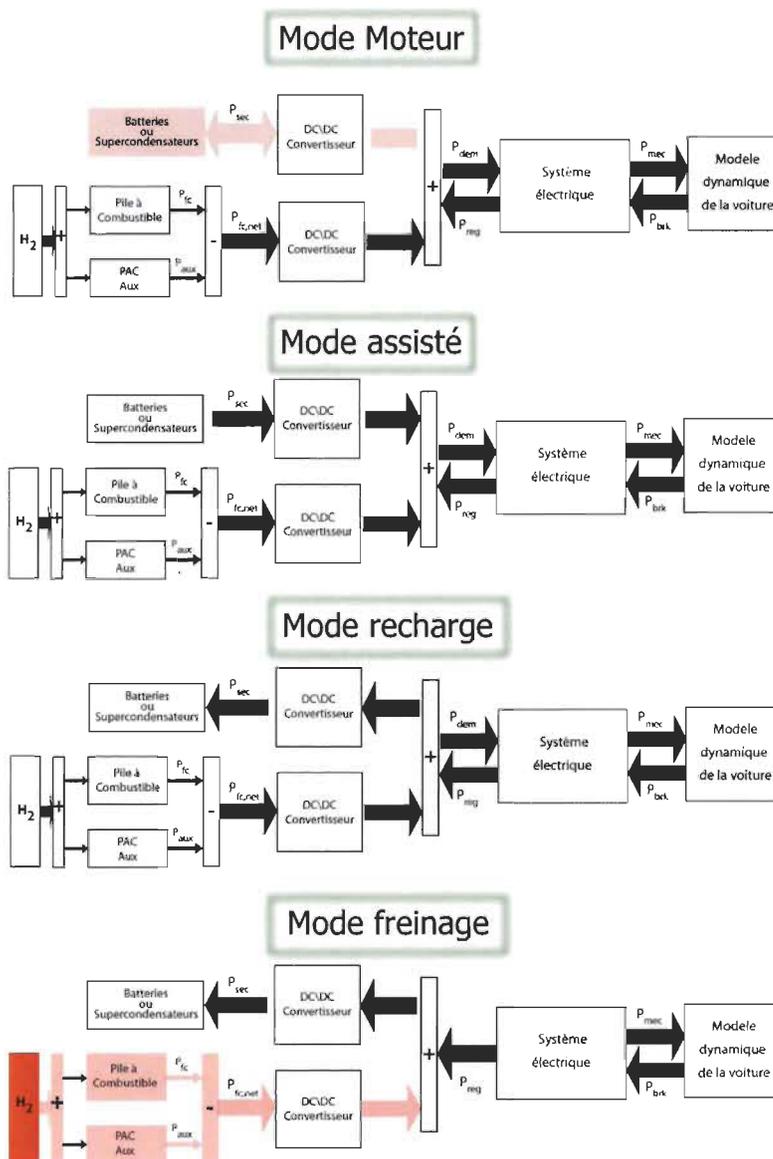


Figure 3.1 Différents modes de fonctionnement d'un véhicule hybride à pile à combustible

### 3.3.2 Développement de la méthode

La puissance demandée  $P_{dem}$  est la somme de la puissance du supercondensateur et la puissance nette fournie par la pile à combustible. Elle est donnée par l'équation (3.1).

$$P_{dem}(t) = P_{fc}(t) + P_{sec}(t) \quad (3.1)$$

Avec  $P_{sec}$  la puissance de la source secondaire. Elle peut être remplacée par la puissance de la batterie  $P_B$  ou par la puissance du supercondensateur  $P_{SC}$ .

L'objectif fixé dans la référence [17] vise à minimiser la consommation équivalente en hydrogène. La fonction coût dans ce cas est donnée par l'expression (3.2) [17].

$$J(t) = P_{H_2}(t) + s(t)P_{sec}(t) \quad (3.2)$$

Avec  $P_{H_2}(t)$  est la puissance de l'hydrogène de la pile à combustible,  $P_{sec}(t)$  est la puissance du supercondensateur ou batteries et  $s(t)$  est un facteur multiplicateur.

Dans la référence [17], on a défini ce facteur multiplicateur comme suit :

$$s(t) = p(t)s_{dis} + (1 - p(t))s_{chg} \quad (3.3)$$

Avec  $s_{dis}$  et  $s_{chg}$  sont deux constantes, et  $p(t)$  est un facteur de probabilité.

Dans notre cas, on reprend le même principe. Toutefois, dans la stratégie à base de règles qu'on propose, on définit la fonction coût à atteindre sous la forme de l'équation (3.4). Le facteur  $s(t)$  est calculé en fonction de la puissance et l'état de charge de la source secondaire par l'équation (3.5).

$$J(t) = P_{H_2}(t) + P_{sec}(t, s(t)) \quad (3.4)$$

$$s(t) = p(t)s_{dis}(t) + (1 - p(t))s_{chg}(t) \quad (3.5)$$

Avec  $s_{dis}$  et  $s_{chg}$  ne sont pas des constantes mais correspondent respectivement à la puissance de charge et de décharge de la source secondaire (de la batterie ou du supercondensateur).  $p(t)$  est un facteur compris entre 0 et 1, et il est calculé selon l'état de charge de la batterie ou du supercondensateur.

Lors de l'accélération du véhicule, la batterie ou le supercondensateur doit assister la pile à combustible selon son état de charge. Dans ce cas, trois possibilités sont distinguées. Quand l'état de charge de la source secondaire est inférieur à la valeur minimale  $SOC_{sec} < SOC_{sec.min}$ , compris entre la valeur minimale et maximale  $SOC_{sec.min} \leq SOC_{sec} \leq SOC_{sec.max}$  et supérieur à la valeur maximale  $SOC_{sec} > SOC_{sec.max}$ .

**Le premier cas** est observé lorsque  $SOC_{sec} < SOC_{sec.min}$ . Dans ce cas, la source secondaire ne peut pas assister la pile à combustible et cette dernière doit fournir la puissance demandée plus la puissance nécessaire pour rétablir l'état de charge de la source secondaire à  $SOC_{sec} \geq SOC_{sec.min}$ . L'équation (3.6) décrit la puissance de décharge de la source secondaire avec le facteur  $p(t)$  égal à 1. L'équation (3.7) décrit la puissance de la source secondaire et l'équation (3.8) donne la puissance de la pile à combustible.

$$s_{dis}(t) = -(1 - SOC(t))Q_{max}V_{sec}(t) \quad (3.6)$$

$$P_{sec}(t) = P_{sec}(t-1) + s_{dis}(t) \quad (3.7)$$

$$P_{fc}(t) = P_{dem}(t) + P_{sec}(t) \quad (3.8)$$

**Le deuxième cas** est observé lorsque  $SOC_{sec} > SOC_{sec.max}$ . Alors, la source secondaire assiste la pile à combustible jusqu'à ce que son état de charge s'approche de  $SOC_{sec} < SOC_{sec.min}$ . L'équation (3.9) exprime la puissance de charge de la source secondaire avec un facteur  $p(t)$  dans ce cas égal à 0. Les équations (3.10) et (3.11) décrivent respectivement

la puissance de la source secondaire et la puissance de la pile à combustible.

$$s_{chg}(t) = -(SOC_0 - SOC(t))Q_{max}V_{sec}(t) \quad (3.9)$$

$$P_{sec}(t) = P_{sec}(t-1) - s_{chg}(t) \quad (3.10)$$

$$P_{fc}(t) = P_{dem}(t) - P_{sec}(t) \quad (3.11)$$

**Le troisième cas** est observé lorsque  $SOC_{sec.min} \leq SOC_{sec} \leq SOC_{sec.max}$ . Dans ce cas, la source secondaire assiste la pile à combustible et sa puissance s'exprime par l'équation (3.12).

$$P_{sec}(t) = P_{dem}(t) - P_{fc}(t) \quad (3.12)$$

Lors d'une décélération ou d'un freinage du véhicule, la pile à combustible fournit une puissance minimale (équation (3.13)) et la source secondaire récupère la puissance du freinage, et cette puissance minimale est produite par la pile à combustible. La puissance de la source secondaire est donnée par l'équation (3.14).

$$P_{fc}(t) = P_{fc.min} \quad (3.13)$$

$$P_{sec}(t) = P_{dem}(t) + P_{fc.min} \quad (3.14)$$

Lorsque le véhicule est à l'arrêt, la pile à combustible fournit une puissance minimale selon l'équation (3.15), et la source secondaire récupère la puissance minimale de la pile à combustible tel que décrit par l'équation (3.16).

$$P_{fc}(t) = P_{fc.min} \quad (3.15)$$

$$P_{sec}(t) = P_{fc.min} \quad (3.16)$$

Ces règles sont soumises à des contraintes liant les sources d'énergie. Ces contraintes s'expriment par l'équation (3.17).

$$\begin{cases} P_{fc.min} \leq P_{fc} \leq P_{fc.max} \\ P_{sec.min} \leq P_{sec} \leq P_{sec.max} \\ SOC_{sec.min} \leq SOC_{sec} \leq SOC_{sec.max} \end{cases} \quad (3.17)$$

Si elle dépasse sa valeur maximale, la puissance de la source secondaire est maintenue à la valeur minimale selon l'équation (3.18), et la pile à combustible fournit cette différence tel qu'indiqué dans l'équation (3.19).

$$P_{sec}(t) = \begin{cases} P_{sec.max} & \text{si } P_{sec}(t) > P_{sec.max} \\ P_{sec}(t) & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.18)$$

$$P_{fc}(t) = \begin{cases} P_{dem}(t) - P_{sec.max} & \text{si } P_{sec}(t) > P_{sec.max} \\ P_{fc}(t) & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.19)$$

### 3.3.3 Description du modèle de simulation

La figure 3.2 montre une représentation schématique de l'algorithme à base de règles. Cet algorithme est implémenté dans l'environnement Simulink et il est détaillé dans la figure 3.3. Les entrées de ce modèle sont la tension, le courant mesuré aux bornes de la source secondaire ainsi que son état de charge, la tension et le courant mesurés aux bornes de la pile à combustible, la puissance demandée par le groupe motopropulseur, et enfin, le signal issu de la pédale d'accélérateur.

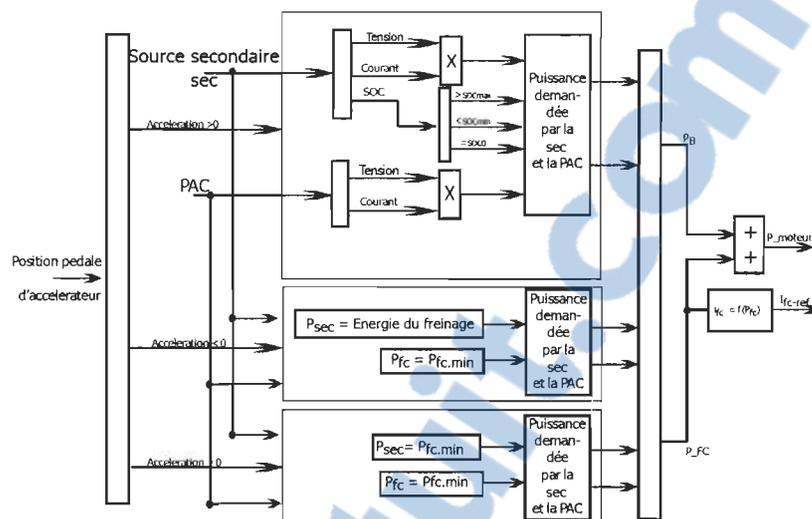


Figure 3.2 Représentation schématique de l'algorithme à base de règles

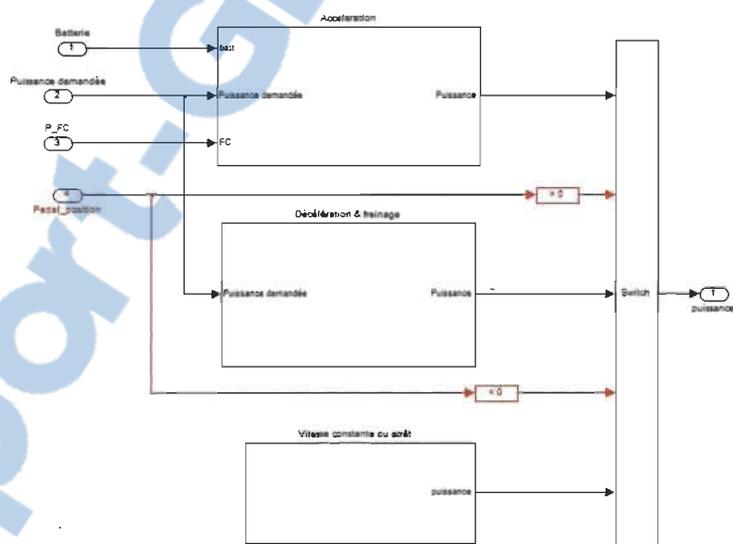
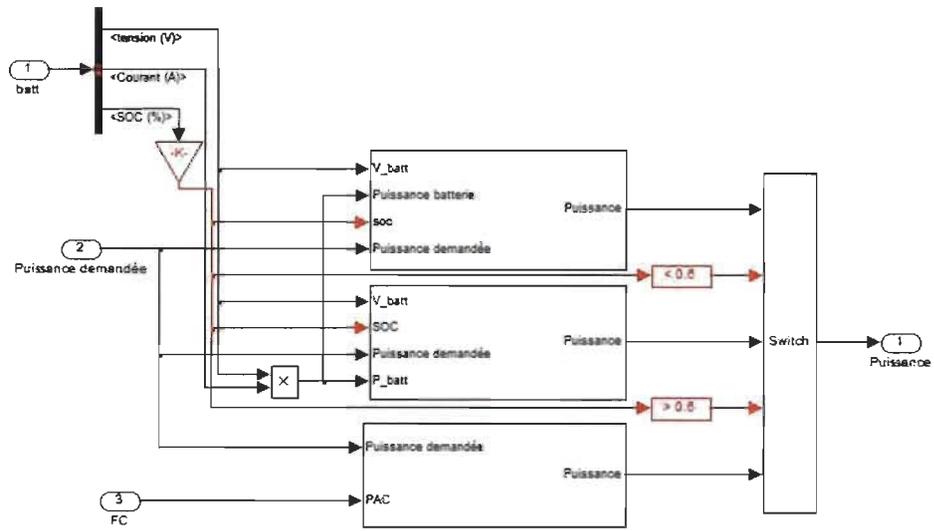
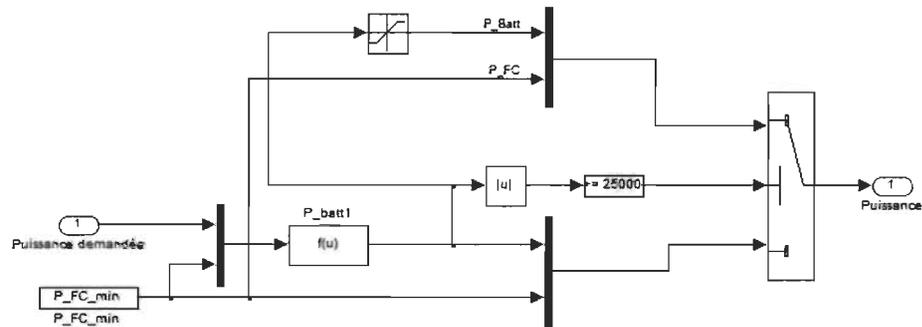


Figure 3.3 Modèle Simulink de l'algorithme à base de règles

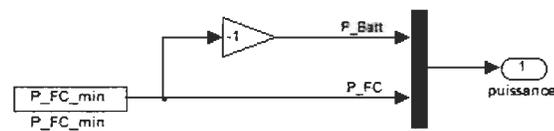
Ce modèle comporte aussi trois blocs. Lors de l'accélération, le premier bloc est activé. Le contenu de ce bloc est montré par la figure 3.4.(a).



(a)



(b)



(c)

Figure 3.4 Blocs de calcul de la puissance de la batterie et la pile à combustible (a) Lors de l'accélération du véhicule, (b) Lors de la décélération ou freinage du véhicule et (c) Quand l'accélération du véhicule est nulle

On distingue trois sous-blocs qui calculent la puissance de la batterie et la pile à combustible lors de l'accélération du véhicule en fonction l'état de charge de la source secondaire. Ces sous-blocs sont détaillés dans la figure 3.5. Elle représente les blocs de calcul de la puissance de la batterie et la pile à combustible lors de l'accélération du véhicule. La figure 3.5.(a) représente le bloc de calcul de la puissance de la pile à combustible et de la batterie lors de l'accélération du véhicule quand l'état de charge de la batterie est supérieur à  $SOC_{sec,max}$  (dans notre cas  $SOC_{sec,max} > 60\%$ ). La figure 3.5.(b) montre le bloc de calcul de la puissance de la pile à combustible et la puissance de la batterie lors de l'accélération du véhicule quand l'état de charge de la batterie est supérieur à  $SOC_{sec,min}$  (dans notre cas  $SOC_{sec,min} < 60\%$ ). La figure 3.5.(c) détaille le bloc de calcul de la puissance de la pile à combustible et la puissance de la batterie lors de l'accélération du véhicule quand l'état de charge de la batterie est encadré entre les valeurs extrémales  $SOC_{sec,max}$  et  $SOC_{sec,min}$  ( $SOC_{sec,min} < SOC_{sec} < SOC_{sec,max}$  dans notre cas  $SOC = 60\%$ ). Lors de la décélération ou du freinage, le deuxième bloc de la figure 3.4.(b) est activé, et enfin quand le véhicule est à l'arrêt ou à une accélération nulle, le troisième bloc de la figure 3.4.(c) est activé

### 3.4 Présentation des résultats de simulation

La stratégie de gestion d'énergie en temps réel proposée a été simulée en utilisant le modèle dynamique du véhicule développé dans l'environnement MATLAB/Simulink [40].

On va présenter et analyser les résultats de deux configurations : la première utilise une pile à combustible comme source principale et une batterie comme source secondaire. Alors que, la deuxième configuration utilise une pile à combustible et un supercondensateur.

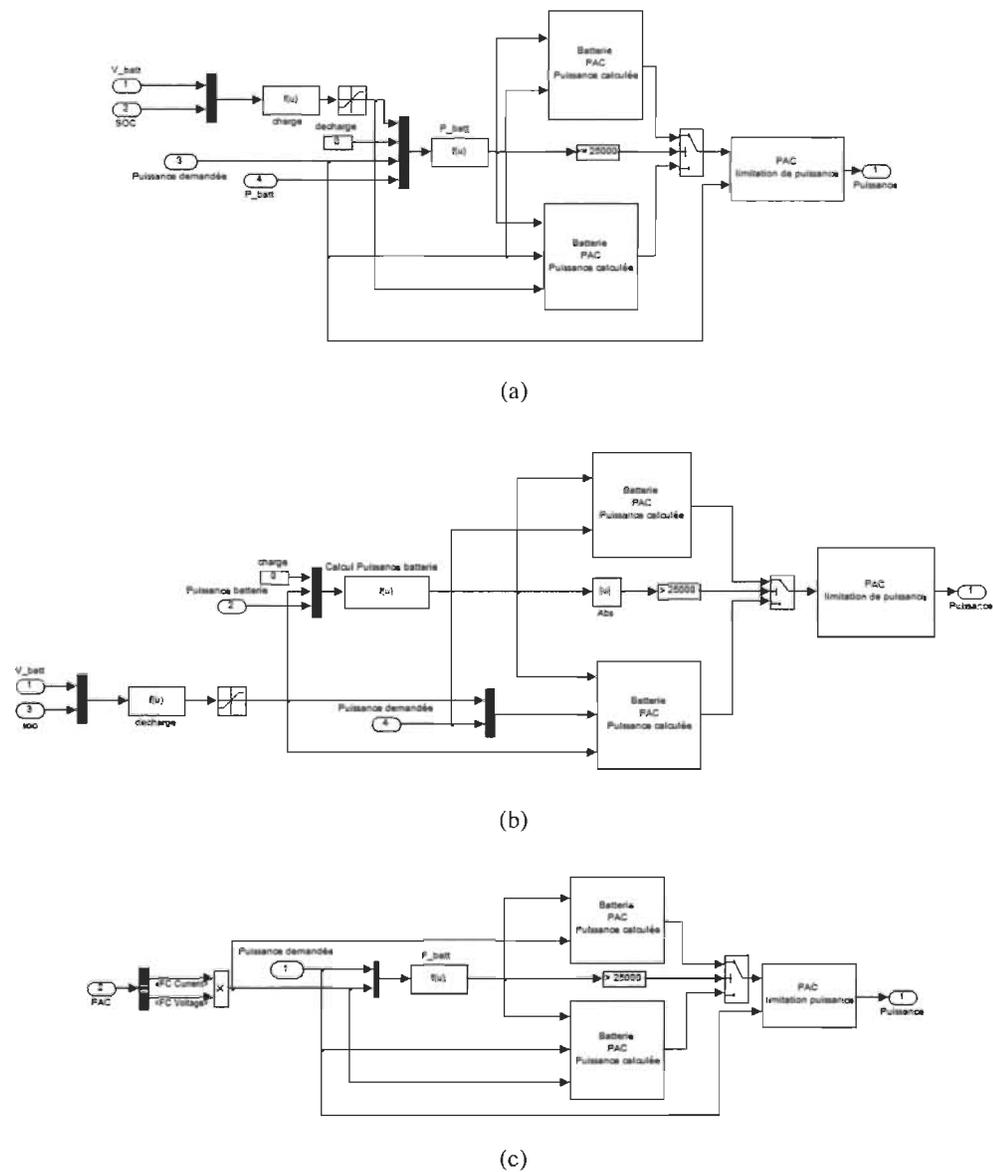


Figure 3.5 Blocs de calcul de la puissance de la batterie et la pile à combustible lors de l'accélération du véhicule (a) État de charge supérieur à  $SOC_{max}$ , (b) État de charge inférieur à  $SOC_{min}$ , et (c) État de charge entre  $SOC_{min} < SOC < SOC_{max}$

L'algorithme a été testé pour deux cycles de roulage : le cycle urbain **UDDS**<sup>2</sup>, et le cycle autoroute **HWFET**<sup>3</sup>. Les conditions de roulage du véhicule ont été changées pour chaque cycle afin de comparer les résultats et d'en déduire l'efficacité de cette stratégie. Deux masses du véhicule  $m_v = 1600 \text{ kg}$  et  $m_v = 2000 \text{ kg}$  ont été considérées.

Dans chacun des cas, on tracera la vitesse de référence, la vitesse du véhicule, la puissance du moteur, la puissance de la pile à combustible, la puissance du dispositif de stockage et son état de charge, le courant de la pile à combustible, le courant du dispositif de stockage, et en fin, la consommation en air et en hydrogène.

### 3.4.1 Configuration PAC/B

#### 3.4.1.1 Résultats de simulation pour le parcours urbain UDDS

La figure 3.6 présente les résultats de simulation obtenus lors du parcours **UDDS** pour une masse du véhicule  $m_v$  égale à  $1600 \text{ kg}$ . Dans cette figure, on remarque que lors des freinages répétitifs et à basse demande de puissance, la batterie accumule de l'énergie. La même remarque s'applique à la situation pour une masse du véhicule  $m_v$  égale à  $2000 \text{ kg}$ .

D'après les résultats, on voit que batterie assiste la pile à combustible lors des accélérations et elle transfère donc une partie de son énergie stockée. Dans le parcours **UDDS** à partir de l'instant  $t = 300 \text{ s}$ , il y a une répétition de freinages. Dans ce cas, la batterie accumule cette puissance et transfère une partie lors des accélérations.

L'état de charge à la fin du parcours est égal à  $SOC_B = 71 \%$ . Il appartient certes à un interval borné, mais son augmentation est inquiétante. La batterie assiste aussi la pile à combustible avec une faible puissance lors des accélérations ce qui favorise l'augmentation de son état de charge avec les freinages répétitifs.

---

2. Dynamometer Driving Schedule

3. The Highway Fuel Economy Driving Schedule

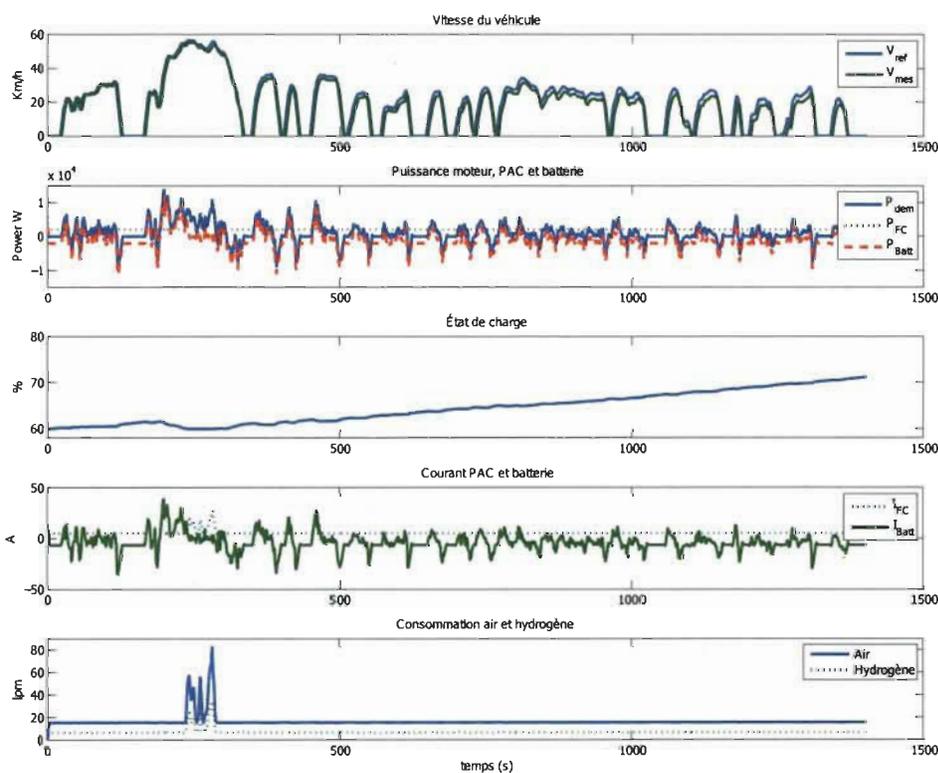


Figure 3.6 Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour le parcours **UDDS** avec la configuration PAC/B

La figure 3.7 présente les résultats obtenus lors du parcours **UDDS** pour une masse du véhicule égale à  $m_v = 1600 \text{ kg}$ . La première courbe de cette figure représente la vitesse de référence du parcours transmise par le conducteur au pédale d'accélération du véhicule. Ce parcours dure  $1400 \text{ s}$ . La vitesse du véhicule est mesurée pendant son fonctionnement. On observe que cette dernière suit la vitesse de référence avec une erreur minime, ce qu'on cherche à réaliser.

Sur la deuxième courbe, on a superposé la puissance demandée par le moteur, la puissance de la pile à combustible et la puissance de la batterie. La puissance demandée par le moteur électrique est la somme des deux puissances : celle de la pile à combustible et celle de la batterie. La puissance de la pile à combustible tracée est la puissance nette sans la puissance auxiliaire.

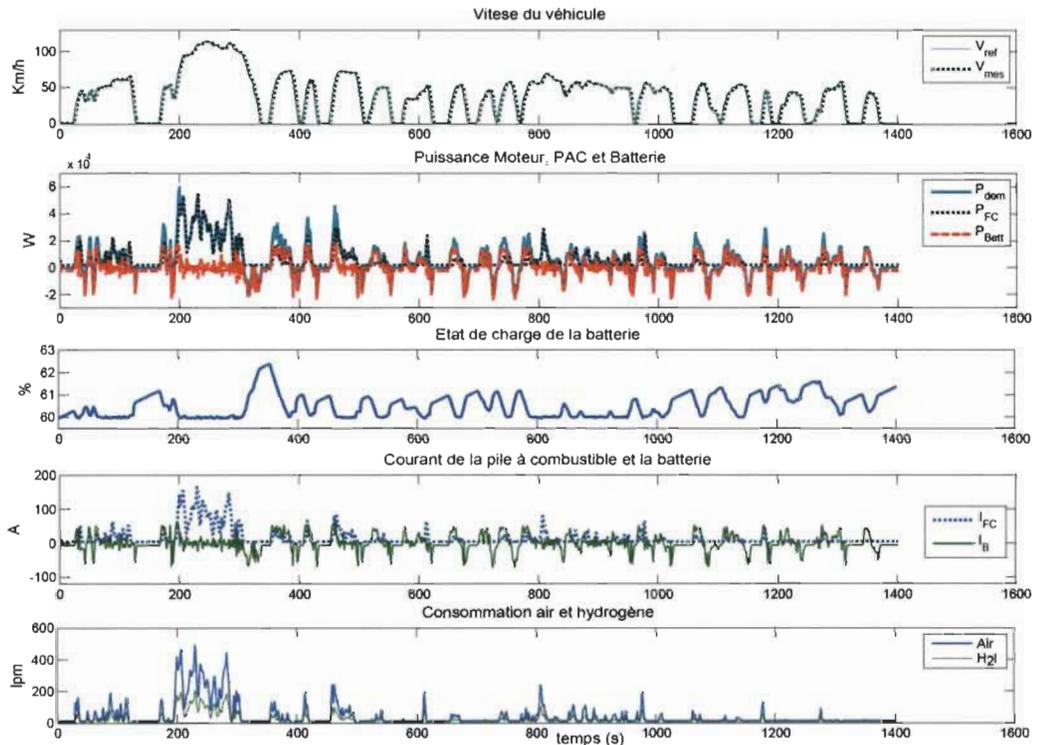


Figure 3.7 Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour  $m_v = 1600 \text{ kg}$  et  $V = 2 \times V_{ref}$  de la configuration PAC/B

On voit bien que la batterie se charge en récupérant la puissance du freinage et/ou la pile à combustible quand son état de charge est inférieur à  $SOC_{min}$ . Elle assiste aussi la pile à combustible lors de l'accélération du véhicule quand son état de charge est encadré entre la valeur maximale et la valeur minimale ( $SOC_{min} < SOC < SOC_{max}$ ).

L'état de charge de la batterie est indiqué sur la troisième courbe. Il est égal à 60 % au début de la simulation, et doit être maintenu borné ( $SOC_{min} < SOC < SOC_{max}$ ) pendant le fonctionnement du véhicule jusqu'à la fin du trajet. Dans notre cas, on a fixé la valeur de l'état de charge initiale à  $SOC = 60 \%$ . On estime à partir de la courbe une différence inférieure à 3 %. Elle est due à la nature du modèle dynamique du véhicule. D'où intérêt de travailler avec des modèles dynamiques qui traduisent fidèlement le comportement réel du système à étudier.

Le courant de la batterie et celui de la pile à combustible sont montrés sur la quatrième

courbe. Enfin, la dernière courbe illustre la consommation d'air et d'hydrogène par la pile à combustible. Toutes ces variables suivent bien le comportement réel du système.

La figure 3.8 présente les résultats obtenus du parcours précédent, mais pour une masse du véhicule  $m_v$  égale à  $2000 \text{ kg}$ . On remarque que, pour cette masse, une légère différence entre la vitesse du véhicule et la vitesse de référence. Elle est due aux temps de freinage qui ne sont pas assez long pour stabiliser le véhicule avec cette masse. Le temps d'accélération n'est pas aussi assez long pour atteindre la vitesse souhaitée.

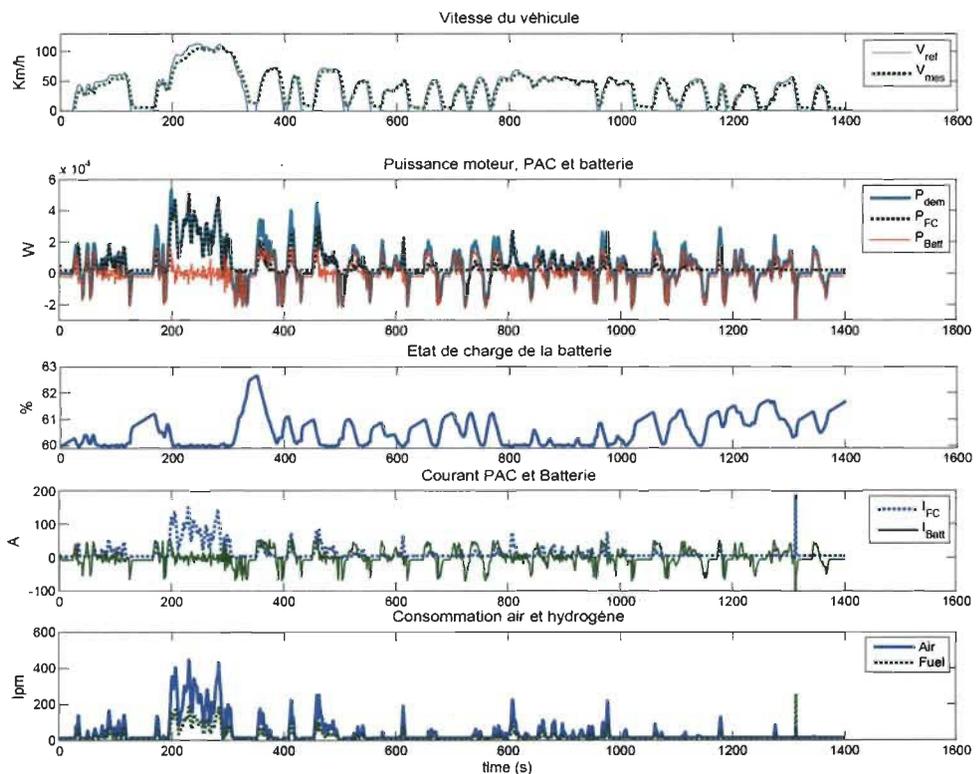


Figure 3.8 Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour  $m_v = 2000 \text{ kg}$  et  $V = 2 \times V_{ref}$  de la configuration PAC/B

### 3.4.1.2 Résultats de simulation pour le parcours autoroute HWFET

La figure 3.9 donne les résultats de la stratégie à base de règles pour  $m_v = 1600 \text{ kg}$  et  $V = V_{ref}$  lorsque la configuration PAC/B est utilisée. Dans ce parcours, la vi-

tesse maximale mesurée est environ  $\approx 60 \text{ km/h}$ , et la puissance demandée maximale est  $P_{dem,max} = 10 \text{ kW}$ . Durant ce parcours la puissance demandée est fournie par la pile à

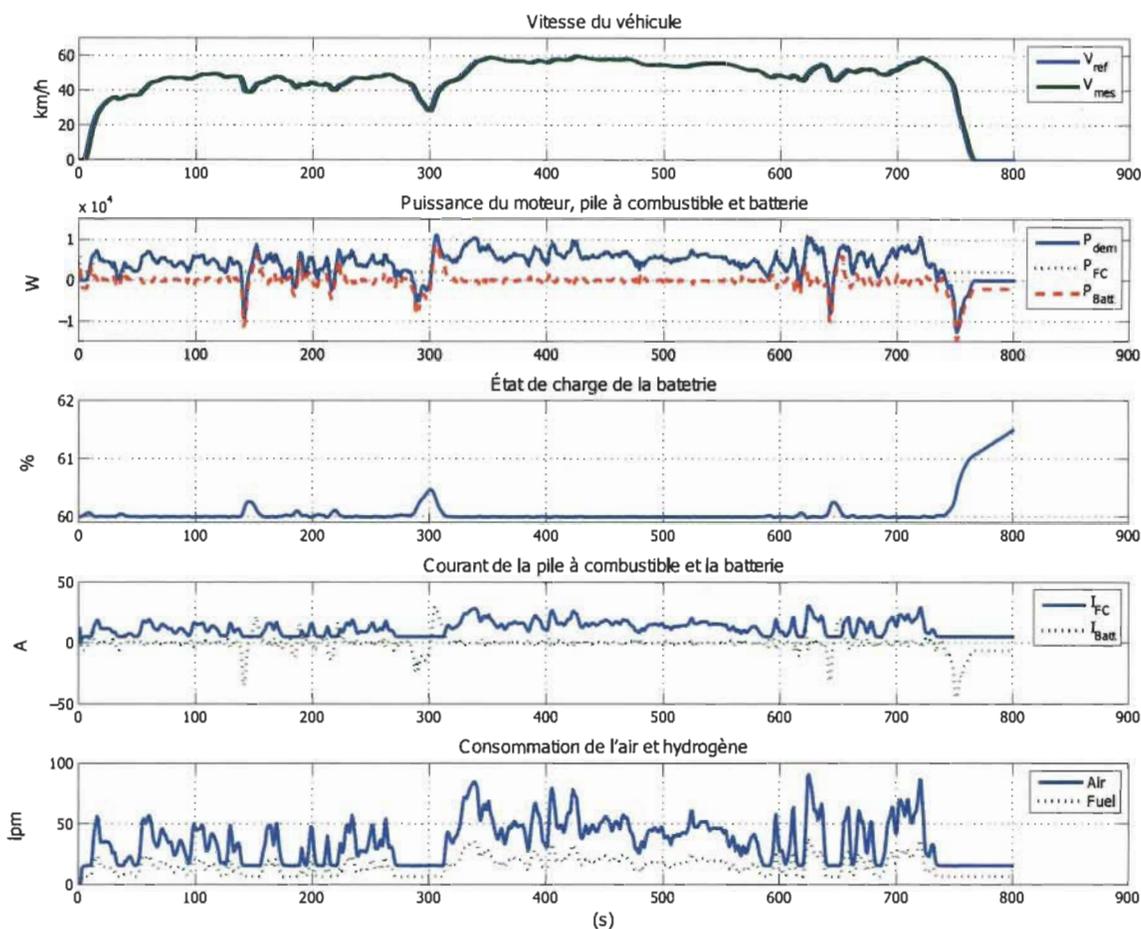


Figure 3.9 Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour  $m_v = 1600 \text{ kg}$  et  $V = V_{ref}$  dans le cas de la configuration PAC/B

combustible à l'exception lors un changement de puissance ou une augmentation de vitesse. Dans ce cas, la batterie n'assiste la pile à combustible que lorsque son état de charge est supérieur à la valeur test fixée à  $SOC_B = SOC_0 = 60\%$ . En plus, la batterie récupère la puissance des freinages ou des décélérations du véhicule (courant négatif). L'état de charge de la batterie présenté sur cette figure, reste au voisinage de son état de charge initial et la valeur test fixée à  $SOC_B = SOC_0 = 60 \%$ .

La figure 3.10 présente les résultats pour une masse  $m_v = 2000 \text{ kg}$  et  $V = V_{ref}$ . Les

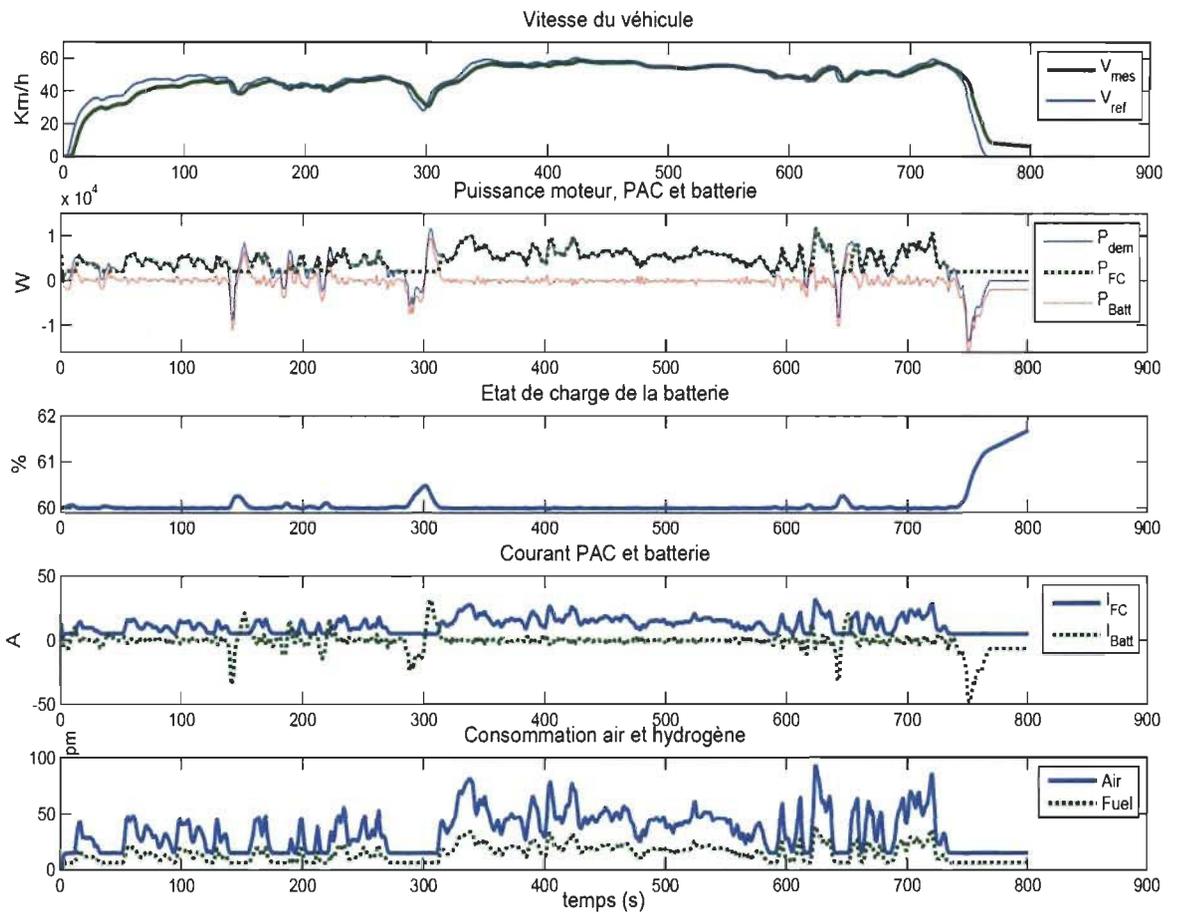


Figure 3.10 Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour  $m_v = 2000 \text{ kg}$  et  $V = V_{ref}$  de la configuration PAC/B

mêmes constatations sont observées sur la figure précédente. La pile à combustible fournit pratiquement la totalité de la puissance demandée. En effet, la batterie assiste la pile à combustible lors des accélérations seulement si son état de charge est supérieur à la valeur test imposée dans l'algorithme de gestion.

La figure 3.11 et la figure 3.12 montrent respectivement les résultats de cette stratégie lorsque la vitesse est doublée, c'est à dire pour  $m_v = 1600 \text{ kg}$ ,  $V = 2 \times V_{ref}$  et  $m_v = 2000 \text{ kg}$ ,  $V = 2 \times V_{ref}$  de la configuration PAC/B. Dans ce parcours, la vitesse maximale mesurée est de  $120 \text{ km/h}$  et la puissance maximale demandée est  $P_{dem,max} = 50 \text{ kW}$ . Les mêmes remarques lors du cas précédents sont aussi valables lorsque la vitesse est

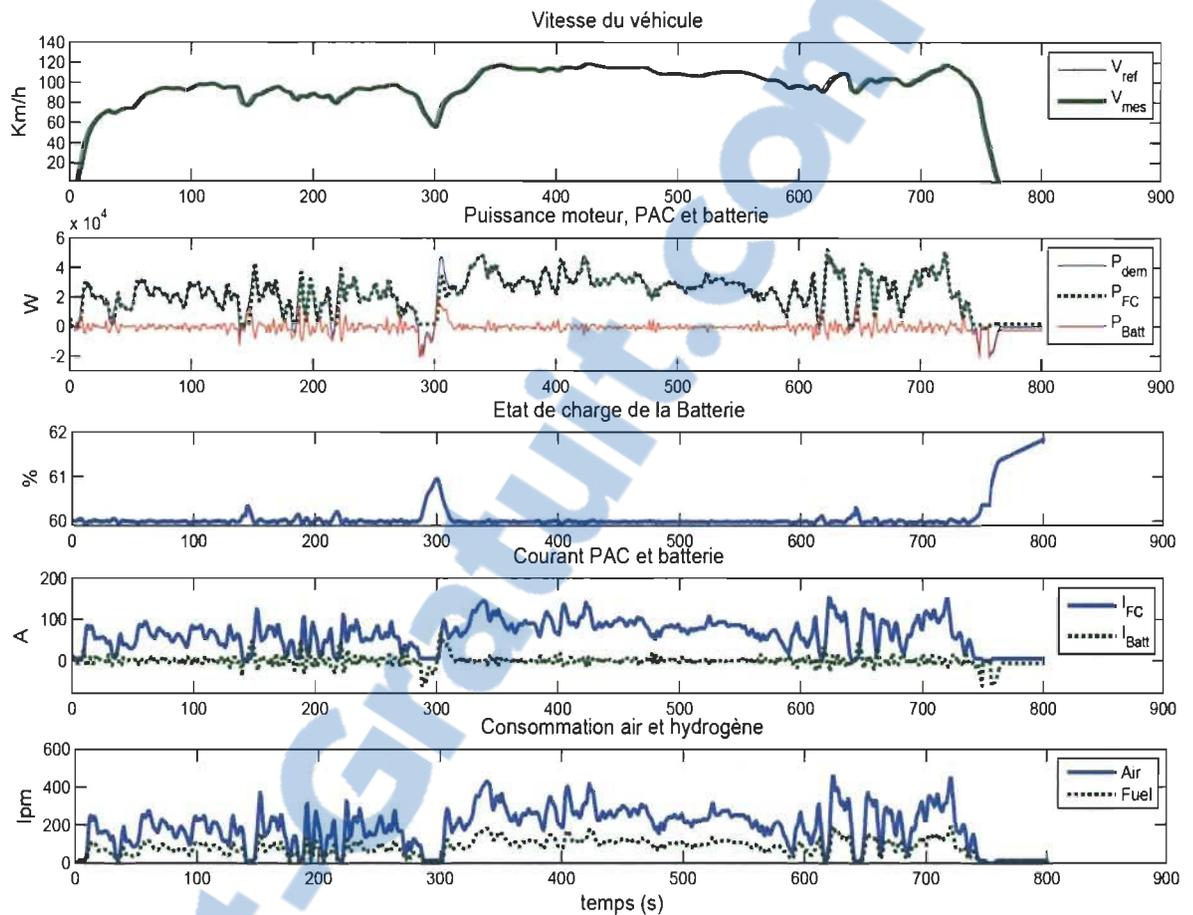


Figure 3.11 Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour  $m_v = 1600 \text{ kg}$  et  $V = 2 \times V_{ref}$  de la configuration PAC/B

doublée.

Par contre, pour la masse  $m_v = 2000 \text{ kg}$ , un temps d'accélération et décélération plus long est requis pour atteindre la vitesse voulue et compenser le poids de véhicule, devra donner les mêmes résultats que ceux avec la masse  $m_v = 1600 \text{ kg}$ .

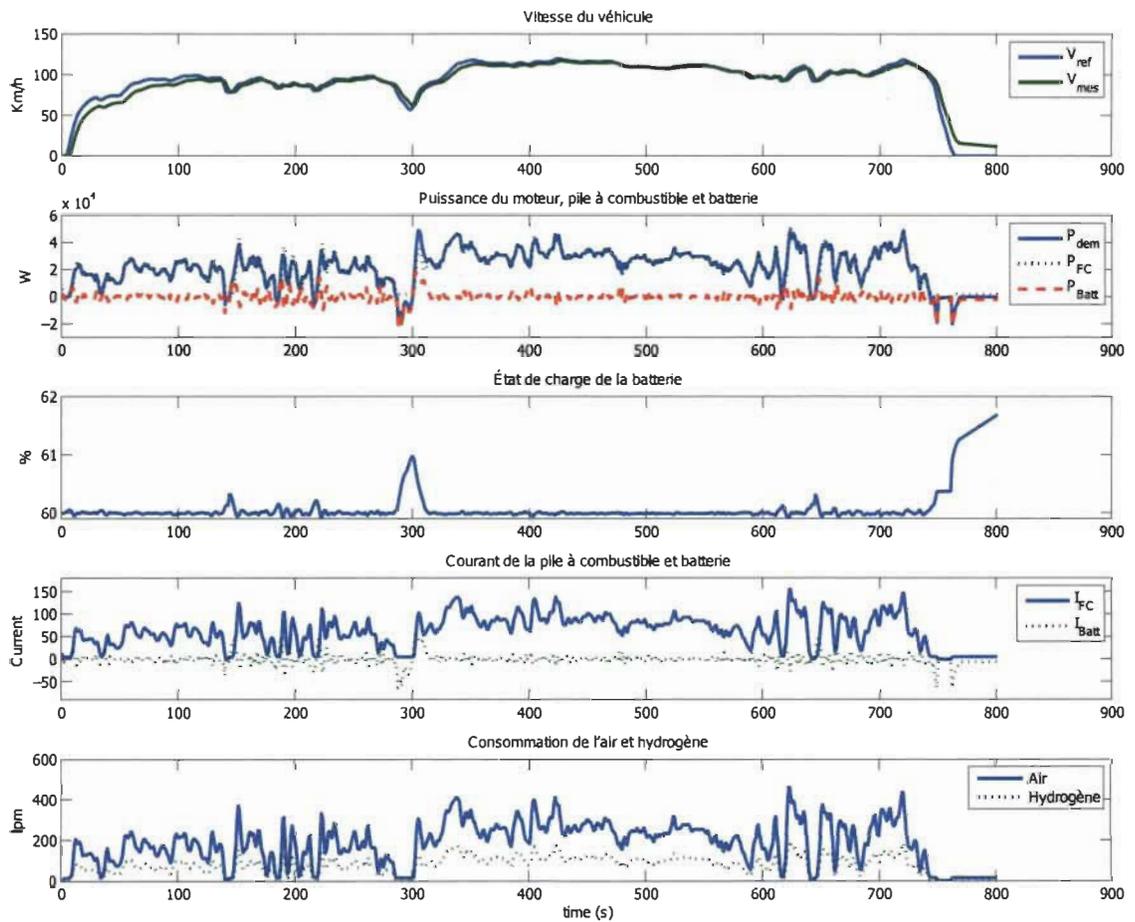


Figure 3.12 Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour  $m_v = 2000 \text{ kg}$  et  $V = 2 \times V_{ref}$  de la configuration PAC/B

### 3.4.1.3 Analyse des résultats dans la configuration PAC/B

Dans cette section, l'algorithme de la stratégie à base de règles a été implémenté pour un véhicule à pile à combustible et une batterie. Cet algorithme est basé sur un état de charge test fixé au voisinage de l'état de charge initial  $SOC_B = SOC_0 = 60\%$ .

L'objectif visé avec l'utilisation de cet algorithme est que la batterie épaulé la pile à combustible pendant l'accélération et récupère la puissance de freinage ou de décélération du véhicule. L'état de charge doit rester borné  $SOC_{min} < SOC < SOC_{max}$ . C'est à dire, il doit varier autour de sa valeur initiale. Or les résultats de simulation pour les différentes

vitesse, les deux parcours parcourus et conditions de roulage montrent que l'objectif n'a pas été atteint. En effet, la batterie n'est pas assez sollicitée durant le parcours sauf dans le cas où elle récupère la puissance de freinage. Dans ce cas, elle épaulage la pile à combustible jusqu'à ce qu'elle atteigne la valeur test  $SOC_B = SOC_0 = 60\%$ .

Dans la prochaine partie, on va considérer la configuration pile à combustible et supercondensateur (PAC/SC).

### 3.4.2 Configuration PAC/SC

La configuration PAC/SC et le bloc de la stratégie à base de règles sont montrés sur la figure 3.13. Dans cette configuration, l'alimentation se compose d'une pile à combustible

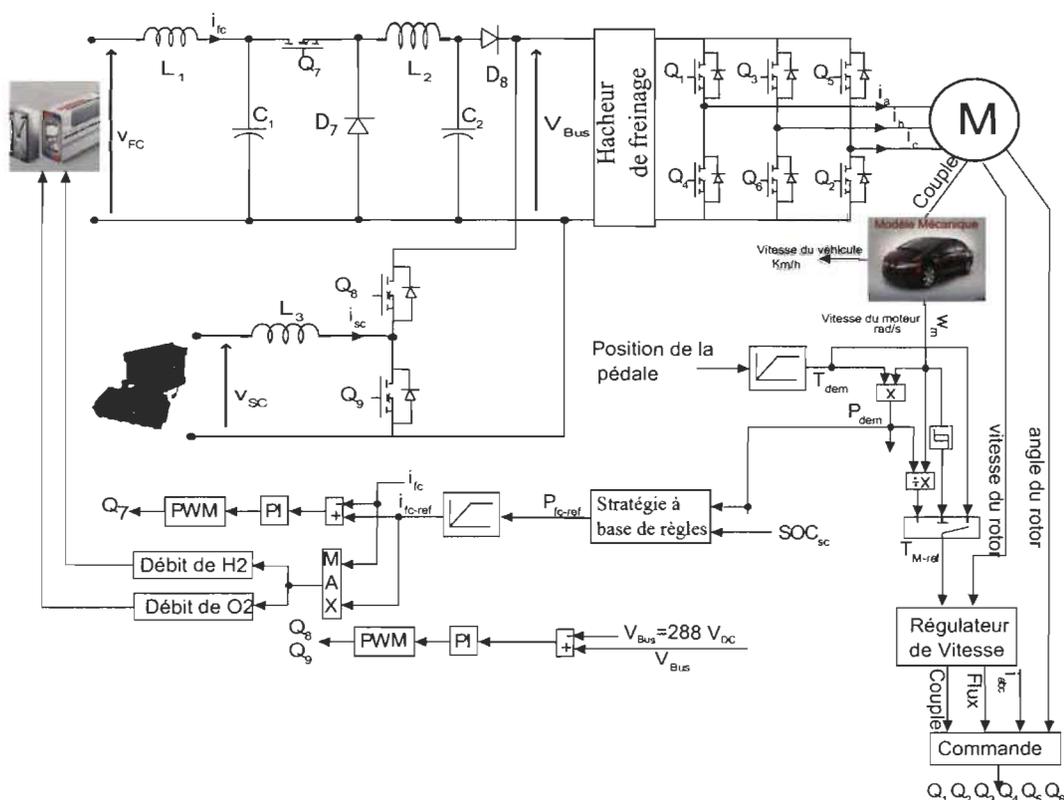


Figure 3.13 Configuration PAC/SC et le bloc de la stratégie à base de règles

et un supercondensateur. Ce dernier connecté au bus CC par l'intermédiaire d'un hacheur

abaisseur/élevateur bidirectionnel en courant. La pile à combustible est connectée au bus CC via un hacheur abaisseur. La machine électrique est alimentée via un onduleur triphasé.

On y trouve aussi les blocs de régulation et de génération de signaux MLI pour le hacheur abaisseur (buck) et le hacheur abaisseur/élevateur (buck/boost). La puissance de la pile à combustible est calculée dans le bloc de gestion d'énergie basé sur la stratégie à base de règles. Le courant de référence de la pile à combustible est ainsi déduit. Pour la commande du hacheur abaisseur/élevateur, la tension du bus de référence est fixée à  $V_{Bus} = 288 V$ . Cette tension correspond à la tension nominale de la machine électrique.

Pour limiter le nombre des règles et assouplir l'algorithme, le deuxième et le troisième cas seront combinés dans le cas d'accélération. Dans le cas de configuration pile à combustible et batterie, l'état de charge a été fixé à  $SOC_B = SOC_0 = 60 \%$ . Avec cette valeur test, l'état de charge de la batterie oscille autour de cette valeur et donc autour de son état de charge initial, et à basse vitesse, la batterie accumule la puissance de freinage sans pouvoir la transférer lors des accélérations.

Alors que dans le cas de la configuration pile à combustible et supercondensateur, l'état de charge initial est fixé à  $SOC_{sc} = SOC_{sc.min} = 40\%$ . Avec cette valeur, le superconducteur peut fournir de la puissance jusqu'à son état de charge minimum.

#### 3.4.2.1 Résultats de simulation pour le parcours urbain UDSS

Les résultats de simulation pour le parcours urbain sont représentés dans les figures 3.14 à 3.19. Dans chaque figure, les vitesses de référence des différents parcours routiers ainsi que les vitesses mesurées sont tracées dans la première courbe. La puissance fournie au moteur et les puissances demandées à la pile à combustible et au supercondensateur sont superposées et tracées sur la deuxième courbe. L'état de charge du supercon-

densateur est tracé sur la troisième courbe, suivi par la courbe des courants des sources. La consommation instantanée de l'air et l'hydrogène est présentée à la dernière courbe.

Les figures 3.14 et 3.15 donnent les résultats de simulation pour différentes conditions de roulage du véhicule pour le parcours routier **UDDS**. Dans ces tests, les masses  $m_v =$

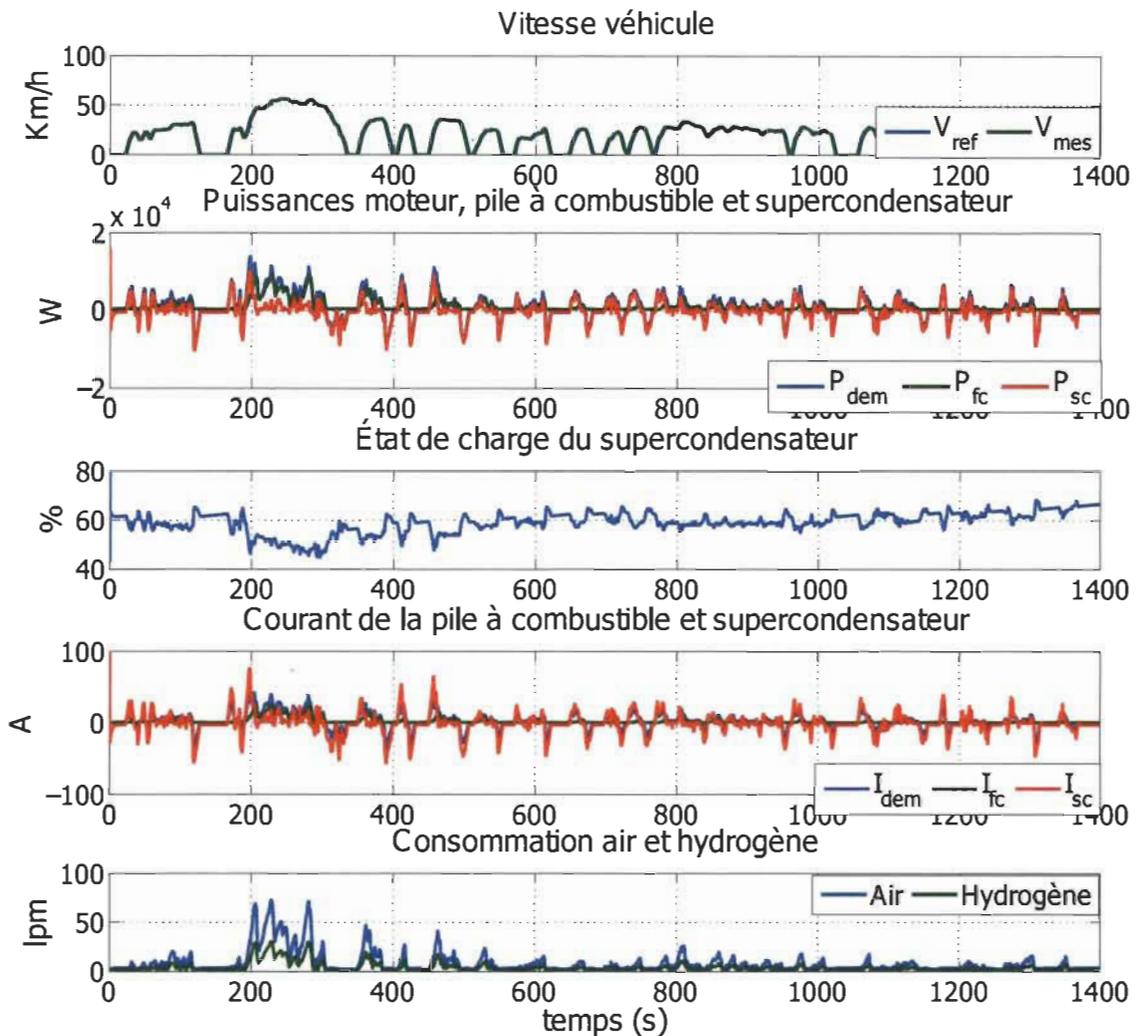


Figure 3.14 Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour  $m_v = 1625\text{kg}$  et  $V = V_{ref}$  pour la configuration PAC/SC

$1625\text{ kg}$  et  $m_v = 2500\text{ kg}$  ont été considérées. Dans ce parcours, la vitesse maximale mesurée est environ  $60\text{ km/h}$  et les puissances demandées maximales mesurées pour les deux figures valent respectivement  $P_{dem,max} = 14\text{ kW}$  et  $P_{dem,max} = 20\text{ kW}$ .

L'état de charge du supercondensateur est montré sur la troisième courbe. L'état de charge initial à l'instant  $t = 0$  s est égal à 60 %. Sur les deux figures 3.14 et 3.15, l'état de charge minimum que le supercondensateur peut atteindre durant ce parcours est  $SOC_{sc} = 44.8$  % pour une masse de  $m_v = 1625$  kg et  $SOC_{sc} = 40$  % pour une masse de  $m_v = 2500$  kg. À la fin du parcours, il vaut respectivement  $SOC_{sc} = 66.8$  % et  $SOC_{sc} = 64.6$  %.

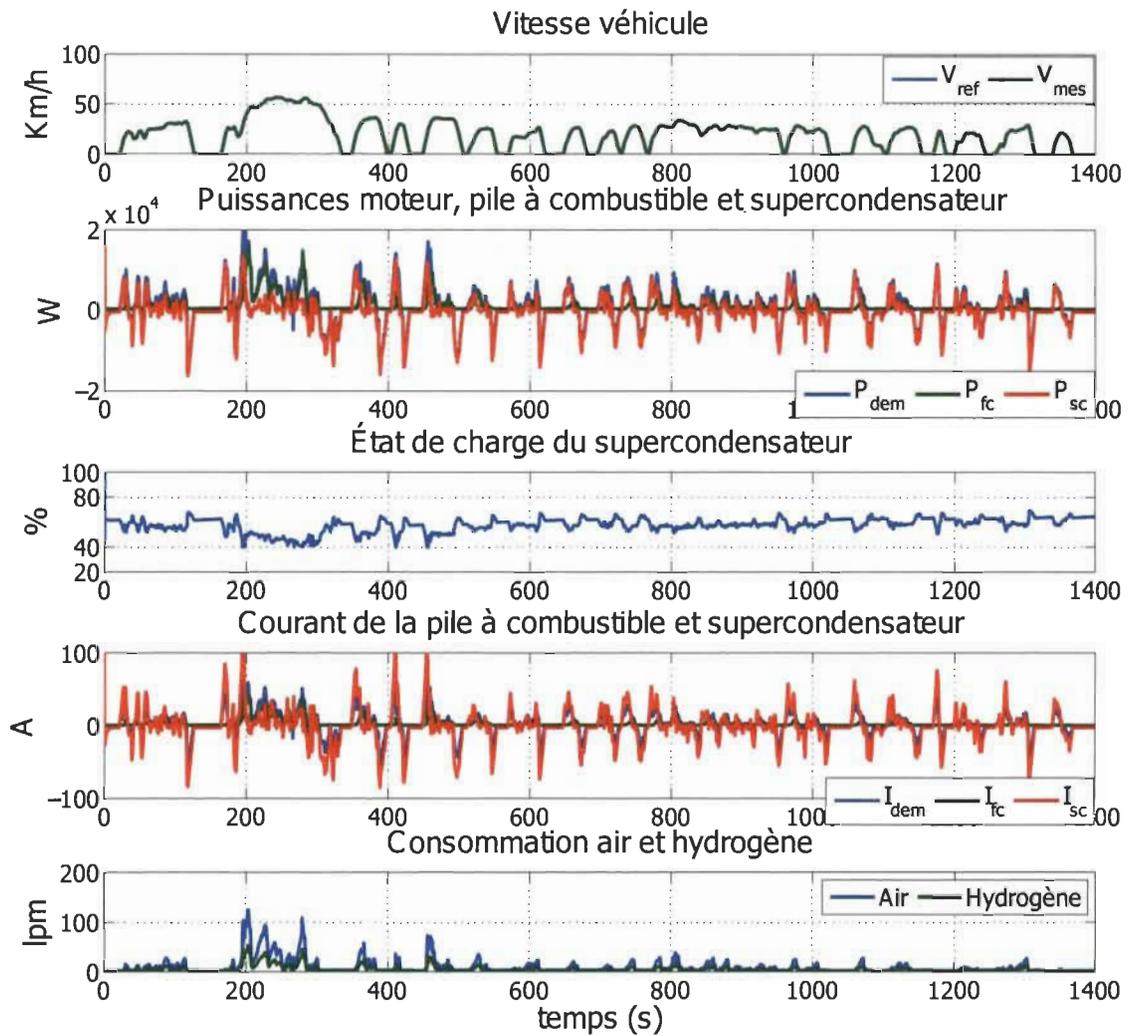


Figure 3.15 Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour  $m_v = 2500$  kg et  $V = V_{ref}$  pour la configuration PAC/SC

Sur les deux figures 3.14 et 3.15, on constate que l'état de charge a resté borné  $40\% \leq SOC_{sc} \leq 95\%$ . Or, sur la figure 3.14, lors des freinages répétitifs, le superconden-

sateur est chargé et lors des accélérations, sa charge n'est pas toute évacuée. De même, la puissance demandée n'est assez élevée pour que le supercondensateur dissipe le surplus de puissance. On commence à observer ce phénomène à partir de l'instant  $t = 1000s$ , où l'état de charge du supercondensateur a tendance à augmenter légèrement. Par contre, sur les figures 3.15 à 3.17, où les conditions telles que la masse et la vitesse de référence ont été changées, le supercondensateur emmagasine l'énergie retournée lors des freinages et son état de charge n'augmente pas comme c'est le cas de la batterie.

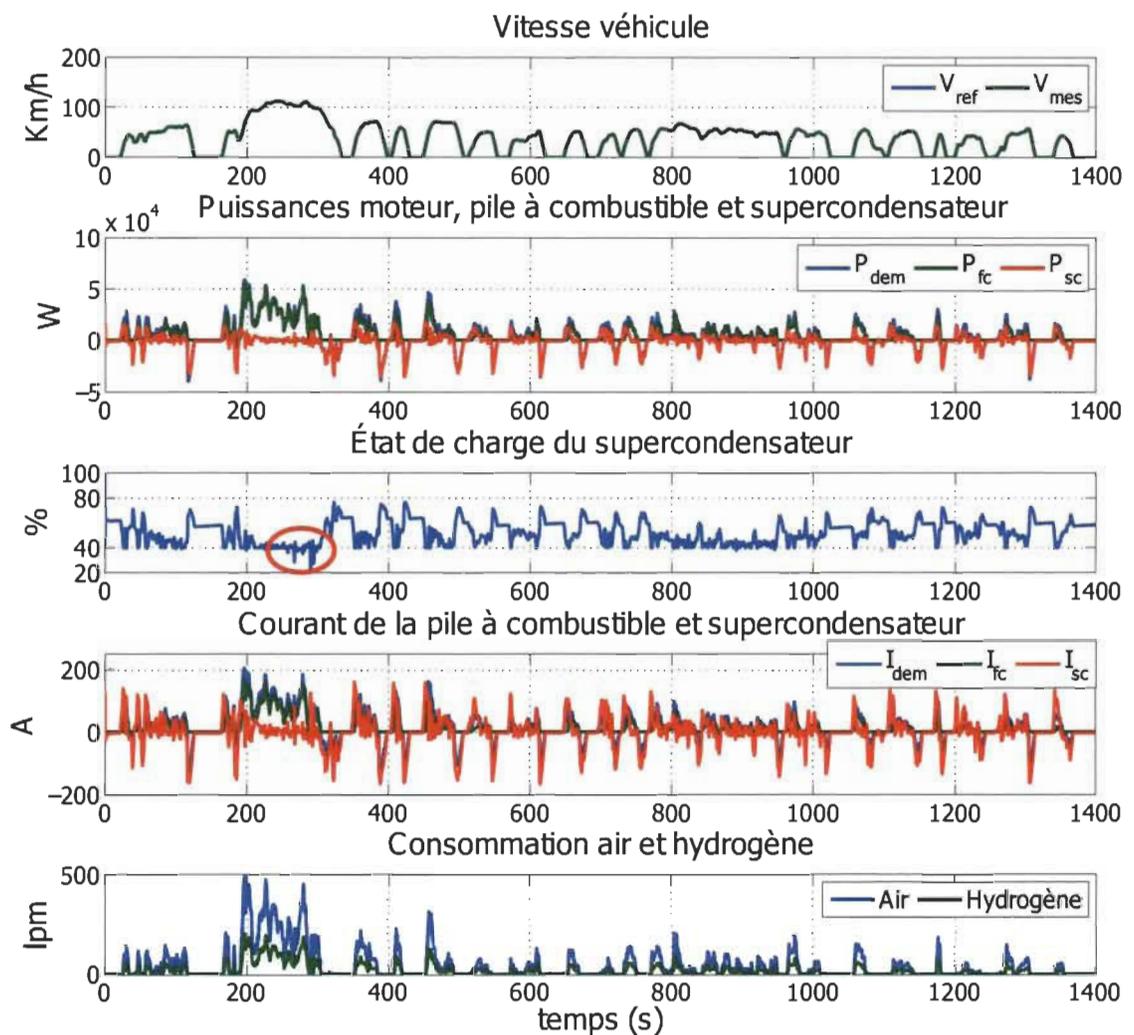


Figure 3.16 Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour  $m_v = 1625 \text{ kg}$  et  $V = 2 \times V_{ref}$  pour la configuration PAC/SC

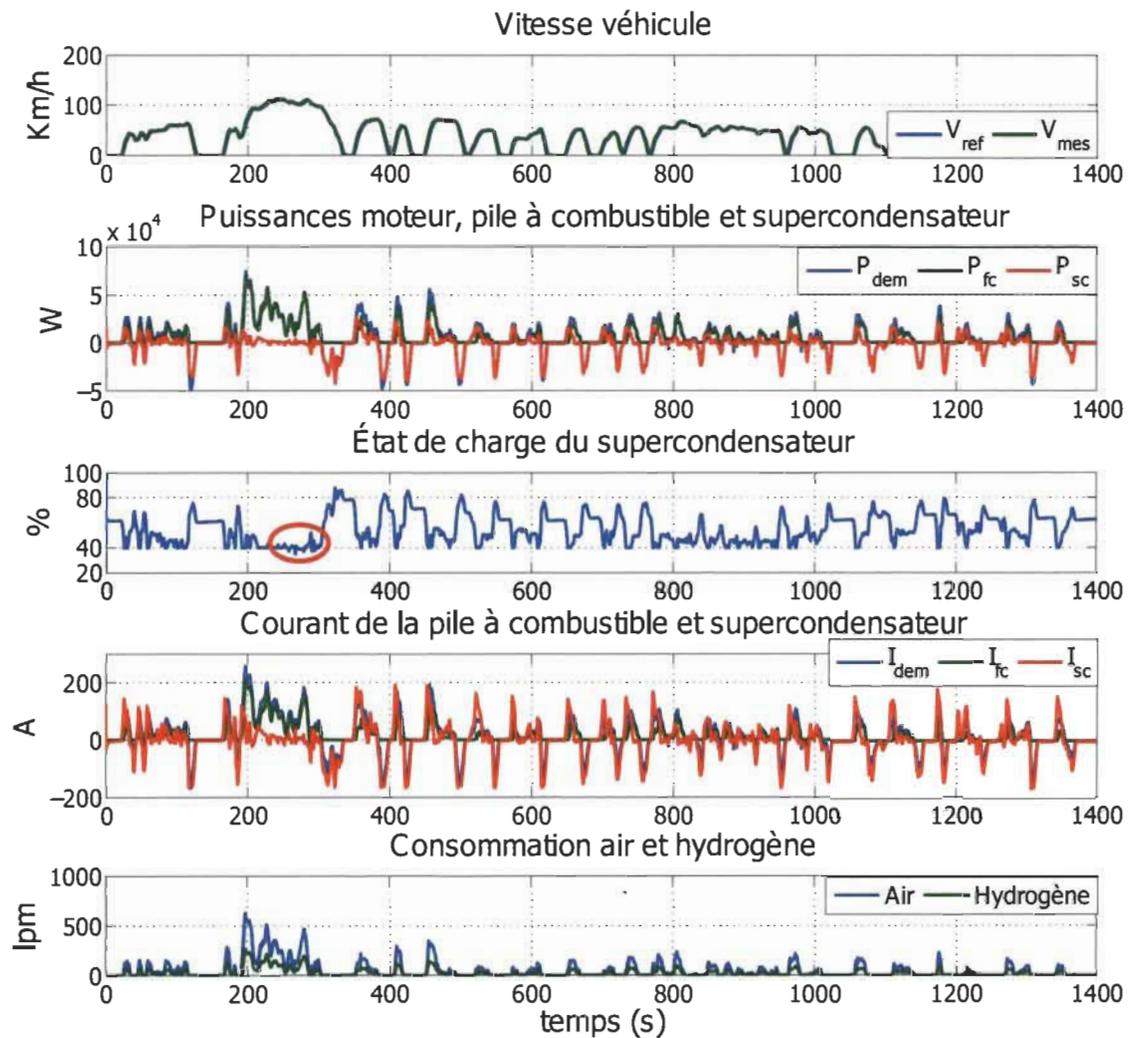


Figure 3.17 Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour  $m_v = 2500 \text{ kg}$  et  $V = 2 \times V_{ref}$  pour la configuration PAC/SC

Les figures 3.16 et 3.17 montrent les résultats de simulation pour des conditions de roulage du véhicule différentes. Dans ces deux cas, le profil de la vitesse de référence est multiplié par deux et les masses valent respectivement  $m_v = 1625 \text{ kg}$  et  $m_v = 2500 \text{ kg}$ . Dans ce parcours, on mesure une vitesse maximale de  $113 \text{ km/h}$  et des puissances demandées maximales de  $P_{dem,max} = 60 \text{ kW}$  et de  $P_{dem,max} = 75 \text{ kW}$  pour les deux cas.

On observe également sur les figures 3.16 et 3.17, et à partir de l'instant  $t = 260 \text{ s}$ , que les états de charge du supercondensateur atteignent respectivement  $SOC_{sc} = 23.4 \%$  et

$SOC_{sc} = 35\%$ . À cet instant, une forte demande de puissance que la pile à combustible, à cause de sa dynamique lente par rapport au supercondensateur, n'a pas pu fournir. Dans ce cas, le supercondensateur fournit alors cette différence de puissance en dépit de son état de charge. À la fin du parcours, les états de charge du supercondensateur atteignent respectivement  $SOC_{sc} = 58.37\%$  et  $SOC_{sc} = 62.7\%$ .

### 3.4.2.2 Résultats de simulation pour le parcours autoroute HWFET

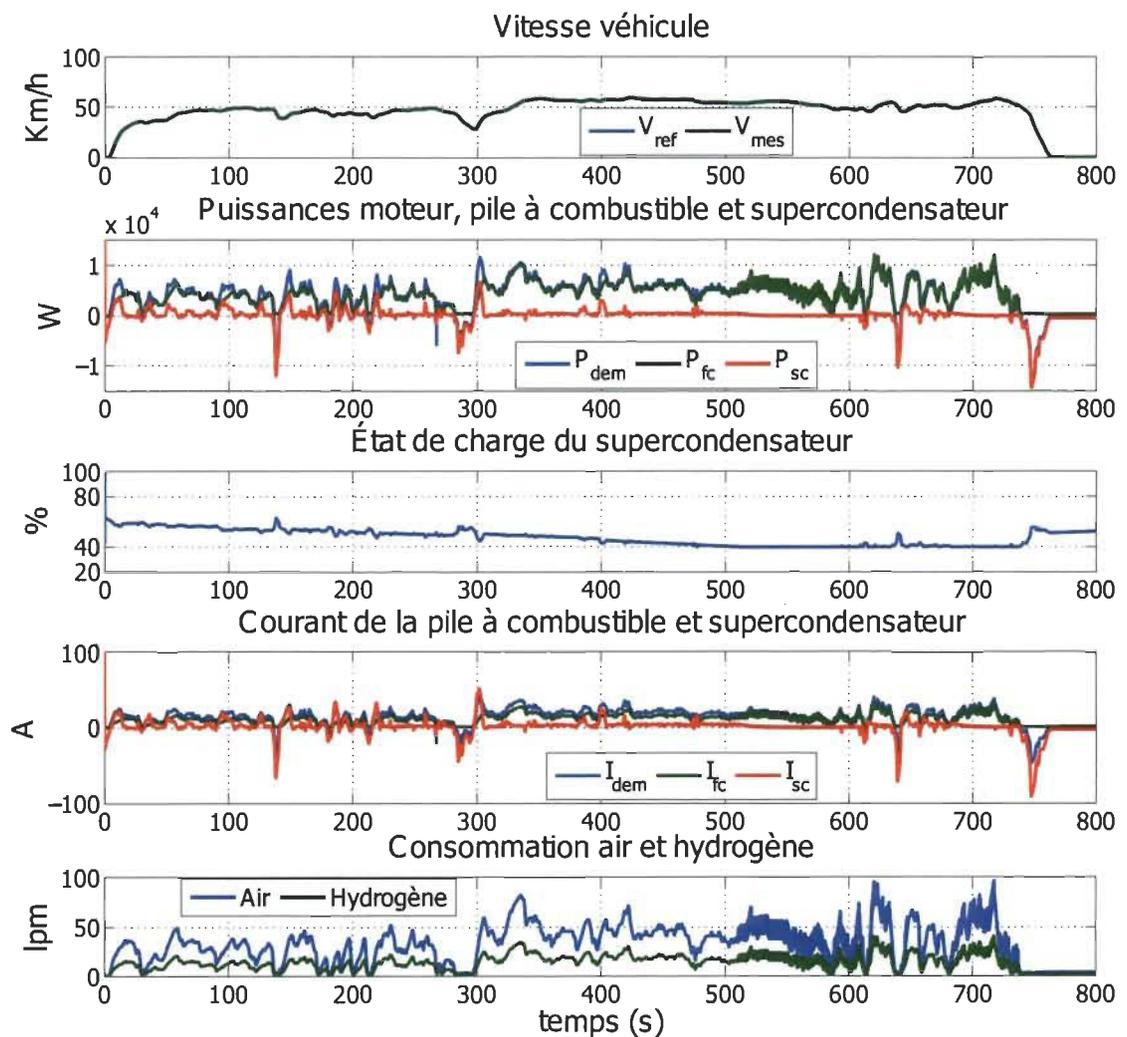


Figure 3.18 Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour  $m_v = 1625\text{ kg}$  et  $V = V_{ref}$  pour la configuration PAC/SC

Les figures 3.18 et 3.19 donnent les résultats de simulation pour différentes conditions de roulage du véhicule pour le parcours routier **HWFET**.

C'est un parcours qui correspond à un profil où la vitesse demeure sensiblement constante. Dans le cas de la figure 3.19, le profil de la vitesse a été multiplié par deux.

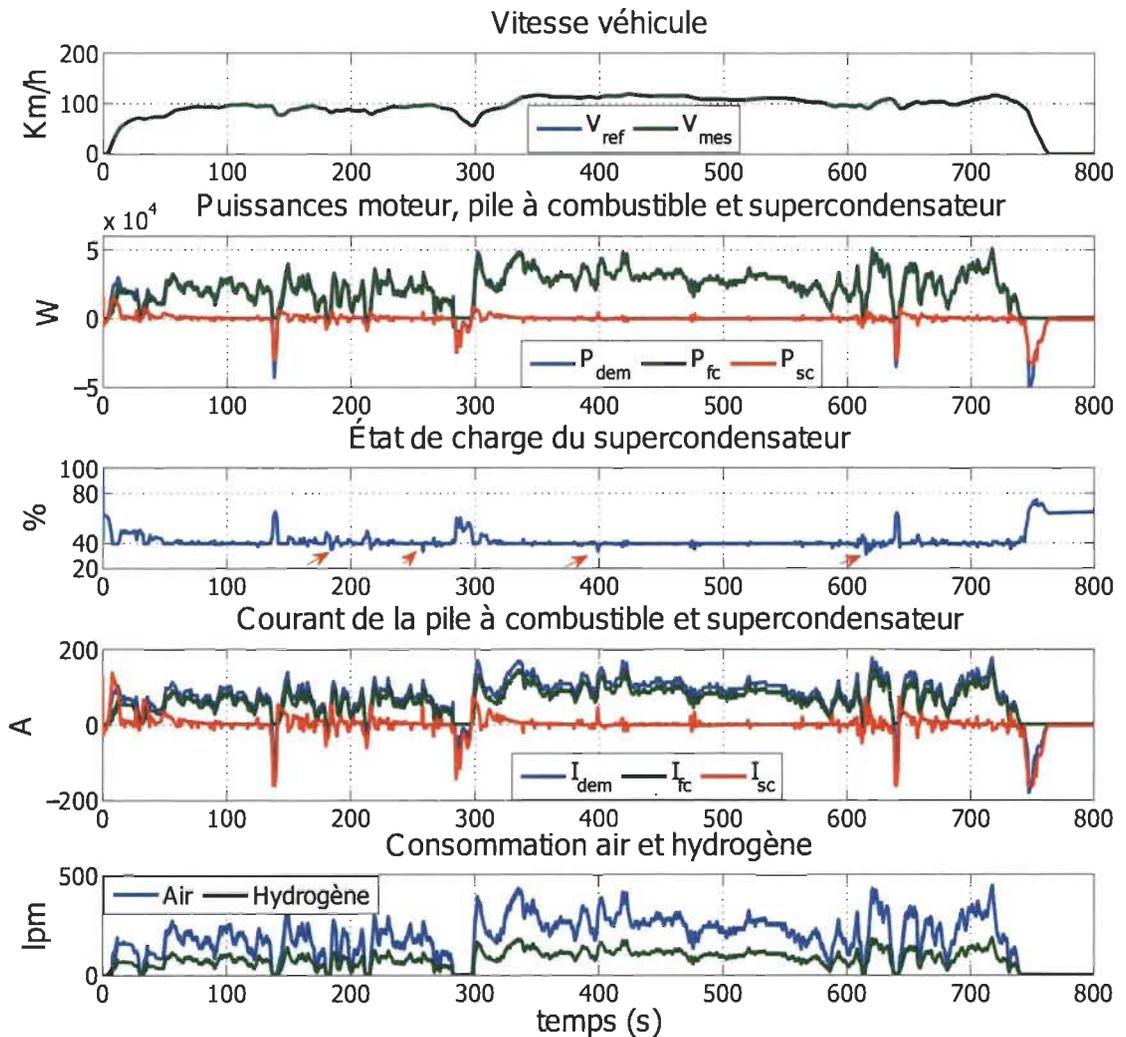


Figure 3.19 Résultats de simulation de la stratégie à base de règles pour  $m_v = 1625 \text{ kg}$  et  $V = 2 \times V_{ref}$  pour la configuration PAC/SC

Dans le cas de la figure 3.18, on mesure une vitesse maximale de  $60 \text{ km/h}$  et une puis-

sance maximale de  $P_{dem,max} = 12 \text{ kW}$ . Dans le cas de la figure 3.19, ces deux grandeurs valent respectivement  $120 \text{ km/h}$  et  $50 \text{ kW}$ .

L'état de charge du supercondensateur est tracé sur la troisième courbe. À l'instant  $t = 0 \text{ s}$ , il est égal à  $60 \%$ . Dans les deux figures, les états de charge minimums que le supercondensateur a atteints sont respectivement de  $SOC_{sc} = 40 \%$  et  $SOC_{sc} = 31.44 \%$ , et à la fin du parcours, ils valent  $SOC_{sc} = 52.33 \%$  et  $SOC_{sc} = 65.26 \%$  respectivement.

Dans ce cycle, on constate que l'apport du supercondensateur est non significatif mais, ce composant demeure important. La plupart de la puissance demandée est fournie par la pile à combustible. Le supercondensateur assiste la pile seulement pendant le démarrage, lors des accélérations ou changement de vitesse et lors des freinages. Vu sa dynamique rapide comparée à celle de la pile à combustible, le supercondensateur peut fournir une demande de puissance rapide en dépit de son état de charge. Ce phénomène est bien visible sur la figure 3.19.

### 3.4.2.3 Analyse des résultats obtenus dans la configuration PAC/SC

La figure 3.20 représente un agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les deux sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère ou freine. La figure montre un agrandissement des résultats de simulation de la figure 3.15 entre l'instant  $t = 160 \text{ s}$  et  $t = 340 \text{ s}$ . À l'instant  $t = 160 \text{ s}$ , le véhicule est à l'arrêt complet, la pile à combustible fonctionne et fournit une puissance minimale absorbée par le supercondensateur. Lorsque l'utilisateur accélère, la puissance demandée par le groupe motopropulseur est fournie par le supercondensateur jusqu'à l'instant  $t = 170 \text{ s}$ , le supercondensateur atteint alors un état de charge de  $49 \%$  tandis que la pile à combustible ne réagit pas à cette demande de puissance sauf à partir de l'instant  $t = 177 \text{ s}$ . Lors de l'accélération à partir de l'instant  $t = 188 \text{ s}$ , le supercondensateur épaula la pile à combustible ce qui entraîne sa décharge à  $40 \%$  à l'instant  $t = 194 \text{ s}$ . À partir de cette ins-

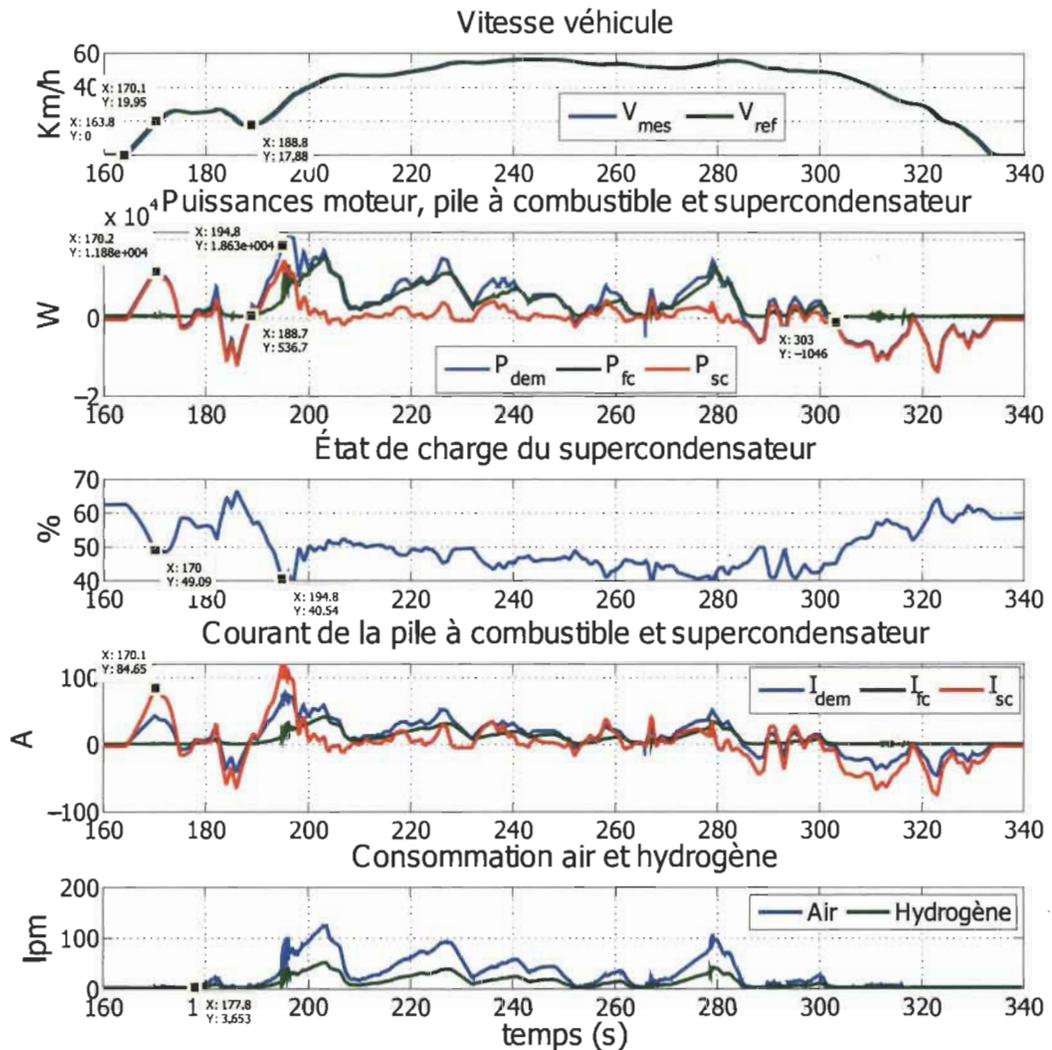


Figure 3.20 Agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère ou freine

tant, la pile à combustible fournit la puissance demandée et le supercondensateur l'épaule pendant les brusques changement de puissance ou de vitesse. À partir de l'instant  $t = 300$  s, l'utilisateur commence à diminuer la vitesse ce qui engendre un retour d'énergie vers le supercondensateur.

Les figures 3.21 et 3.22 représentent un agrandissement des résultats de simulation pour mieux observer le partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère, décélère ou freine pour deux profils de vitesse  $V = V_{ref}$  et

$V = 2 \times V_{ref}$ . Cet agrandissement est pris entre les instants  $t = 560 \text{ s}$  et  $t = 590 \text{ s}$ . De l'instant  $t = 560 \text{ s}$  à  $t = 570 \text{ s}$ , le véhicule est à l'arrêt et puisque la pile à combustible est active, elle fournit une puissance minimale qui est stockée dans le supercondensateur ( $P_{sc}(t) = -417 \text{ W}$ ). Le véhicule accélère, le supercondensateur fournit la puissance demandée par la charge; dans la figure 3.21.(a), le supercondensateur se décharge et son état de charge atteint 57 % et il atteint 53 % dans la figure 3.21.(b). À l'instant  $t = 573 \text{ s}$ , le véhicule commence à décélérer et le supercondensateur stocke l'énergie issus de cette décélération. L'utilisateur essaie de maintenir la vitesse du véhicule autour de  $17 \text{ Km/h}$  grace à des légères accélérations et décélérations. On remarque que pour les deux cas de cette figure, le supercondensateur épaula la pile à combustible pendant ces accélérations et récupère l'énergie pendant ces décélérations.

Par contre, dans la figure 3.22, le supercondensateur fournit la puissance demandée jusqu'à ce que son état de charge atteint 40 % à l'instant  $t = 572 \text{ s}$ . La pile à combustible quant à elle commence à réagir à partir de l'instant  $t = 571 \text{ s}$  quand l'état de charge du supercondensateur commence à augmenter et dépasse 50 % de sa charge.

Ces résultats de simulation prouvent que le supercondensateur est sollicité durant un parcours routier. Pour les différentes vitesses, parcours routiers et conditions de roulage, les résultats montrent que les deux objectifs sont atteints. En effet, dans un parcours le supercondensateur est plus sollicité pendant les accélérations et les freinages. Il contribue à la puissance demandée tant que son état de charge le permet (tant que son état de charge est supérieur à sa valeur minimale  $SOC_{sc} > 40 \%$ ). Il arrive à évacuer son énergie stockée et à récupérer la puissance des freinages ou des descentes sans l'accumuler et risquer une augmentation de sa charge. La consommation de la pile à combustible est donc moins importante puisque le supercondensateur remplit convenablement son rôle.

Toutefois, la faiblesse de cette approche est observée lors d'une forte demande de puissance et où l'état de charge du supercondensateur est à son minimum. Étant donné que, la

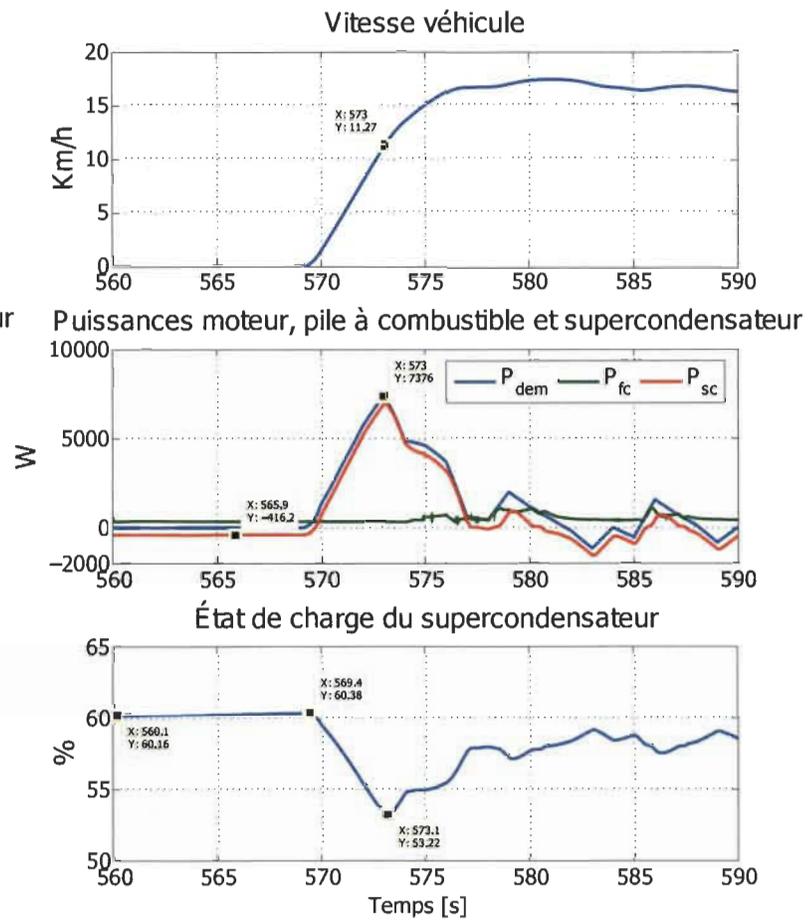
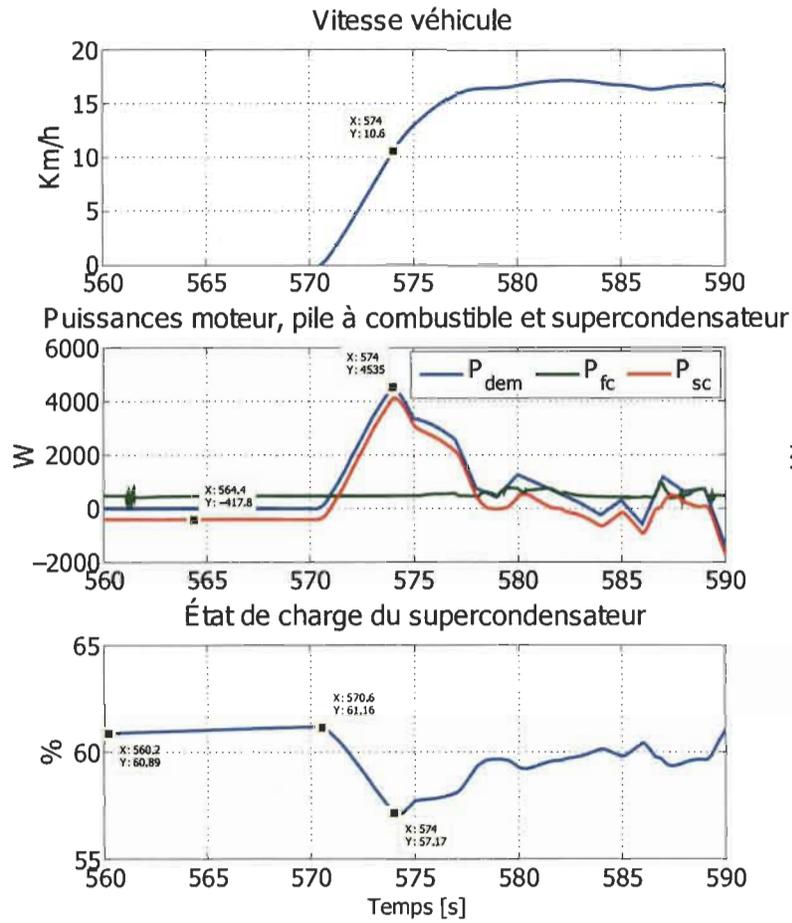
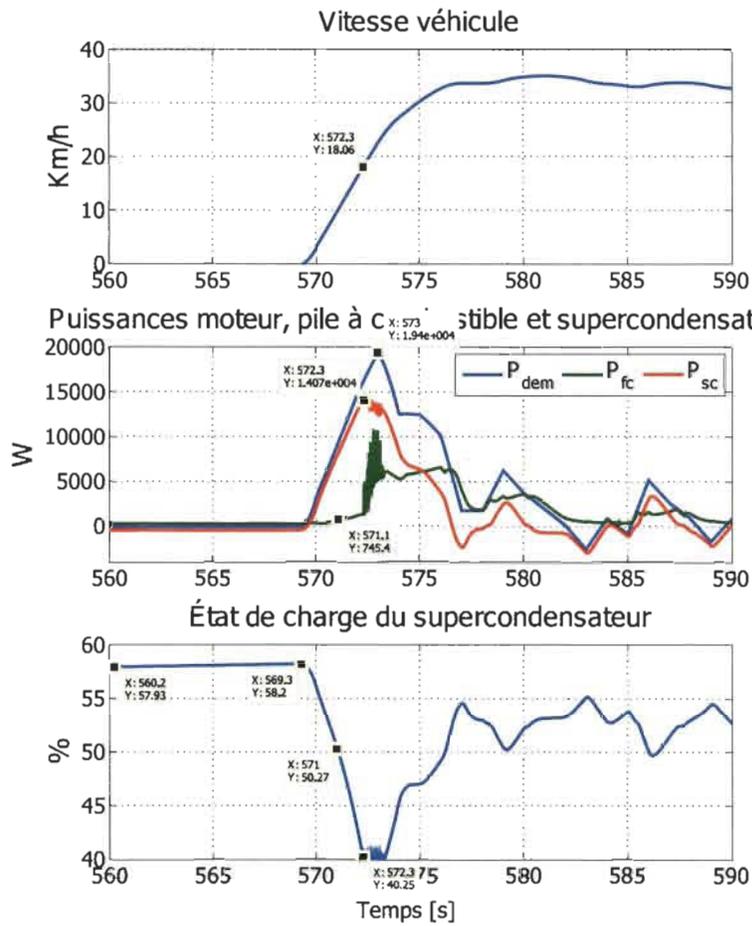
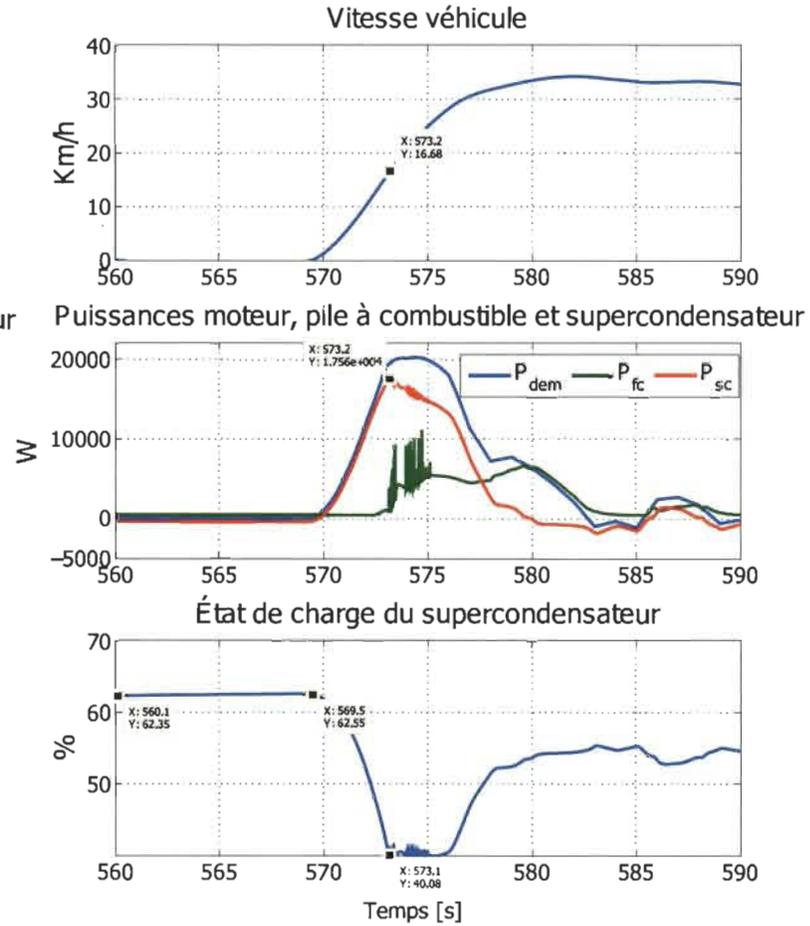


Figure 3.21 Agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère pour un parcours urbain avec  $V = V_{ref}$  et une masse de (a)  $m_v = 1625 \text{ kg}$  et (b)  $m_v = 2500 \text{ kg}$



(a)



(b)

Figure 3.22 Agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère pour un parcours urbain avec  $V = 2 \times V_{ref}$  et une masse de (a)  $m_v = 1625 \text{ kg}$  et (b)  $m_v = 2500 \text{ kg}$

pile à combustible n'est pas assez rapide comparativement au supercondensateur qui a une dynamique rapide, la demande rapide en puissance est comblée par le supercondensateur le temps que la pile à combustible réagit à ce changement. Ce problème (le maintien de l'état de charge) aura un effet négatif sur la durée de vie du supercondensateur.

### 3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a développé une nouvelle stratégie de gestion de l'énergie en temps réel basée sur la stratégie à base de règles avec ECMS. Deux configurations ont été étudiées : la première se compose de la pile à combustible et de la batterie et la deuxième utilise une pile à combustible et un supercondensateur.

Les résultats de simulation montrent que l'algorithme dépend de la valeur test de l'état de charge. Cette valeur vaut 60% dans le cas de batterie et 40 % dans le cas du supercondensateur.

Dans le cas de la batterie, les résultats montrent qu'à basse vitesse et basse puissance du parcours **UDDS**, cet algorithme n'est pas efficace (ne remplit pas convenablement son rôle). La batterie assiste la pile à combustible lors des accélérations et donc elle transfère une partie de son énergie stockée. Or, lors des freinages répétitifs, la batterie accumule cette puissance et transfère une partie lors des accélérations. Son état de charge à la fin du parcours augmente de 71 %. Pour un long parcours et avec les mêmes conditions, la batterie pourrait subir une charge complète. Cela pourrait l'endommager.

Dans le cas du supercondensateur, les résultats de simulation prouvent que la répartition de puissance est plus adéquate. Effectivement, lors des freinages répétitifs, le supercondensateur n'accumule pas l'énergie comme dans le cas de la batterie. Pour les deux parcours testés et avec les variations de la masse et de la vitesse, l'algorithme de gestion répartit convenablement la puissance entre les deux sources, et le supercondensateur four-

nit la puissance demandée jusqu'au minimum de son état de charge. On peut conclure que cet algorithme est mieux adapté pour la configuration de la pile à combustible et supercondensateur.

Par contre, l'algorithme proposé comporte quelques défauts. En effet, lors d'une demande brusque de puissance, le supercondensateur continue à fournir ce surplus de puissance malgré son faible état de charge. Ce phénomène peut être expliqué par la dynamique rapide du supercondensateur par rapport à celui de la pile à combustible, et sa capacité à fournir rapidement la puissance. On ajoute aussi que la réponse instantanée de l'algorithme de gestion est sous forme OUI et NON (ON/OFF) et par conséquent il est plus agressive.

Dans le prochain chapitre, une autre méthode de gestion d'énergie en temps réel sera élaborée. Elle dépend de règles prédéfinies, mais elle est moins agressive par rapport à la stratégie présentée dans ce chapitre puisque la transition entre les états OUI et NON est plus douce [34].

## CHAPITRE 4

### STRATÉGIE DE GESTION D'ÉNERGIE À BASE DE LA LOGIQUE FLOUE

#### Sommaire

<b>4.1 Introduction</b> . . . . .	<b>91</b>
<b>4.2 État de l'art sur la gestion d'énergie à base de la logique floue</b> . . .	<b>91</b>
<b>4.3 Fondements théoriques de la logique floue</b> . . . . .	<b>93</b>
4.3.1 Appartenance d'un ensemble floue et un ensemble classique . .	93
4.3.2 Fonction d'appartenance . . . . .	94
<b>4.4 Stratégie de la gestion d'énergie proposée</b> . . . . .	<b>96</b>
<b>4.5 Validation de la stratégie sur trois configurations : PAC/B, PAC/SC</b>	
<b>et PAC/B/SC</b> . . . . .	<b>98</b>
4.5.1 Configuration PAC/B et la configuration PAC/SC . . . . .	98
4.5.1.1 Régulation du courant au niveau du hacheur bidirec- tionnel . . . . .	98
4.5.1.2 Régulateur de la tension du bus CC . . . . .	100
4.5.2 Configuration PAC/B/SC . . . . .	100
<b>4.6 Résultats de simulation obtenus</b> . . . . .	<b>102</b>
4.6.1 Résultats de simulation des configurations PAC/B, PAC/SC et PAC/B/SC . . . . .	102
4.6.1.1 Analyse des résultats obtenus . . . . .	108
4.6.2 Résultats de simulation de la configuration PAC/SC . . . . .	108
4.6.2.1 Cas du parcours urbain <b>UDDS</b> . . . . .	109
4.6.2.2 Cas du parcours autoroute <b>HWFET</b> . . . . .	112
4.6.2.3 Analyse des résultats obtenus . . . . .	114
<b>4.7 Conclusion</b> . . . . .	<b>120</b>

## 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente une stratégie de gestion en temps réel basée sur la logique floue (*LF*). On s'attarde à concevoir un contrôleur à base de la Logique Floue (CLF) pour la gestion d'énergie en temps réel d'un véhicule à pile à combustible et une batterie et/ou supercondensateur. Cette stratégie vise également à protéger la source auxiliaire (batterie ou le supercondensateur) contre les surcharges au cours de la récupération de l'énergie de freinages répétitifs. La pile à combustible (PAC) est considérée comme la source d'énergie primaire, la batterie (B) et le supercondensateur (SC) sont les sources d'énergie secondaire. Par la suite, on procède à l'analyse et l'évaluation des performances en temps réel avec des conditions et cycles de roulage inconnus. Trois configurations différentes, à savoir, pile à combustible/batterie (PAC/B), pile à combustible/supercondensateur (PAC/SC) et pile à combustible/batterie/supercondensateur (PAC/B/SC) seront considérées. L'environnement MATLAB/Simulink et la boîte à outils SimPowerSystems sont utilisés pour modéliser les éléments électriques et mécaniques du véhicules électrique et implémenter la stratégie de gestion à base de la logique floue.

Ce chapitre est structuré en cinq sections. La section 4.2 présente l'état de l'art. La section 4.4 décrit la méthode de gestion d'énergie proposée. La section 4.5 présente la structure des convertisseurs. La section 4.6 expose les résultats de la simulation et la section 4.7 présente la conclusion de ce chapitre.

## 4.2 État de l'art sur la gestion d'énergie à base de la logique floue

Plusieurs stratégies de gestion d'énergie ont été suggérées pour assurer la distribution de la puissance entre les deux types de sources et la charge. Récemment, la logique floue a été proposée par certains auteurs pour gérer l'énergie d'un véhicule à pile combustible. La référence [54] liste les avantages de cette méthode et on y propose une stratégie à

base de la logique floue qui a été implémentée dans l'environnement ADVISOR pour les véhicules à PAC/B et PAC/B/SC. Cette stratégie a pour but de réduire la consommation en hydrogène et d'augmenter la distance parcourue. Les résultats de cette méthode prouvent une meilleure économie de la consommation en hydrogène, mais les résultats concernant l'état de charge de la batterie ou supercondensateur (SOC) n'ont pas été présentés.

La référence [8] propose un contrôleur basé sur la logique floue pour la gestion d'énergie. Cette méthode utilise un parcours routier connu (**UDDS**) afin de déterminer la puissance optimale de la pile à combustible et la batterie pour un bus hybride. Les résultats de cette méthode montrent une bonne distribution de la puissance entre les différentes sources et la charge. En plus, l'état de charge de la batterie a été maintenu borné. Dans cette référence, les résultats montrent que l'état de charge de la batterie augmente lors de freinages répétitifs surtout durant la dernière partie du cycle de roulage **UDDS**.

La référence [55] présente un contrôleur basé sur la logique floue. Pour gérer l'énergie durant un parcours routier a priori connu. On cherche à examiner le degré d'hybridation et déterminer les fonctions d'appartenance du contrôleur. Ces fonctions ont été déterminées en utilisant une approche qui maximise le rendement de la pile à combustible. L'inconvénient majeur de cette méthode est la nécessité de connaître à l'avance le parcours routier, ce qui rend son implémentation en temps réel impossible. Les résultats de cette stratégie ont été comparés avec deux autres méthodes. La première utilise un contrôleur à logique floue à fonction d'appartenance fixe. La deuxième est avec un degré d'hybridation optimisé. Les résultats de simulation montrent que la stratégie proposée améliore le rendement du système, mais le degré d'hybridation optimisé n'est pas sensible au changement des parcours routiers.

La référence [56] utilise la logique floue à ondelette pour le contrôle et la distribution de la puissance entre les sources d'énergie et la charge.

### 4.3 Fondements théoriques de la logique floue

La logique floue est de plus en plus utilisée dans le contrôle des systèmes. Elle décrit un processus, quelle que soit sa complexité, sous forme de règles empiriques issues de l'expertise et les connaissances qualitatives de fabricants et du personnel ayant un contact avec les systèmes ou les processus. Ces règles sont écrites à l'aide d'un savoir-faire humain surtout lorsque le système est complexe et difficile à modéliser.

La logique floue est beaucoup utilisée dans le domaine d'automobile, notamment dans les transmissions automatiques, le contrôle d'injection, l'air conditionné et aussi dans les processus de la production continue et par lots [57].

#### 4.3.1 Appartenance d'un ensemble floue et un ensemble classique

La logique floue, formalisée par *Lotfi Zadeh* en 1965, s'appuie sur la théorie des ensembles qui englobent la logique classique. La figure 4.1 montre la différence entre la théorie des ensembles classiques et la théorie des ensembles flous.

**Ensemble classique :** autorise deux valeurs de vérité pour une proposition '1' ou '0', c-à-d un objet appartient ou n'appartient pas à un ensemble.

**Ensemble floue :** en plus des deux valeurs de vérité pour une proposition, elle autorise les états intermédiaires entre '1' et '0'. Dans la figure 4.1, le degré d'appartenance est montré par le niveau de gris.

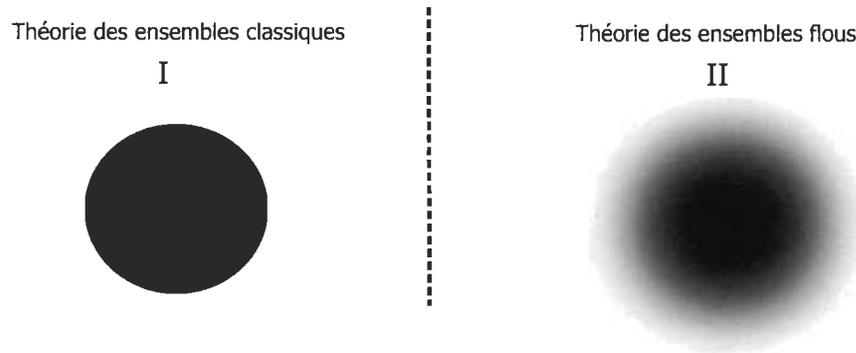


Figure 4.1 Différence entre la théorie des ensembles classiques et la théorie des ensembles flous

### 4.3.2 Fonction d'appartenance

Chaque ensemble flou est défini par une fonction d'appartenance. Cette dernière est un ensemble borné compris entre 0 et 1. À la différence de l'ensemble classique, l'ensemble flou a des frontières floues.

**Définition :** Soit  $X$  un objet appartenant à un ensemble  $A$ .  $\mu_f$  est une fonction d'appartenance du sous ensemble flou  $f$  de l'ensemble  $A$ . La valeur de cette fonction  $\mu_f(X)$  représente le degré d'appartenance de l'élément  $X$ .

La figure 4.2 représente la fonction d'appartenance de l'ensemble classique et l'ensemble flou. Dans cette figure, la fonction d'appartenance est linéaire, mais elle peut être aussi hyperbolique, exponentielle ou gaussienne comme montré sur la figure 4.3.

**Ensemble classique :**  $\mu_I(X_1) = \mu_I(X_3) = 0$  et  $\mu_I(X_2) = 1$

**Ensemble floue :**  $\mu_{II}(X_1) = \mu_{II}(X_5) = 0$ ,  $\mu_{II}(X_2) = 0.4$ ,  $\mu_{II}(X_3) = 1$  et  $\mu_{II}(X_4) = 0.7$

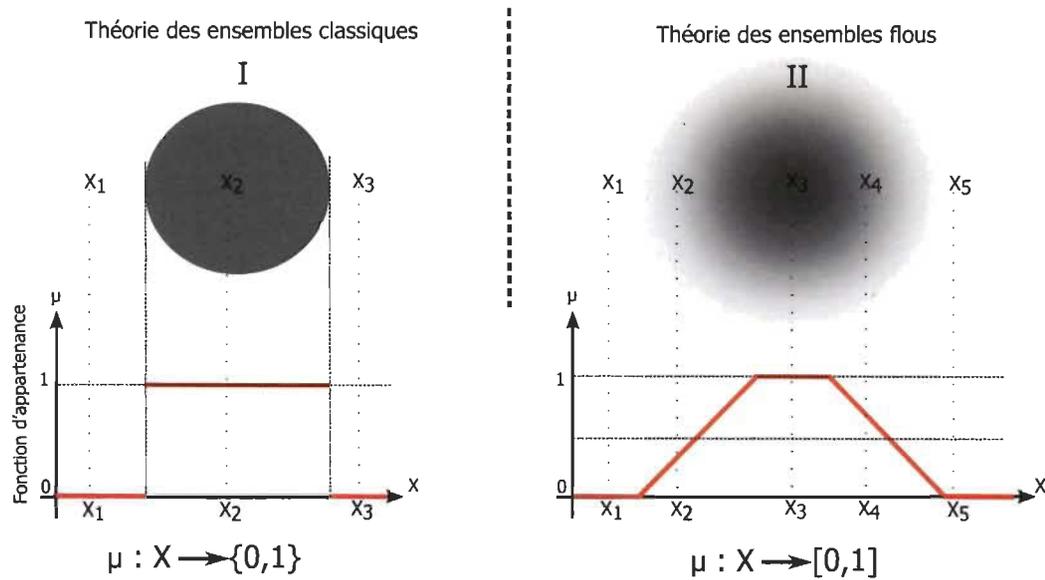


Figure 4.2 Fonction d'appartenance

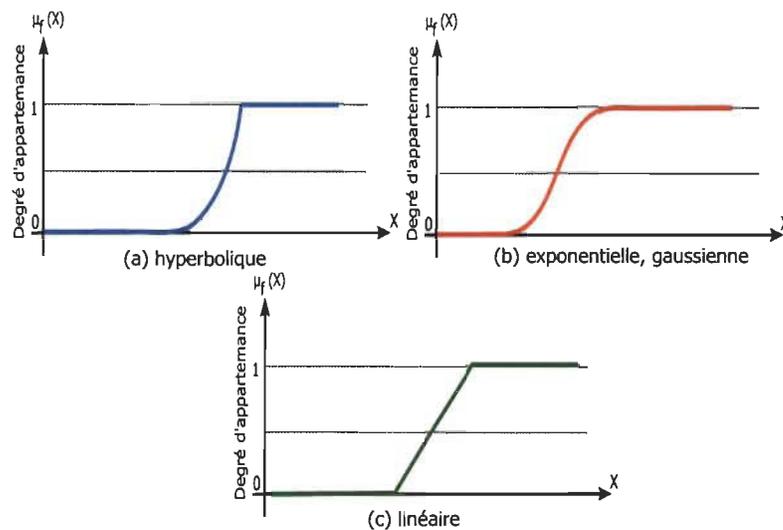


Figure 4.3 Différentes transitions de la fonction d'appartenance

Une seule variable pourra être définie par plusieurs ensembles flous et chacune d'elle est représentée par une fonction d'appartenance. On peut les appeler avec des termes linguistiques comme 'faible', 'moyen' et 'élevé' par exemple. La figure 4.4 montre les fonctions d'appartenance de l'état de charge du supercondensateur. Il est défini par trois

ensembles flous et la fonction d'appartenance peut être représentée avec les trois formes citées en haut. On a choisi la fonction d'appartenance linéaire par morceaux à cause de sa simplicité et la facilité à modéliser les informations de l'expertise.

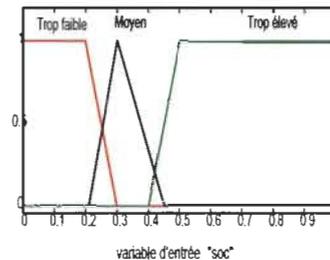


Figure 4.4 Fonctions d'appartenance de l'état de charge du supercondensateur

#### 4.4 Stratégie de la gestion d'énergie proposée

Lors du fonctionnement d'un véhicule à PAC, la puissance demandée par la charge (motopropulseur) doit être satisfaite au cours du cycle de circulation. La technique de gestion d'énergie implémentée doit calculer la puissance de la pile à combustible et la puissance de la source secondaire, et respecter les contraintes dynamiques des deux sources d'énergie. La puissance demandée par la charge durant le parcours routier et l'état de charge des sources secondaires forment les entrées du contrôleur à base de logique floue.

Les résultats présentés dans la littérature montrent que l'état de charge de la batterie augmente durant les multiples freinages. La figure 4.5 illustre le problème qui concerne l'augmentation de l'état de charge de la batterie lors de freinages répétitifs.

L'approche proposée dans ce chapitre a pour but de gérer la puissance demandée et celles des sources d'énergie en fonction d'un parcours routier inconnu. Quand elle est chargée, la batterie fournit la puissance demandée et la pile à combustible fournit une puissance minimale. Cette approche protégera la batterie contre la surcharge due à l'accumulation de la puissance durant les freinages répétitifs. Rappelant que cette problématique

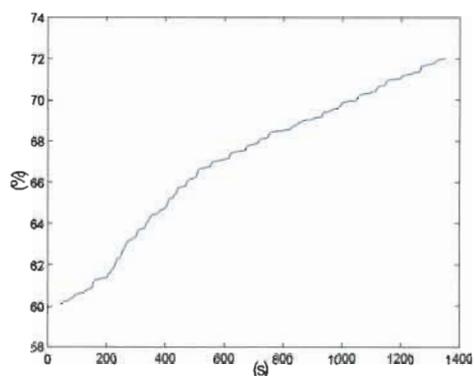


Figure 4.5 Augmentation de l'état de charge de la batterie pour un contrôleur standard

n'est pas prise en compte dans la littérature.

La stratégie de gestion d'énergie retenue calcule et gère la puissance de référence de la pile combustible. Le contrôleur à logique floue dispose de deux entrées ( $P_{dem}$ ,  $SOC$ ) et une sortie ( $P_{FC}$ ). La figure 4.6 montre le contrôleur à logique floue.

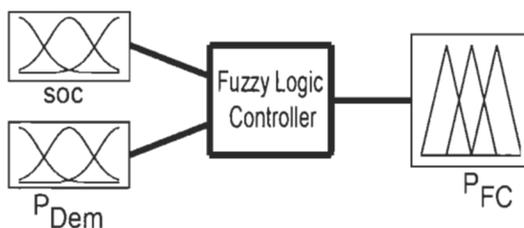


Figure 4.6 Contrôleur à logique floue

Tableau 4.1 Règles du contrôleur de logique floue

$P_{dem}/SOC$	Faible	Moyen	Élevé
Trop faible	Trop élevé	Trop faible	Trop faible
Faible	Trop élevé	Faible	Trop faible
Moyen	Trop élevé	Moyen	Trop faible
Trop élevé	Trop élevé	Trop élevé	Trop faible

Les règles logiques en fonction des entrées et de la sortie du contrôleur montrent que si l'état de charge de la batterie ou du supercondensateur est faible, par conséquent la puissance de la pile à combustible est élevée. Dans l'autre cas, si l'état de charge de la batterie ou du supercondensateur est élevée, la puissance de la pile à combustible est minimale quelle que soit la puissance demandée. Le cas où l'état de charge de la batterie ou du supercondensateur est moyen, la puissance de la pile à combustible doit s'adapter en fonction de la puissance d'entrée demandée (tableau 4.1). Les fonctions d'appartenance sont présentées sur la figure 4.7.

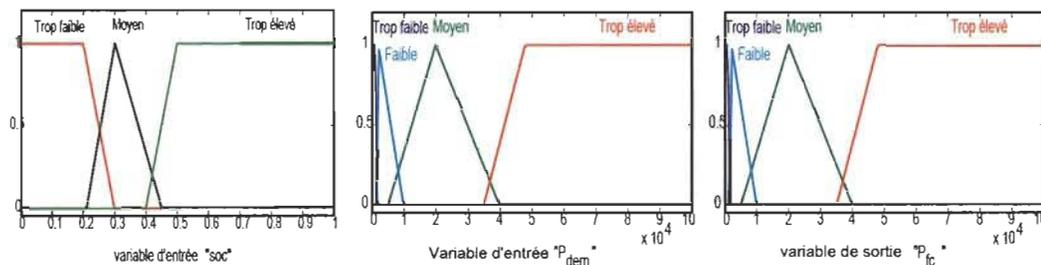


Figure 4.7 Fonctions d'appartenance du contrôleur à logique floue

## 4.5 Validation de la stratégie sur trois configurations : PAC/B, PAC/SC et PAC/B/SC

### 4.5.1 Configuration PAC/B et la configuration PAC/SC

#### 4.5.1.1 Régulation du courant au niveau du hacheur bidirectionnel

Dans cette étude, le système se compose d'une pile à combustible et une source d'énergie secondaire (batterie ou supercondensateur) qui permet de fournir la puissance supplémentaire et récupérer de l'énergie lors des freinages et des descentes. Les avantages de cette configuration résident dans sa capacité d'adaptation pour la gestion d'énergie, et son aptitude à travailler à une tension plus élevée. Les configurations PAC/B et PAC/SC sont illustrées dans la figure 4.8.

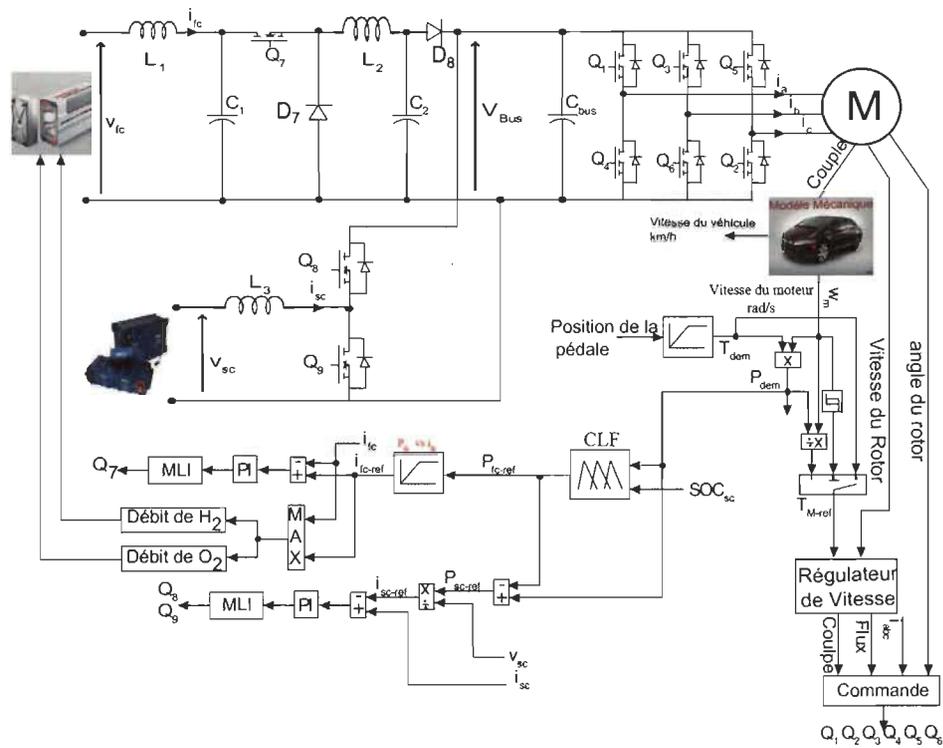


Figure 4.8 Configuration PAC/B ou PAC/SC avec un régulateur de courant au niveau du hacheur bidirectionnel

La puissance nécessaire au cours d'un parcours routier est imposée par la position de la pédale d'accélération. La puissance de référence de la pile à combustible  $P_{fc-ref}$  est déterminée en utilisant le contrôleur à logique floue. Une table (Lookup table) est utilisée pour déduire le courant référence de la pile à combustible requis à partir de la puissance de celle-ci. Dans la section 2.3.1 du chapitre 2, on a décrit en détail cette table. La puissance de référence du dispositif de stockage (batterie  $P_{B-ref}$  ou supercondensateur  $P_{SC-ref}$ ) est obtenue en fonction de la puissance de référence de la pile à combustible  $P_{fc-ref}$  et la tension du bus CC. La puissance demandée par la charge  $P_{dem}$ , est présentée dans l'équation (4.1).

$$P_{dem}(t) = P_{sec-ref}(t) + P_{fc-ref}(t) \quad (4.1)$$

Avec  $P_{sec-ref}$  la puissance de référence de la source secondaire.

Le courant de référence de la batterie  $i_{B-ref}$  ou du supercondensateur  $i_{sc-ref}$  est obtenu en divisant la puissance de référence de la batterie (ou supercondensateur) par la tension du bus CC. Cette tension est égale à la tension aux bornes de la source auxiliaire (batterie ou supercondensateur). L'équation (4.2) montre la relation permettant de déterminer ce courant de référence.

$$i_{sec-ref}(t) = \frac{P_{sec-ref}(t)}{V_{sec}(t)} \quad (4.2)$$

Avec  $i_{sec-ref}$  et  $V_{sec}$  le courant de référence de la source secondaire et la tension à ces bornes respectivement.

#### 4.5.1.2 Régulateur de la tension du bus CC

La configuration PAC/SC est identique à celle de la figure 3.13. La différence est que le bloc de l'algorithme à base de règles est remplacé par le régulateur à logique floue proposé. La tension au niveau du bus CC est maintenue constante et égale à 288 V via un régulateur de type proportionnel-intégral (PI) comme le montre la figure 3.13. La régulation se fait au hacheur abaisseur.

#### 4.5.2 Configuration PAC/B/SC

La configuration PAC/B/SC est montrée à la figure 4.9. Dans cette configuration, le système se compose d'une pile à combustible, d'une batterie, d'un supercondensateur et deux hacheurs, d'un onduleur triphasé et d'une machine synchrone. C'est une configuration hybride avec la batterie connectée directement au bus CC et le supercondensateur connecté au même bus CC par l'intermédiaire d'un hacheur élévateur/abaisseur réversible en courant. L'avantage de cette configuration réside dans l'ajout du supercondensateur. En

effet, en plus de faciliter la régulation, le supercondensateur permet d'augmenter la durée de vie de la batterie et de réduire les pics de puissance de la batterie, en fournissant tout le manque d'énergie au système, et réduire les pertes en récupérant l'énergie de freinage.

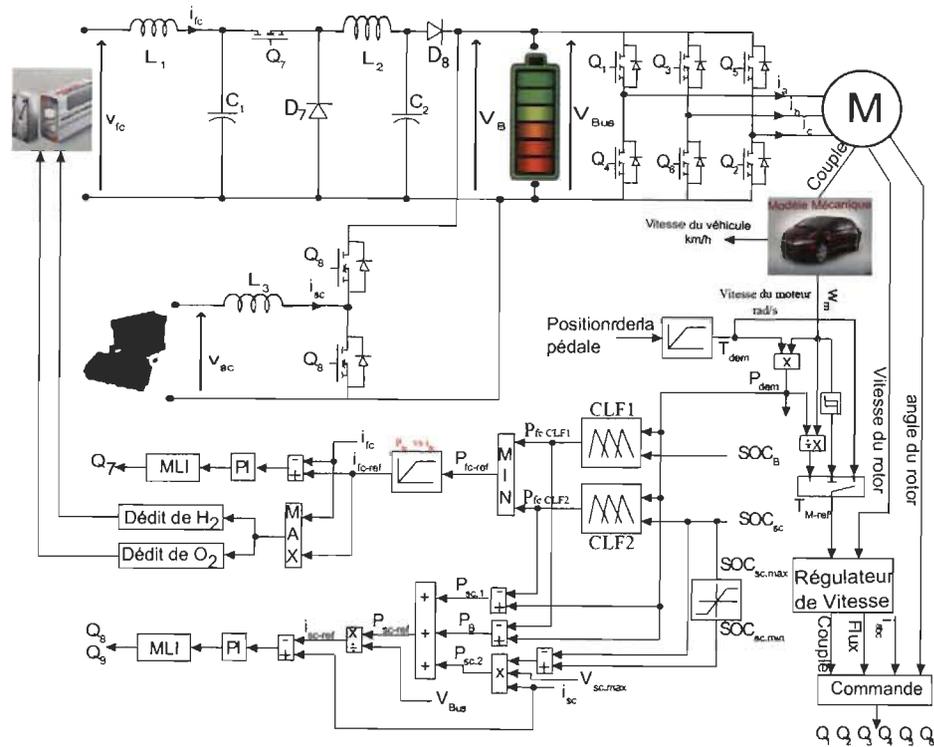


Figure 4.9 Configuration PAC/B/SC avec un régulateur de courant au niveau du hacheur réversible

Les deux contrôleurs à logique floue  $CLF1$  et  $CLF2$  proposent deux puissances selon les états de charge de la batterie et du supercondensateur. Le minimum de ces deux puissances est donc retenu comme puissance de référence de la pile à combustible  $P_{fc-ref}$ .

L'équation (4.3) donne l'expression de la puissance de la batterie. Cette puissance est déterminée en soustrayant la puissance de pile à combustible  $P_{fc,CLF1}$ , obtenue à partir du premier contrôleur à logique floue ( $CLF1$ ) de la puissance demandée  $P_{dem}$ .

$$P_B(t) = P_{dem}(t) - P_{fc,CLF1}(t) \quad (4.3)$$

L'équation (4.4) montre l'expression de la puissance du supercondensateur  $P_{sc.1}$ . Cette puissance est déterminée en soustrayant la puissance de pile à combustible,  $P_{fc.CLF2}$ , obtenue à partir du second contrôleur à logique floue (CLF2) de la puissance demandée.

$$P_{sc.1}(t) = P_{dem}(t) - P_{fc.CLF2}(t) \quad (4.4)$$

L'équation (4.5) décrit l'expression de la puissance du supercondensateur  $P_{sc.2}$ . Cette puissance est déterminée lorsque l'état de charge du supercondensateur est situé hors de l'intervalle souhaité.

$$P_{sc.2}(t) = (SOC_{[SOC_{sc.min}, SOC_{sc.max}]}(t) - SOC_{sc}(t)) V_{sc.max} i_{sc}(t) \quad (4.5)$$

La puissance nécessaire pour un état de charge du supercondensateur donné est déduite par l'état de charge du supercondensateur encadré entre  $SOC_{sc.min} = 40\%$  et  $SOC_{sc.max} = 95\%$ . En sommant les trois puissances trouvées, on détermine la puissance de référence du supercondensateur. Cette dernière est ensuite divisée par la tension aux bornes du bus CC pour obtenir le courant de référence du supercondensateur. L'équation (4.6) exprime le calcul de ce courant de référence.

$$i_{sc-ref}(t) = \frac{P_{sc.1}(t) + P_B(t) + P_{sc.2}(t)}{V_{Bus}} \quad (4.6)$$

## 4.6 Résultats de simulation obtenus

### 4.6.1 Résultats de simulation des configurations PAC/B, PAC/SC et PAC/B/SC

Dans cette simulation, on a utilisé le parcours routier **UDDS** pour étudier les performances des stratégies de gestion de l'alimentation proposées. Comme ce cycle comporte plusieurs accélérations et décélérations par rapport aux autres parcours, le véhicule hy-

bride a tendance à perdre plus d'énergie et le rendement du système diminue. La vitesse mesurée et la vitesse de référence du véhicule sont tracées sur la figure 4.10.

La figure 4.11 illustre la puissance obtenue à partir des deux sources d'énergie dans le cas de la configuration FC/B. L'état de charge de la batterie est indiqué sur la figure 4.12. Il commence à 60 %, décroît à 56 % et il oscille à l'entour de cette valeur. En

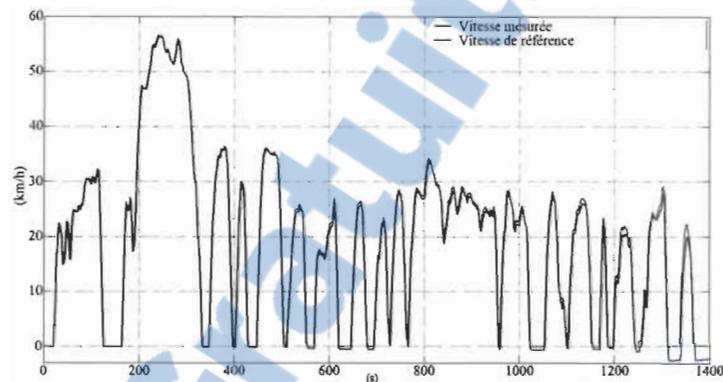


Figure 4.10 Vitesse mesurée et la vitesse de référence du véhicule

examinant la figure 4.11, on constate que la puissance demandée est bien partagée entre la pile à combustible et la batterie. La batterie fournit la puissance requise par le véhicule et la pile à combustible fournit une puissance minimale lorsque le véhicule est en mode d'accélération et que l'état de charge de la batterie est compris entre  $SOC_{B.min}$  et 100 %. La batterie récupère la puissance de freinage en mode de freinage.

Dans le cas de la configuration FC/SC, la puissance fournie par les deux sources est représentée sur la figure 4.13. Le supercondensateur fournit la puissance requise par le véhicule, et la pile à combustible fournit la puissance minimale lorsque le véhicule est en mode d'accélération et l'état de charge de supercondensateur est encadré entre  $SOC_{sc.min}$  et 100 %.

Lorsque le véhicule est en mode accélération et l'état de charge de supercondensateur est situé entre ( $SOC_{sc.min} < SOC_{sc} < SOC_{sc.max}$ ), le supercondensateur épaulé

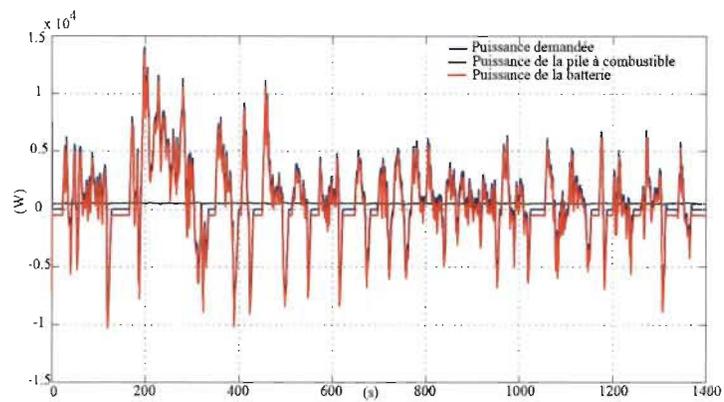


Figure 4.11 Puissances de la configuration FC/B

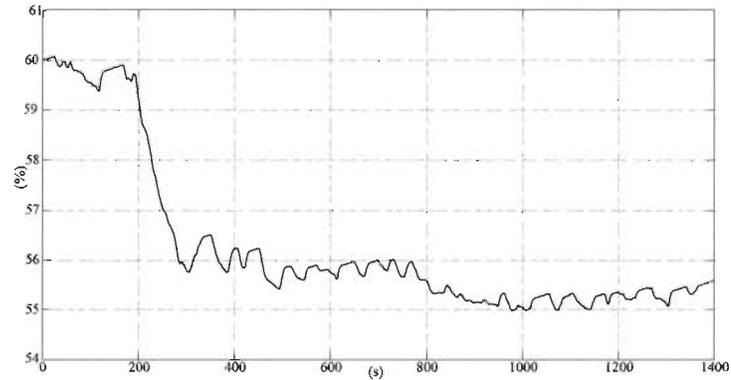


Figure 4.12 État de charge de la batterie pour la configuration FC/B

la pile à combustible pour fournir la puissance exigée. La pile à combustible fournit la puissance demandée pour charger le supercondensateur pendant le mode d'accélération et quand l'état de charge de supercondensateur est entre 0 et  $SOC_{sc.min}$ . Dans ce cas, le supercondensateur peut récupérer facilement l'énergie de freinage. L'état de charge de supercondensateur est illustré à la figure 4.14.

Les puissances fournies par les trois sources dans la configuration FC / B / SC sont montrées dans la figure 4.15. On remarque que le supercondensateur fournit la puissance requise par le véhicule, alors que la pile à combustible et la batterie fournissent une puissance minimale lorsque le véhicule est en mode accélération et l'état de charge du super-

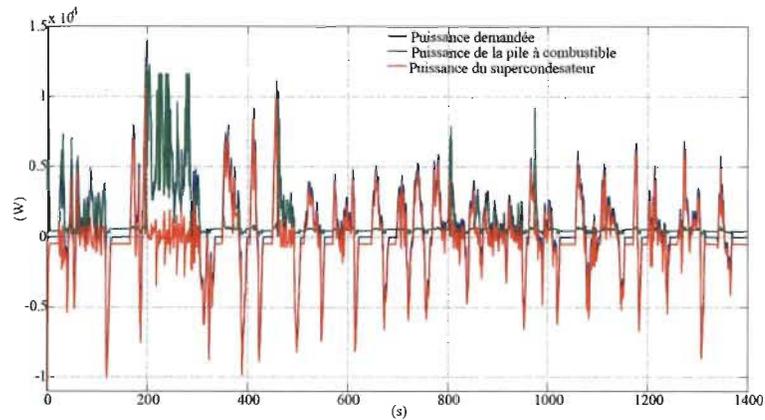


Figure 4.13 Puissances de la configuration FC/SC

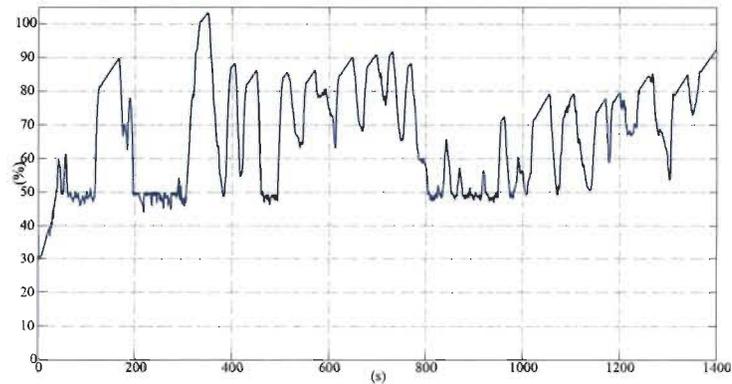


Figure 4.14 État de charge du supercondensateur pour la configuration FC/SC

condensateur se situe entre  $SOC_{sc.min}$  et 100 %.

La figure 4.16 représente les états de charge du supercondensateur et de la batterie pour la configuration FC / B / SC. On constate que le supercondensateur et la batterie épaulent la pile à combustible pour satisfaire la demande d'énergie lorsque le véhicule est en mode d'accélération. On observe que l'état de charge de supercondensateur se trouve entre 50 % et 100 % et il dépasse le seuil de 100 % à l'instant  $t = 350 s$  et  $t = 1400 s$ . L'état de charge de la batterie quant à lui est compris entre 55 % et 60 %.

Les tensions de la pile à combustible, de la batterie, du supercondensateur et du bus CC

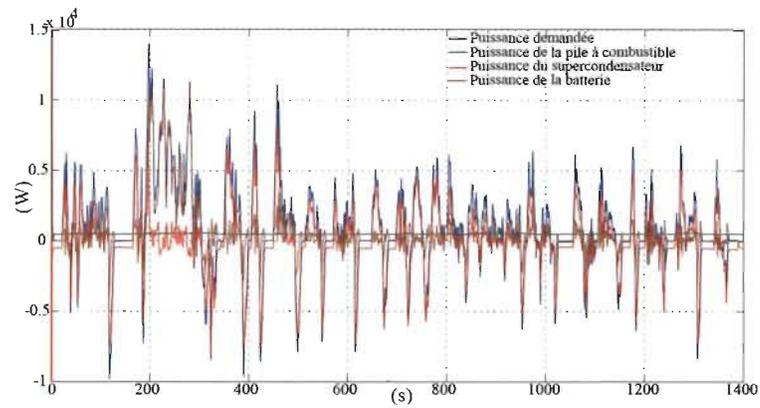


Figure 4.15 Puissances pour la configuration FC/B/SC

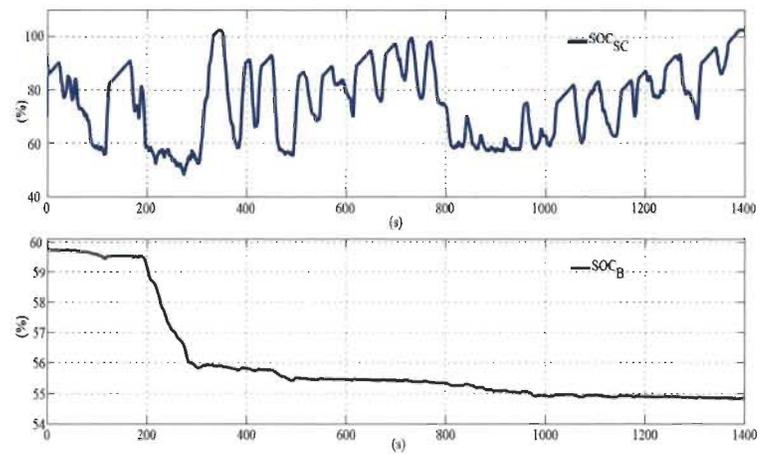


Figure 4.16 L'état de charge du supercondensateur et de la batterie pour la configuration FC/B/SC

des trois configurations décrites dans cette partie sont respectivement représentées dans les figures 4.17, 4.18 et 4.19. Tel que prévu, la tension aux bornes du supercondensateur est plus ondulatoire.

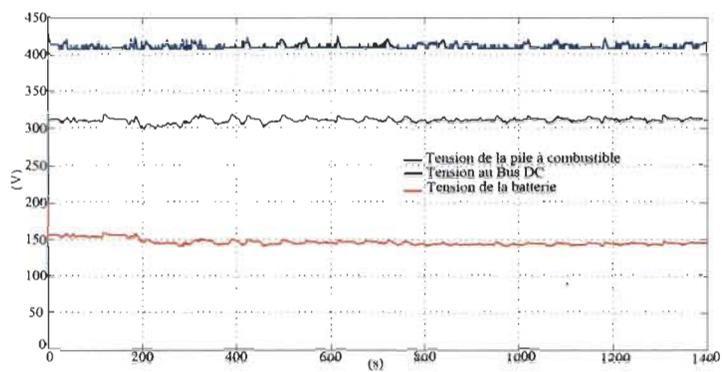


Figure 4.17 Tensions de la configuration FC/B

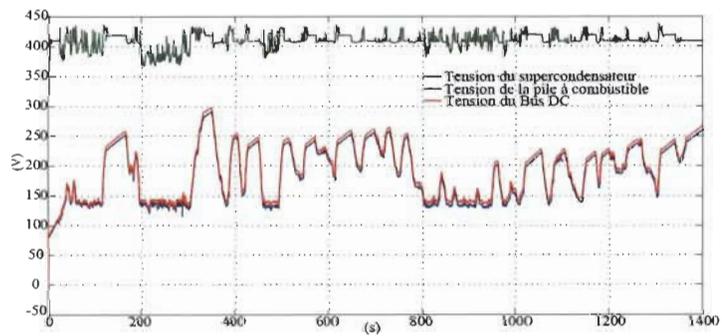


Figure 4.18 Tensions de la configuration FC/SC

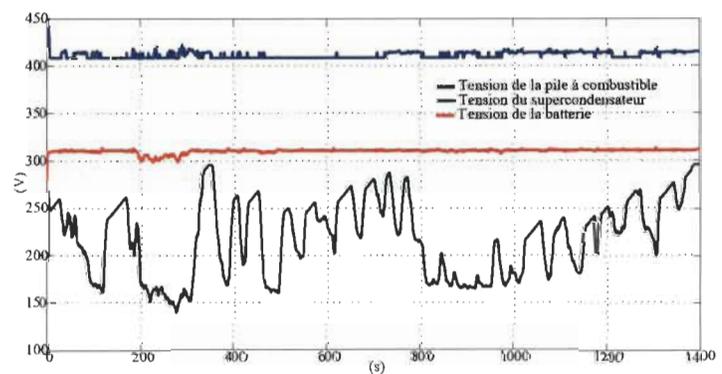


Figure 4.19 Tensions de la configuration FC/B/SC

#### 4.6.1.1 Analyse des résultats obtenus

La figure 4.20 indique que, dans les configurations PAC/B et PAC/B/SC, les quantités d'hydrogène consommées sont quasiment identiques. Cela s'explique par le fait que pendant le parcours routier, la puissance de la pile à combustible est égale à la valeur minimale pour ces deux configurations, par contre, la configuration PAC/SC consomme plus d'hydrogène comparativement aux deux autres.

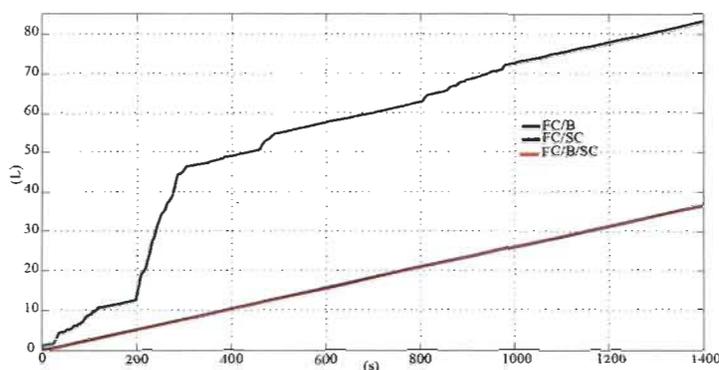


Figure 4.20 Consommation de l'hydrogène pour les configurations PAC/B, PAC/SC et PAC/B/SC

Dans la configuration PAC/B/SC, le supercondensateur atténue les pics de puissance de la pile à combustible et de la batterie pendant les accélérations. Le supercondensateur et la batterie récupèrent l'énergie lors des freinages. L'ajout du supercondensateur dans cette configuration a pour rôle d'améliorer la durée de vie de la batterie en évitant sa charge et décharge profondes.

#### 4.6.2 Résultats de simulation de la configuration PAC/SC

Les résultats de simulation pour le parcours **UDDS** sont représentés dans les figures 4.21 à 4.24. Dans les figures 4.23 et 4.24, la vitesse a été multipliée par deux pour atteindre la vitesse 113Km/h. Les figures 4.25 et 4.26 montrent les résultats de simulation du

parcours **HWFET**.

#### 4.6.2.1 Cas du parcours urbain **UDDS**

La figure 4.21 représente les résultats de simulation pour des conditions de roulage différentes pour le parcours routier **UDDS** avec une masse du véhicule  $m_v = 1625 \text{ kg}$ . On constate que la puissance demandée est répartie entre la pile à combustible et le super-

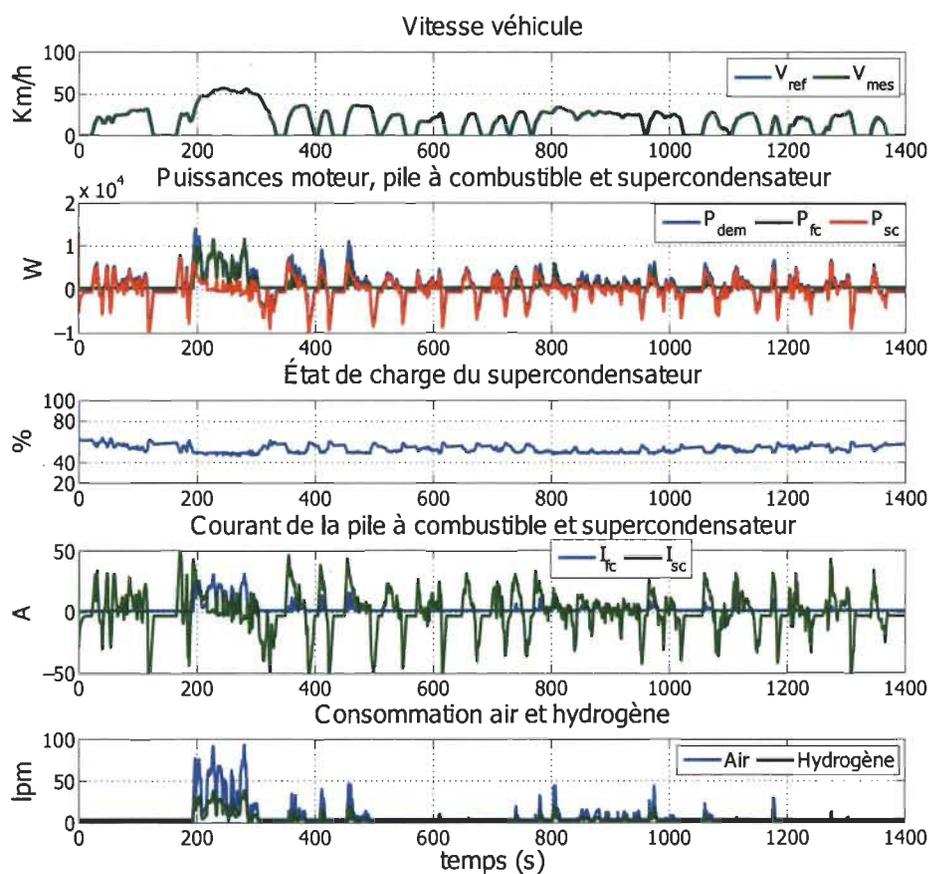


Figure 4.21 Résultat de la logique floue avec  $m_v = 1625 \text{ kg}$  et  $V = V_{ref}$

condensateur. Elle est comprise entre  $-9.7 \text{ kW}$  et  $14 \text{ kW}$ . Quant à la pile à combustible, sa puissance est comprise entre  $500 \text{ W}$  et  $11.7 \text{ kW}$ , et la puissance du supercondensateur est comprise entre  $10.4 \text{ kW}$  et  $7.5 \text{ kW}$ . Dans ces conditions, le supercondensateur fournit pratiquement la totalité de la puissance demandée. Par exemple, pendant l'intervalle

$t \in [200s, 300s]$  ( zone à vitesse constante), la puissance demandée est fournie uniquement par la pile à combustible. Dans cet intervalle de temps, l'état de charge du supercondensateur commence à atteindre le seuil minimum  $SOC_{sc} \approx 46 \%$ , c'est pourquoi la pile à combustible est fortement sollicitée, son courant atteint  $31 A$  à l'instant  $t = 280 s$ . Sinon durant ce parcours, le courant du supercondensateur est compris entre  $51 A$  à l'instant  $t = 171 s$  et  $-59 A$  à l'instant  $t = 390$ . Les courbes du courant et de la consommation reflètent le comportement attendu de la pile et du supercondensateur.

La figure 4.22 montre les résultats de simulation pour le parcours routier **UDDS** avec une masse du véhicule  $m_v = 2500 kg$ . On voit que lors des accélérations, la puissance

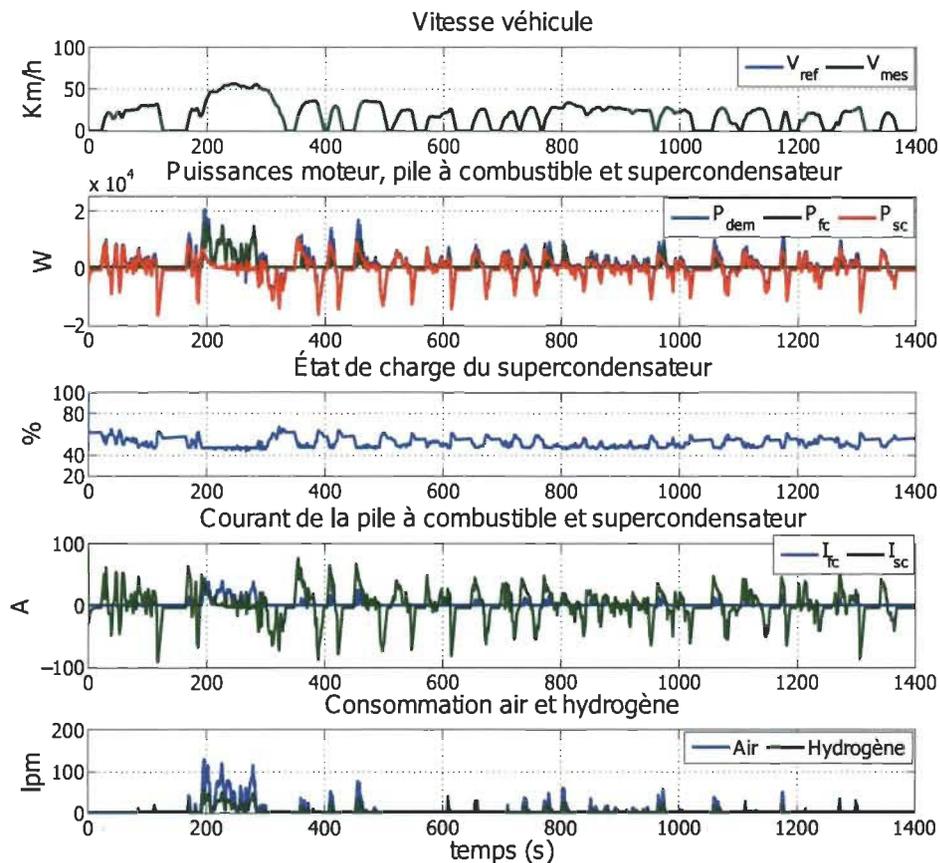


Figure 4.22 Résultats de simulation de la logique floue avec  $m_v = 2500 kg$  et  $V = V_{ref}$

demandée est répartie entre les deux sources. On constate également que la puissance demandée atteint un maximum de  $20 kW$  lors de l'accélération, et  $-15.5 kW$  lors du

freinage. La pile à combustible atteint un maximum de  $15,9 \text{ kW}$  lors de l'accélération, et  $400 \text{ W}$  lorsque le supercondensateur fournit la puissance demandée, ou lors d'un freinage ou d'une décélération. On observe que le supercondensateur est plus sollicité puisque sa puissance atteint un maximum de  $10,7 \text{ kW}$  lors de l'accélération, et  $-16,3 \text{ kW}$  lors d'un freinage ou d'une décélération. Son courant atteint dans cette situation des pics de  $77 \text{ A}$  à l'instant  $t = 355 \text{ s}$  en mode décharge et  $-91 \text{ A}$  à l'instant  $t = 117 \text{ s}$  en mode charge. On peut confirmer qu'il assiste la pile à combustible lors des accélérations et fournit la puissance demandée instantanément en raison sa dynamique rapide.

Par exemple, à partir de l'instant  $t = 160 \text{ s}$ , on observe que la puissance demandée a augmentée brusquement. Dans cette situation, le supercondensateur suit adéquatement le changement et comble le manque de puissance jusqu'à ce que son état de charge atteint  $SOC_{sc} = 48\%$ . Dans ce cas, la pile à combustible fournit la puissance demandée par le groupe motopropulseur. Elle est aussi épaulée par le supercondensateur si nécessaire.

La figure 4.23 montre les résultats de simulation du parcours routier **UDDS** dont le profil de vitesse est multipliée par deux pour atteindre la vitesse  $113 \text{ km/h}$  et une masse du véhicule  $m_v = 1625 \text{ kg}$ . Cette courbe nous indique que, le supercondensateur est plus sollicité en charge et en décharge par rapport aux cas précédents. L'état de charge a atteint en charge une valeur de  $SOC_{sc} = 80\%$  et une valeur de  $SOC_{sc} = 40 \%$  en décharge. La puissance demandée a augmenté et a atteint un maximum de  $P_{dem} = 60 \text{ kW}$ . Dans cette situation, la pile à combustible fournit une puissance conséquente qui atteint un maximum de  $56 \text{ kW}$  à l'instant  $t = 279 \text{ s}$ , tandis que la puissance du supercondensateur atteint une valeur maximale de  $19 \text{ kW}$  à l'instant  $t = 351 \text{ s}$ . Les courbes des courants et de la consommation montrent que la pile à combustible et le supercondensateur sont trop sollicités dans ces conditions.

La figure 4.24 représente les résultats de simulation du parcours routier **UDDS** avec un profil de vitesse multiplié par deux pour atteindre la vitesse  $113 \text{ Km/h}$  et une masse du

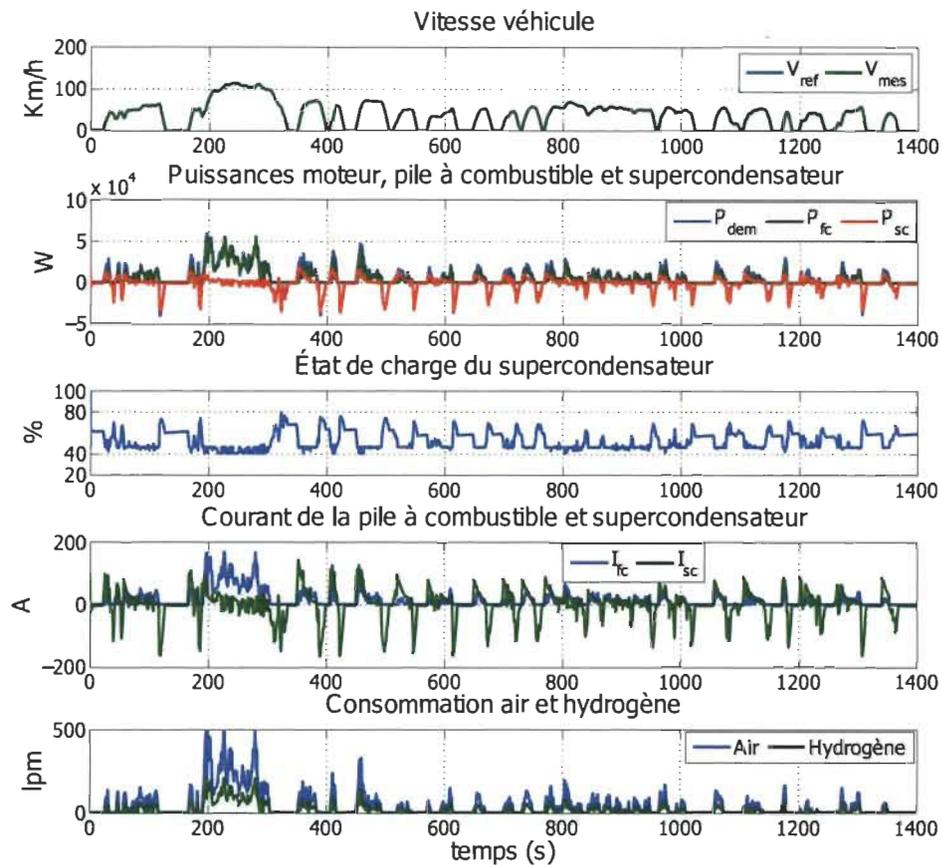


Figure 4.23 Résultat de simulation de la logique floue avec  $m_v = 1625 \text{ kg}$  et  $V = 2 \times V_{ref}$

véhicule  $m_v = 2500 \text{ kg}$ . Dans cette figure, les conditions extrêmes sont prises en compte. On constate aussi que la puissance est répartie entre les sources. On observe, les mêmes comportements que les cas précédents. Le supercondensateur est trop sollicité, son état de charge a atteint une valeur de  $SOC_{sc} = 91 \%$  en charge et une valeur de  $SOC_{sc} = 40 \%$  en décharge. La puissance demandée a atteint également un maximum de  $P_{dem} = 75 \text{ kW}$ .

#### 4.6.2.2 Cas du parcours autoroute HWFET

La figure 4.25 représente les résultats de simulation du parcours routier **HWFET** et une masse  $m_v = 1625 \text{ kg}$ . On constate qu'au démarrage, le supercondensateur fournit la totalité de la puissance demandée. Lorsque son état de charge avoisine ( $SOC_{sc} \approx 40$

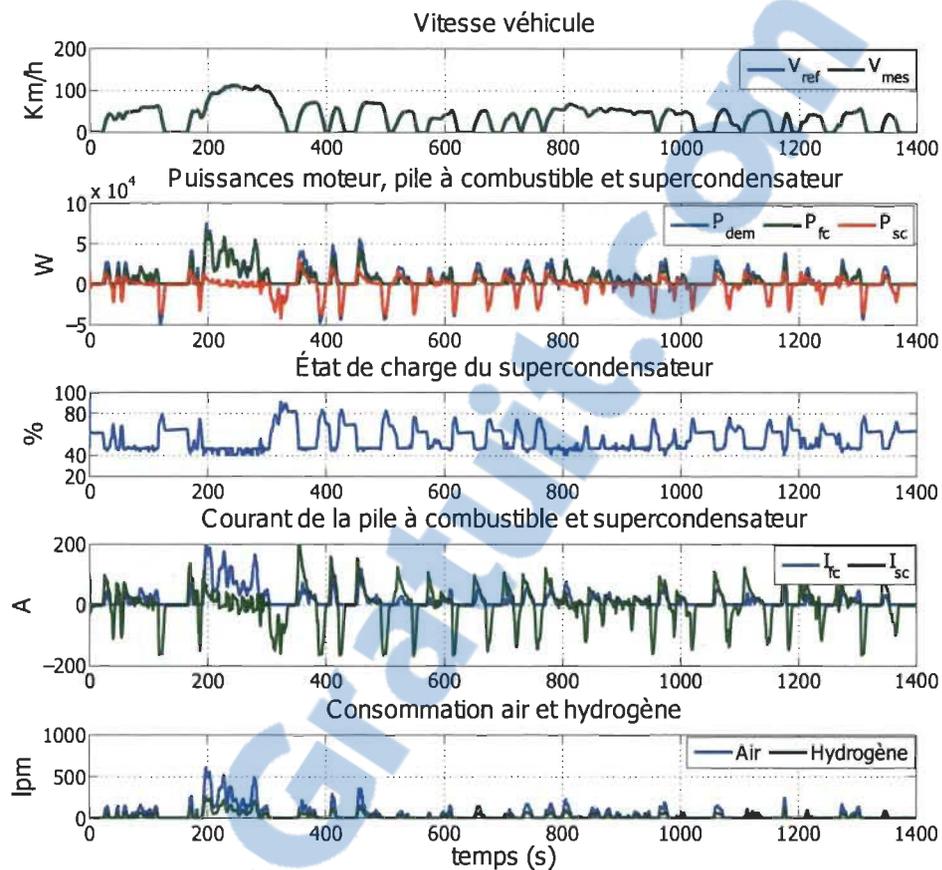


Figure 4.24 Résultats de simulation de la logique floue avec  $m_v = 2500 \text{ kg}$  et  $V = 2 \times V_{ref}$

%), la pile à combustible, à son tour, fournit la puissance demandée par le moteur. À cause de la dynamique lente de la pile à combustible, le supercondensateur comble la demande brusque en puissance durant tout le trajet. Le supercondensateur est chargé par les puissances des freinages du véhicule. À la fin du trajet, son état de charge revient pratiquement à sa valeur initiale.

La figure 4.26 montre les résultats de simulation du parcours routier **HWFET** en multipliant par deux le profil de vitesse pour atteindre la vitesse  $120 \text{ Km/h}$  et une masse du véhicule  $m_v = 1625 \text{ kg}$ . On constate que la puissance atteint un maximum de  $P_{dem} = 51 \text{ kW}$ . Le supercondensateur fournit la puissance demandée au démarrage et son état de charge a atteint rapidement une valeur de  $SOC_{sc} \approx 40 \%$ . Les mêmes remarques faites précédemment sont aussi valables. On note que lors des changements de vitesse, le

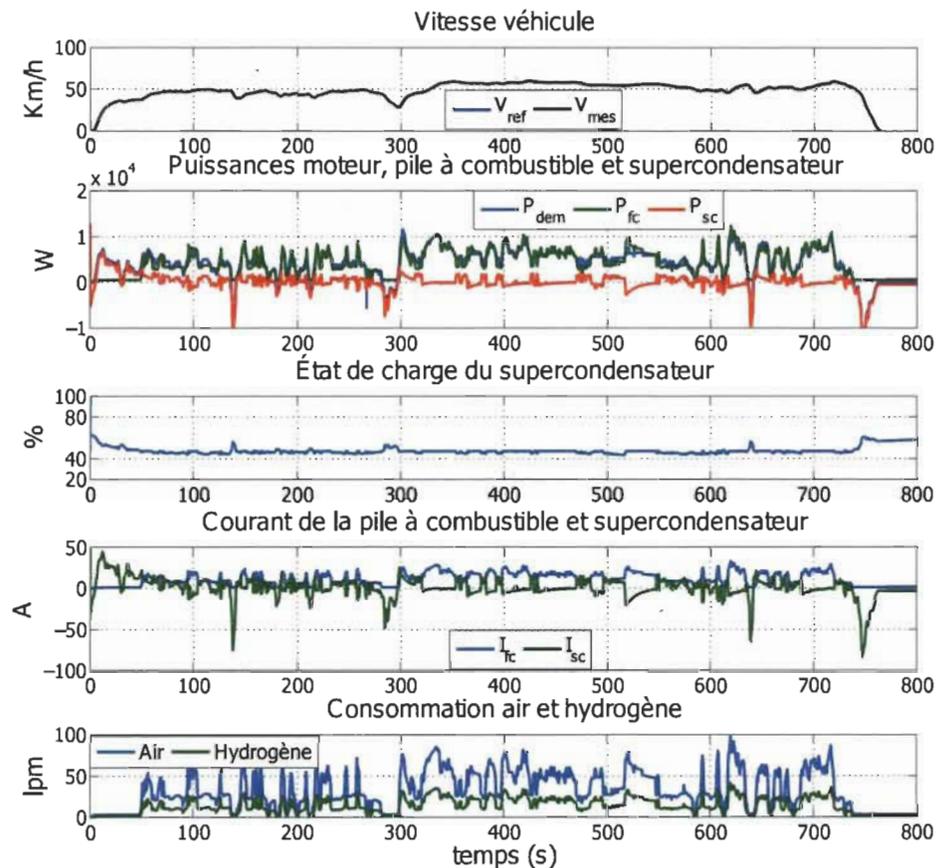


Figure 4.25 Résultats de simulation de la logique floue avec  $m_v = 1625 \text{ kg}$  et  $V = V_{ref}$

supercondensateur est plus sollicité afin de suivre les variations brusques en puissance. Son état de charge durant le parcours tend vers  $SOC_{sc} = 40 \%$ , et à la fin du parcours (arrêt) il revient à sa valeur initiale.

#### 4.6.2.3 Analyse des résultats obtenus

Le figure 4.27 représente un agrandissement de  $t = 160 \text{ s}$  et  $t = 340 \text{ s}$  des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère et freine.

Dans la figure 4.27.(a), le supercondensateur fournit la puissance demandée par la charge pendant l'accélération tant que sa charge le permet. Quand l'état de charge at-

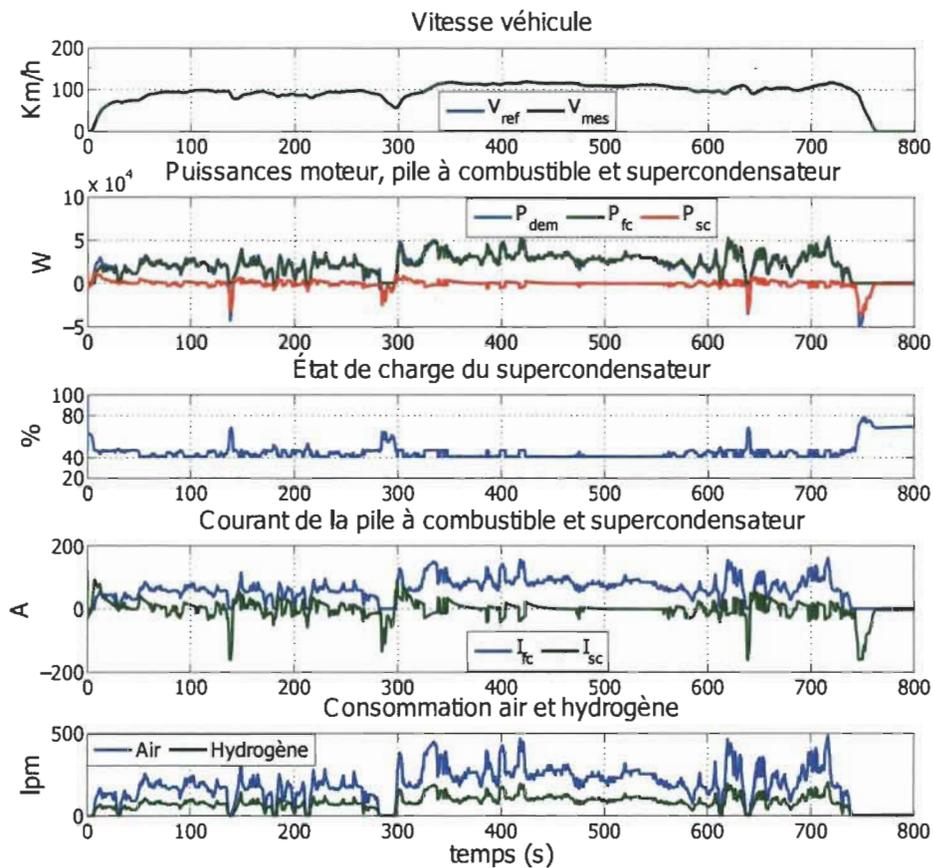
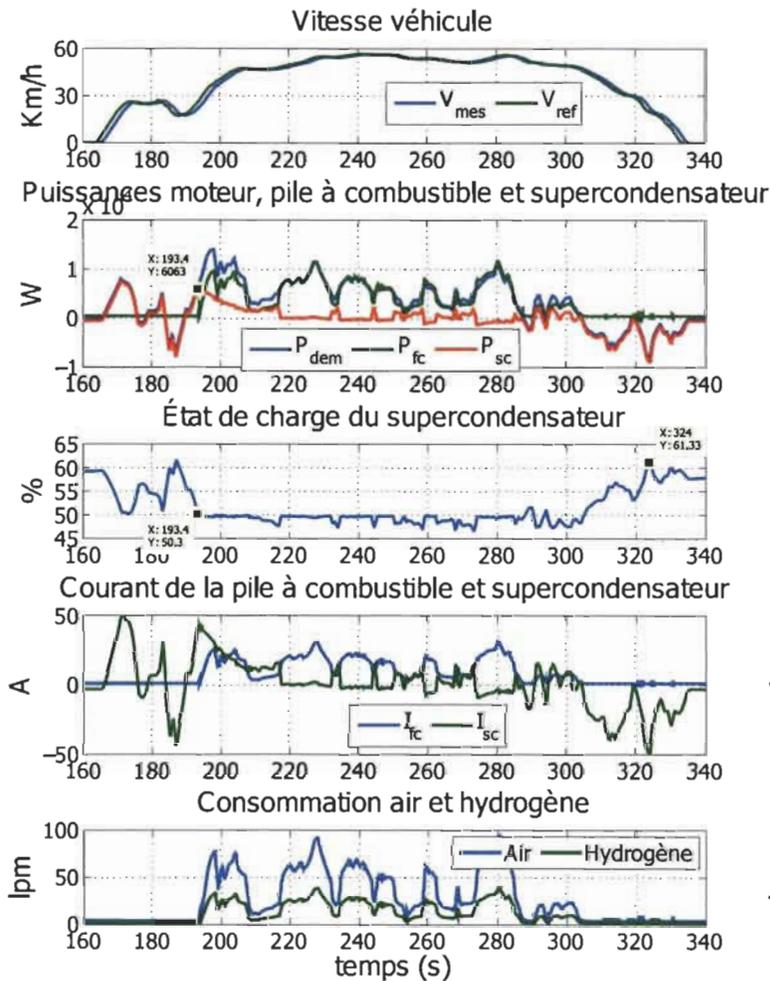
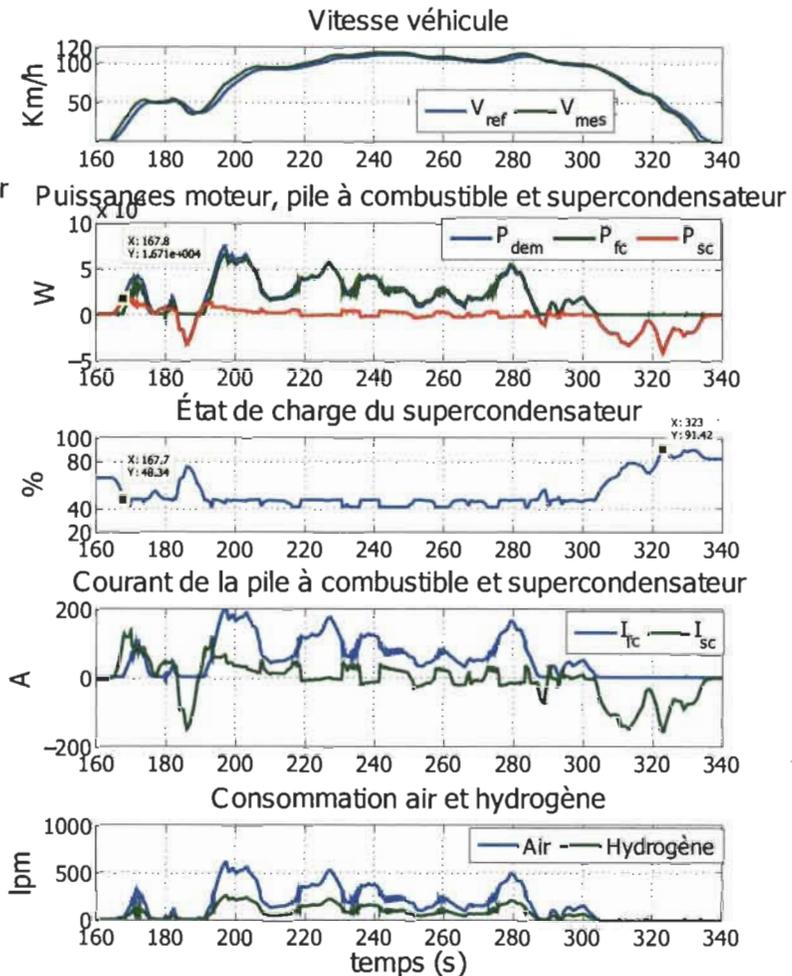


Figure 4.26 Résultats de simulation de la logique floue avec  $m_v = 1625 \text{ kg}$  et  $V = 2 \times V_{ref}$

teint 50 % et lors de l'accélération du véhicule, la pile à combustible commence à fournir une partie de la puissance demandée à partir de l'instant  $t = 193 \text{ s}$ . Avec des conditions plus exigeantes comme montrée dans la figure 4.27.(b), la puissance demandée est importante comparée avec celle de la figure 4.27.(a). En effet, lors de l'accélération, la puissance demandée par le groupe motopropulseur est fournie par le supercondensateur jusqu'à l'instant  $t = 167 \text{ s}$ , le supercondensateur atteint alors un état de charge de 48 %. La pile à combustible est donc activée pour répondre à cette demande de puissance. À partir de l'instant  $t = 200 \text{ s}$ , la pile à combustible fournit seule la totalité de la puissance demandée tandis que l'état de charge du supercondensateur est au voisinage de 40 %. Le supercondensateur épaulé donc la pile à combustible pendant les brusques changements de puissance et récupère l'énergie pendant les décélérations. À partir de l'instant  $t = 300 \text{ s}$ , le supercondensateur est chargé par le retour d'énergie issu du freinage. Il atteint une



(a)



(b)

Figure 4.27 Agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère et freine (a)  $m_v = 1625 \text{ kg}$ ,  $V = V_{ref}$  et (b)  $m_v = 2500 \text{ kg}$ ,  $V = 2 \times V_{ref}$

charge de 91 % à l'instant  $t = 323 \text{ s}$ .

Les figures 4.28 et 4.29 représentent un agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère et freine pour un parcours urbain de vitesse  $V = V_{ref}$  et  $V = 2 \times V_{ref}$  respectivement. Cet agrandissement est pris entre les instants  $t = 560 \text{ s}$  et  $t = 590 \text{ s}$ .

Dans la figure 4.28, la pile à combustible fournit une puissance minimale. Pendant l'accélération, le supercondensateur fournit la totalité de la puissance demandée par la charge ; dans la figure 4.28.(a), le supercondensateur se décharge et son état de charge atteint 51 % et il atteint 47 % dans la figure 4.28.(b). Lorsque le véhicule commence à décélérer, le supercondensateur stocke l'énergie provoquées par cette décélération.

Dans le cas de la figure 4.29. (a), le supercondensateur fournit la puissance demandée jusqu'à ce que son état de charge atteint 47 % à l'instant  $t = 571 \text{ s}$ . La pile à combustible quant à elle commence à régir à partir de l'instant  $t = 571 \text{ s}$  quand l'état de charge du supercondensateur commence à se décharger et dépasse 50 % de sa charge. Les mêmes remarques sont observées dans la figure 4.29. (b).

D'une manière générale, la puissance demandée est convenablement répartie entre la pile à combustible et le supercondensateur. Durant le parcours, le supercondensateur fournit la puissance demandée tant qu'il est assez chargé. Cet aspect est décrit par la courbe de l'état de charge du supercondensateur.

À un certain seuil de charge, le supercondensateur assiste la pile à combustible lors des accélérations, et lors des demandes brusques de puissance quand la pile ne peut les fournir à cause de sa lente dynamique. Quand l'état de charge du supercondensateur atteint un seuil de charge de  $SOC_{sc} = 40 \%$ , la pile à combustible alimente seule le groupe motopropulseur.

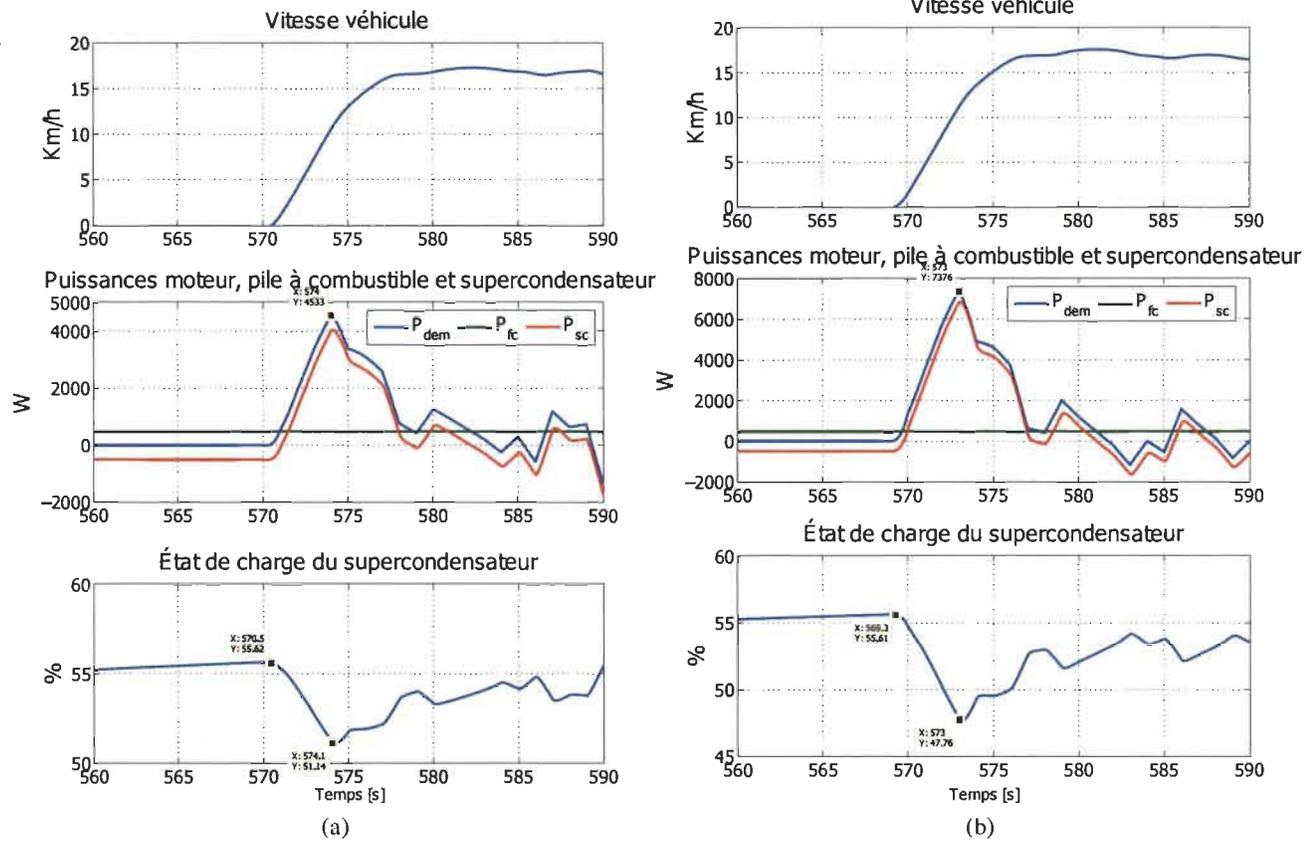


Figure 4.28 Agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère pour un parcours urbain de vitesse  $V = V_{ref}$  et une masse de (a)  $m_v = 1625 \text{ kg}$  et (b)  $m_v = 2500 \text{ kg}$

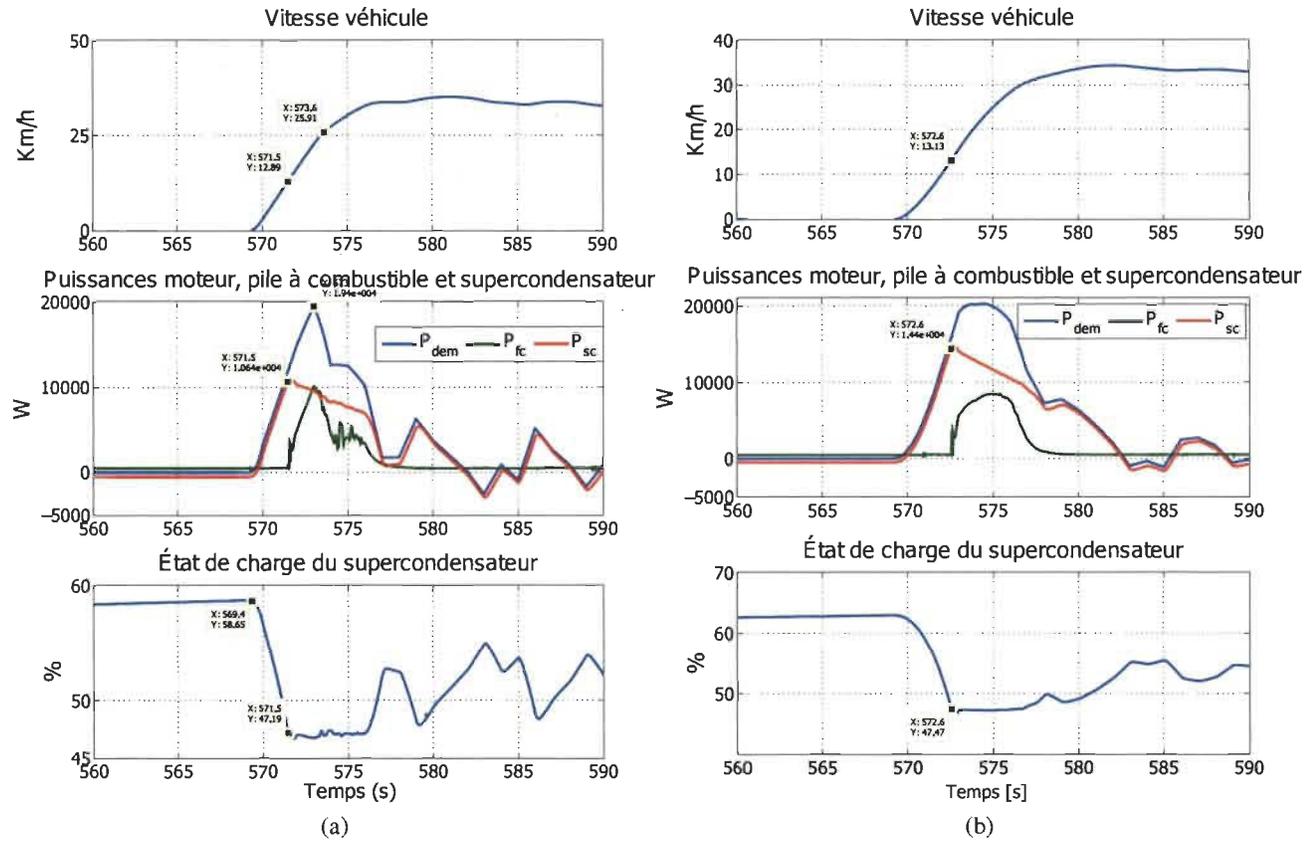


Figure 4.29 Agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère pour un parcours urbain de vitesse  $V = 2 \times V_{ref}$  et une masse de (a)  $m_v = 1625 \text{ kg}$  et (b)  $m_v = 2500 \text{ kg}$

Notons que le supercondensateur est chargé soit par le retour de puissance lors d'un freinage ou d'une descente. Dans cette étude, la charge du supercondensateur par la pile combustible n'a pas été considérée. Ce choix se justifie par le fait qu'après chaque accélération, il y aura un freinage dont on peut récupérer la puissance et charger le supercondensateur. Ce choix protège le supercondensateur des surcharges surtout si le parcours contient des freinages répétitifs ou s'il y a un freinage brusque.

#### 4.7 Conclusion

Dans ce chapitre, une stratégie à base de la logique floue a été présentée et implémentée dans l'environnement MATLAB/Simulink à l'aide de la boîte à outils SimPowerSystems. Les résultats de simulation pour les trois configurations, PAC/B, PAC/SC et PAC/B/SC ont été présentés et analysés dans des conditions et parcours routier inconnus. Le parcours routier **UDDS** a été utilisé pour évaluer les performances de la stratégie proposée. Il est connu que ce parcours routier permet d'étudier le véhicule hybride, sachant que pour ce type de parcours, le système perd de l'énergie et son rendement se dégrade.

La stratégie proposée (CLF) a satisfait les exigences en puissance pour des parcours et des conditions routières inconnus. Elle a permis d'obtenir une adéquate distribution de la puissance entre les diverses sources d'énergie du système. En outre, les résultats présentés montrent que la puissance demandée, en mode d'accélération, est fournie pratiquement par la source auxiliaire. Par conséquent, le contrôleur à base de logique floue offre une nouvelle approche pour un système de gestion d'énergie en temps réel du véhicule hybride. Les résultats de simulation indiquent que la consommation d'hydrogène est plus faible pour les configurations PAC/B et PAC/B/SC que pour la configuration PAC/SC. La configuration PAC/B/SC pourrait améliorer la durée de vie de la batterie puisqu'elle permet d'éviter la charge et la décharge rapide de la batterie.

Dans cette étude, les résultats obtenus s'approchent des objectifs à atteindre. En effet, la stratégie de gestion à base de règles décrite dans le chapitre 3, l'état de charge du supercondensateur a descendu sous une valeur inférieure à la valeur minimale tolérée. Par contre, dans la stratégie à base de la logique floue a démontrée son efficacité en maintenant borné l'état de charge du supercondensateur quels que soient le parcours ou les conditions de roulage. On note aussi sa simplicité à mettre en oeuvre. Toutefois, le principal inconvénient de cette stratégie réside dans le cumul de plusieurs règles. De plus, le traitement devient complexe de plus en plus, les temps de calcul et de simulation sont longs et l'implémentation de l'algorithme en temps réel est relativement compliquée. De plus, une connaissance du système est primordiale pour déduire les règles à utiliser dans le contrôleur à logique floue.

Dans le prochain chapitre, une stratégie de gestion en temps réel basée sur la commande optimale et l'approche du principe de minimum de Pontryagin sera présentée. Cette approche sera simplifiée en deux grandes équations et implémentée comme un contrôleur.

## CHAPITRE 5

### OPTIMISATION LOCALE À BASE DE LA COMMANDE OPTIMALE

#### Sommaire

<b>5.1 Introduction</b> . . . . .	<b>122</b>
<b>5.2 État de l'art</b> . . . . .	<b>123</b>
<b>5.3 Formulation mathématique</b> . . . . .	<b>125</b>
5.3.1 Formulation du problème d'optimisation . . . . .	125
5.3.2 Principe de minimum de Pontryagin . . . . .	126
<b>5.4 Formulation et résolution du problème de la commande optimale</b> .	<b>128</b>
5.4.1 Formulation du problème de la commande optimale . . . . .	128
5.4.2 Résolution du problème de la commande optimale . . . . .	131
<b>5.5 Résultats de simulation et discussion</b> . . . . .	<b>133</b>
5.5.1 Cas du parcours urbain <b>UDDS</b> . . . . .	136
5.5.2 Cas du parcours autoroute <b>HWFET</b> . . . . .	144
5.5.3 Analyse des résultats obtenus . . . . .	145
<b>5.6 Conclusion</b> . . . . .	<b>151</b>

#### 5.1 Introduction

Dans ce chapitre, le problème de la commande optimale (*CO*) est formulé comme une stratégie de minimisation de la consommation équivalente (*ECMS*). Ce problème est résolu en utilisant le principe du minimum de Pontryagin (*PMP*). L'approche proposée gère la puissance demandée aux sources d'énergie en fonction d'un parcours routier et des conditions de roulage inconnus. Cette stratégie en temps réel est validée en utilisant

l'environnement MATLAB/Simulink sans faire au préalable une étude en temps différé ou accumuler les connaissances sur le parcours routier et les conditions de roulage.

Cette approche est simplifiée en deux grandes équations : la première calcule la variable du vecteur d'état adjoint en temps réel et la seconde déduit la puissance optimale de la pile à combustible. Cette approche doit à la fois satisfaire la puissance demandée, réduire la consommation d'hydrogène, et maintenir l'état de charge (*SOC*) du supercondensateur borné pour des parcours et des conditions de roulage inconnus.

Ce chapitre est structuré en cinq sections. La section 5.2 résume l'état de l'art. La section 5.3 décrit la formulation mathématique du problème de l'optimisation et le principe de minimum de Pontryagin. La section 5.4 présente la formulation du problème de la commande optimale. La section 5.5 expose les résultats de la simulation et la section 5.6 est réservé à la conclusion.

## 5.2 État de l'art

Plusieurs stratégies de gestion de l'énergie se basant sur la théorie de la commande optimale ont été proposées pour contrôler le partage de la puissance entre les deux sources d'alimentation et la charge électrique.

Dans la référence [58], on a présenté la commande optimale basée le principe du minimum de Pontryagin. Les résultats de simulation sont les mêmes que les résultats de la programmation dynamique.

Dans la référence [59], on a formulé un problème de la commande optimale basé sur le cumule du  $CO_2$  produit par le véhicule. Le principe minimum de Pontryagin a ensuite été appliqué pour transformer le problème d'optimisation globale à une minimisation locale permettant au problème de commande d'être résolu et implémentée sous forme d'un

algorithme.

Dans la référence [60], les auteurs ont présenté deux formulations de la commande optimale résolues par la programmation dynamique. Ces formulations ont été utilisées pour de courts trajets. L'inconvénient de cette stratégie est que la programmation dynamique n'est pas utilisée en temps réel ; puisque la recherche de la solution du problème est effectuée en temps différé.

Dans la référence [61], les auteurs ont formulé le problème de la commande optimale basé sur le principe du minimum de Pontryagin. La spécificité de cette stratégie est qu'elle réalise l'optimisation en temps réel sans connaître les conditions de conduite futures. Elle se repose seulement sur la connaissance de la durée du trajet et de l'énergie de retour disponible lors d'un freinage.

Dans la référence [62] on a présenté une comparaison du vecteur d'état adjoint constant et variable d'un système utilisant une stratégie de commande optimale basée sur le principe du minimum.

Dans la référence [63], on a résolu un problème d'optimisation à base de commande optimale en utilisant l'approche du principe de minimum de Pontryagin. Le vecteur d'état adjoint a été approximé par des simulations du parcours urbain normalisé.

Signalons que plusieurs études récentes indiquent que la résolution d'un problème de la commande optimale dépend de quelques paramètres qui doivent être réglés en fonction des conditions de conduite futures ; sachant que ces conditions sont importantes pour trouver une solution globale optimale.

Dans ce chapitre, une approche d'optimisation en temps réel se reposant sur la commande optimale et basée sur le principe du minimum de Pontryagin est mise en œuvre. Elle est appliquée à un véhicule hybride à deux sources d'alimentation : la pile à combus-

tible jouant le rôle de la source de puissance primaire, et une source d'énergie secondaire (le supercondensateur).

### 5.3 Formulation mathématique

#### 5.3.1 Formulation du problème d'optimisation

Le modèle du véhicule hybride est exprimé en temps discret par l'équation (5.1).

$$x(k+1) = f(x(k), u(k)) \quad (5.1)$$

avec  $u(k)$  est le vecteur de commande, et  $x(k)$  est le vecteur d'état.

L'objectif de l'optimisation est de trouver le vecteur de commande optimal  $u(k)$  qui minimise la consommation totale en hydrogène et maintenir borné l'état de charge de la source auxiliaire. L'équation (5.2) donne l'expression de la fonction coût à minimiser.

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} L(x(k), u(k)) \quad (5.2)$$

avec  $N$  est le temps d'un cycle routier, et  $L$  est la consommation instantanée.

Il est nécessaire d'imposer les contraintes représentées pour les équations (5.3) et (5.4).

$$x_{min} \leq x \leq x_{max} \quad (5.3)$$

$$u_{min} \leq u_{fc} \leq u_{max} \quad (5.4)$$

Le vecteur d'état  $x$  doit être maintenu proche de son état initial. Dans ce cas, l'évolution du vecteur d'état est donc ajoutée à la fonction de coût comme une fonction de pénalité [25].

L'équation (5.2) prendra alors la forme de l'expression (5.5).

$$J = \sum_{k=0}^{N-1} L(x(k), u(k)) + G(x(N)) \quad (5.5)$$

La fonction de pénalité est donnée par l'équation (5.6).

$$G(x(N)) = \alpha(SOC(N) - SOC(0))^2 \quad (5.6)$$

avec  $\alpha$  est le facteur de pondération (il est déterminé par essai et erreur).

### 5.3.2 Principe de minimum de Pontryagin

On considère le système de contrôle dans  $R^n$  exposé dans la référence [64].

$$\dot{x}(t) = f(t, x(t), u(t)) \quad (5.7)$$

avec  $f = R \times R^n \times R^m \longrightarrow R^n$  et de classe  $C^1$ <sup>1</sup>

$x(t) \in R^n$  : vecteur d'état

et  $u(t) \in R^m$  : vecteur de commande

Le problème de contrôle optimal s'écrit sous la forme d'une fonction coût sur  $[t_0, t_f]$  :

$$\mathfrak{S} \left\{ \begin{array}{l} \min J(x, u) = \int_{t_0}^{t_f} L(t, x(t), u(t)) dt + G(t_f, x(t_f)) \\ \dot{x}(t) = f(t, x(t), u(t)) \\ u(t) \in U \\ x_i(t_0) = x_{i^0}, i \in I^0 \subset 1, \dots, n \\ x_i(t_f) = x_{i^f}, i \in I^f \subset 1, \dots, n \end{array} \right. \quad (5.8)$$

où  $L = R \times R^n \times R^m \longrightarrow R$  et  $G = R \times R^n \longrightarrow R$  sont de classe  $C^1$ .

1. Soit  $f$  une fonction définie sur un intervalle  $I$  de  $R$ .  
On dit que  $f$  est de classe  $C^1$  si  $f$  est dérivable sur  $I$ , et  $f'$  est continue sur  $I$ .

Soit  $M_0$  et  $M_1$  deux sous ensemble de  $R^n$ . L'ensemble  $U$  est l'ensemble des vecteurs de contrôle admissibles  $u$ . Son trajectoire dépend du point initial  $M_0$  à un point final de  $M_1$ .

Le problème de contrôle optimal consiste à déterminer une trajectoire reliant  $M_0$  à  $M_1$  et minimiser la fonction coût.

Le Hamiltonien du système est donné par l'expression (5.9).

$$\begin{aligned} H = R \times R^n \times U \times R^+ \times R^m &\longrightarrow R^n \\ (t, x, u, \lambda_0, \lambda) &\longmapsto \lambda_0 L(t, x, u) + (\lambda | f(t, x, u)) \end{aligned} \quad (5.9)$$

Si  $(x(\cdot), u(\cdot))$  est une solution, alors il existe  $\lambda_0 \geq 0$  et  $\lambda(\cdot) = (\lambda_1(\cdot), \dots, \lambda_n(\cdot))$  non simultanément nuls.

### 1. l'équation adjointe

$$\dot{\lambda}(t) = -\partial_x H(t, x(t), u(t), \lambda_0, \lambda(t)) \quad (5.10)$$

### 2. la minimisation du Hamiltonien

$$M(t) = H(t, x(t), u(t), \lambda_0, \lambda(t)) = \begin{cases} \min H(t, x(t), u(t), \lambda_0, \lambda(t)) \\ u \in U \end{cases} \quad (5.11)$$

### 3. les conditions de transversalité

$$\begin{cases} \lambda_i(t_0) = 0 & , \quad i \notin I^0 \\ \lambda_i(t_f) = 0 & , \quad i \notin I^f \end{cases} \quad (5.12)$$

## 5.4 Formulation et résolution du problème de la commande optimale

### 5.4.1 Formulation du problème de la commande optimale

Le problème de la commande optimale est formulé pour minimiser la consommation équivalente d'hydrogène. En plus, cette approche doit protéger le supercondensateur contre les surcharges au cours de l'accumulation d'énergie des freinages répétitifs.

La consommation d'hydrogène équivalente est décomposée en deux équations. La première convertit la consommation d'énergie du supercondensateur en fonction de la quantité équivalente d'hydrogène, et la deuxième représente la consommation d'hydrogène par la pile à combustible.

La fonction objectif  $J$  est donnée par l'équation (5.13). Minimiser la fonction objective mène à trouver la répartition optimale de la puissance entre la pile à combustible et le supercondensateur.

La variable de commande  $u(t) = P_{fc}(t)$  est considérée égale à la puissance de la pile à combustible. La puissance du supercondensateur est alors donnée par l'équation (5.14).

$$J = \int_{t_0}^{t_f} \left( \dot{m}_{fc}(P_{fc}(t)) + \dot{m}_{sc}(SOE, P_{fc}(t)) \right) dt \quad (5.13)$$

$$P_{sc}(t) = P_{dem}(t) - P_{fc}(t) \quad (5.14)$$

avec  $\dot{m}_{fc}$  est la consommation instantanée de la pile à combustible ( $kg/s$ ),  $\dot{m}_{sc}$  est la consommation instantanée équivalente en hydrogène au niveau du supercondensateur ( $kg/s$ ).  $P_{dem}$ ,  $P_{fc}$  et  $P_{sc}$  sont respectivement la puissance du motopropulseur, la puissance de la pile à combustible et la puissance du supercondensateur ( $W$ ).  $LHV_{H_2}$  est la plus faible valeur calorifique de l'hydrogène ( $Mj/kg$ ).

La relation entre l'état de charge et l'énergie du supercondensateur est donnée par l'équation (5.15).

$$SOE(t) = SOC^2(t) \quad (5.15)$$

L'état de charge du supercondensateur est défini par l'équation (5.16), et son courant  $I_{sc}$  est obtenu à partir de l'équation (5.17).

$$SOC(t) = \frac{V_{sc}(t)}{V_{sc.max}} \quad (5.16)$$

$$I_{sc}(t) = C\dot{V}_{sc}(t) \quad (5.17)$$

La dynamique du système est présentée par l'équation (5.18).

$$S\dot{O}E(t) = \frac{2P_{sc}(t)}{CV_{sc.max}^2} \quad (5.18)$$

avec  $C$  est la capacité du supercondensateur ( $F$ ) et  $V_{sc.max}$  est sa tension maximale ( $V$ ).

Signalons que pour déterminer l'expression (5.18), on dérive par rapport au temps, l'équation (5.15). On aboutit à la formule (5.19).

$$\begin{aligned} S\dot{O}E(t) &= S\dot{O}C^2(t) \\ &= 2SOC(t)S\dot{O}C(t) \\ &= 2 \frac{V_{sc}}{V_{sc.max}} \frac{\dot{V}_{sc}}{V_{sc.max}} \\ &= 2 \frac{V_{sc}}{V_{sc.max}} \frac{I_{sc}}{C.V_{sc.max}} \\ &= \frac{2P_{sc}}{CV_{sc.max}^2} \end{aligned} \quad (5.19)$$

Les contraintes locales du système sont décrites par l'équation (5.20).

$$\begin{cases} P_{fc.min} \leq P_{fc} \leq P_{fc.max} \\ P_{sc.min} \leq P_{sc} \leq P_{sc.max} \\ SOC_{sc.min} \leq SOC_{sc} \leq SOC_{sc.max} \end{cases} \quad (5.20)$$

Le Hamiltonien du problème peut être défini par l'équation (5.21) [60], [58], [61] :

$$H = \dot{m}_f(P_{fc}(t)) + \dot{m}_{sc}(SOE, P_{fc}(t)) + \lambda(t)\dot{SOE}(t) \quad (5.21)$$

avec  $\lambda(t)$  est la fonction de l'état adjoint. Les équations d'état et du vecteur adjoint sont définies par les équations (5.22) et (5.23) [58, 61].

$$\dot{SOE}(t) = \frac{\partial H(t, SOE(t), P_{fc}(t), \lambda(t))}{\partial \lambda} \quad (5.22)$$

$$\dot{\lambda}(t) = -\frac{\partial H(t, SOE(t), P_{fc}(t), \lambda(t))}{\partial SOE} \quad (5.23)$$

Selon le principe du minimum de Pontryagin, la variable de commande optimale,  $P_{fc}^*$ , est obtenue en imposant la condition définie par l'équation (5.24).

$$\frac{\partial H(t, SOE(t), P_{fc}(t), \lambda(t))}{\partial P_{fc}} = 0 \quad (5.24)$$

La résolution des conditions nécessaires d'équations (5.22), (5.23) et (5.24) conduit à la solution du problème du principe du minimum de Pontryagin. La condition limite doit être satisfaite. Elle s'exprime par l'équation (5.25) [65].

$$SOE(t_i) = SOE(t_f) \quad (5.25)$$

Dans ce travail, les conditions du parcours routier futures et sa durée du  $t_f$  sont inconnues.

#### 5.4.2 Résolution du problème de la commande optimale

La résolution du problème de la commande optimale basée sur les équations (5.22), (5.23) et (5.24) est appliquée sur le Hamiltonien pour trouver une solution optimale.

La consommation de l'hydrogène au niveau de la pile à combustible peut être exprimée par une équation de second degré en fonction de la puissance de la pile à combustible (équation (5.26)). Rappelons que dans la section 2.3.1, on a donnée le modèle dynamique de la pile à combustible.

$$\dot{m}_{fc}(t) = a P_{fc}^2(t) + b P_{fc}(t) + c \quad (5.26)$$

avec  $a$  et  $b$  sont des constantes liées aux caractéristiques de la pile à combustible. La consommation équivalente en hydrogène au niveau du supercondensateur est exprimée par l'équation (5.27). Cette consommation dépend du facteur de pondération  $s(t)$  défini par l'équation (5.28).

L'équation du facteur de pondération a pour role de régler l'état de charge du supercondensateur et donc de le maintenir borné. De plus, ce facteur exprime la consommation équivalente en hydrogène au niveau du supercondensateur.

$$\dot{m}_{sc}(t) = s(t)P_{sc}(t) \quad (5.27)$$

$$s(t) = \frac{\sqrt{SOE(t)} - 1}{LHV_{H_2}SOC_{min}SOC_{max}} \quad (5.28)$$

L'équation (5.21) du Hamiltonien peut être écrite en fonction des équations (5.18),

(5.26) et (5.27).

$$H = a P_{fc}^2(t) + b P_{fc}(t) + c + \frac{\sqrt{SOE(t)} - 1}{LHV_{H_2} SOC_{min} SOC_{max}} P_{sc}(t) + \lambda(t) \frac{2P_{sc}(t)}{CV_{sc,max}^2} \quad (5.29)$$

Les équations (5.22), (5.23) et (5.24) peuvent être alors résolues sachant la nouvelle équation (5.29) du Hamiltonien.

En combinant les équations (5.22) et (5.23), on détermine la nouvelle équation de la fonction d'état adjoint (5.30).

$$\begin{aligned} \dot{\lambda}(t) &= - \frac{\partial H(t, SOE(t), P_{fc}(t), \lambda(t))}{\partial SOE} \\ &= - \frac{CV_{max}^2 \dot{SOE}(t)}{LHV_{H_2} SOC_{min} SOC_{max} \sqrt{SOE(t)}} \end{aligned} \quad (5.30)$$

L'équation (5.31) donne la nouvelle expression de la puissance de la pile à combustible.

$$P_{fc}^*(t) = \frac{1}{2a} \left[ \frac{\sqrt{SOE(t)} - 1}{LHV_{H_2} SOC_{min} SOC_{max}} + \frac{2\lambda}{CV_{max}^2} - b \right] \quad (5.31)$$

La quantité  $\frac{\sqrt{SOE(t)} - 1}{LHV_{H_2} SOC_{min} SOC_{max}}$  n'est pas transformée même si elle contient le vecteur d'état  $SOE$ . La raison est que cette quantité permet maintenir borné l'état de charge du supercondensateur et donc d'éliminer une équation contrainte pour assouplir et simplifier la résolution du problème de la commande optimale.

La puissance de la pile à combustible est soumise à une nouvelle contrainte (équation (5.32)) [66].

$$P_{fc}^*(t) = \begin{cases} P_{fc,min} & \text{si } P_{fc}^*(t) < P_{fc,min} \\ P_{fc,max} & \text{si } P_{fc}^*(t) > P_{fc,max} \\ \text{équation(5.31)} & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.32)$$

La figure 5.1 donne une représentation schématique du contrôleur à base de la commande optimale [66]. C'est un contrôleur en boucle fermée. L'équation (5.32) est représentée par le bloc de calcul du vecteur de commande  $u^*(t)$  et le bloc de saturation. L'équation (5.31) est implémentée dans le bloc de calcul de  $\dot{\lambda}(t)$  et suivie d'un intégrateur pour avoir l'état adjoint  $\lambda^*(t)$ .

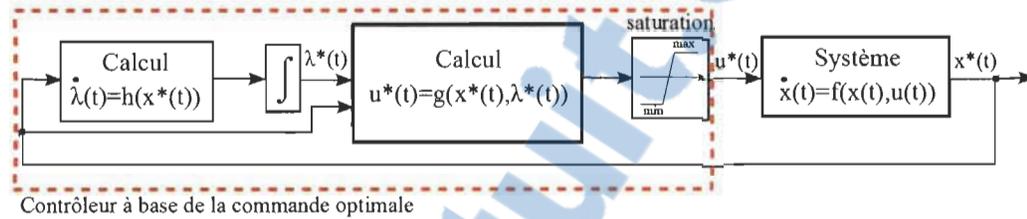


Figure 5.1 Représentation schématique du contrôleur à base de la commande optimale

La figure 5.2 décrit l'implémentation de ce contrôleur dans l'environnement Simulink.

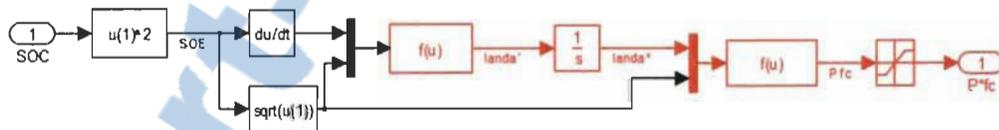


Figure 5.2 Implémentation du contrôleur dans l'environnement Simulink

## 5.5 Résultats de simulation et discussion

L'environnement MATLAB/Simulink et la boîte à outils SimPowerSystems ont été utilisés pour modéliser les éléments électriques et mécaniques du véhicule hybride. La pile à combustible est une (PEMFC) 'Proton Exchange Membrane Fuel Cell' de 400 cell, 288  $V_{cc}$ , 100  $kW$ . Ses paramètres sont données dans le tableau 2.2.

Le supercondensateur utilisé est le **BMOD0500 P016**, dont les paramètres nominaux sont  $16\text{ V}$ ,  $500\text{ F}$ . La machine électrique est une machine synchrone à aimants permanents (PMSM) de  $288\text{ V}_{cc}$ ,  $100\text{ kW}$ . Le modèle mécanique du véhicule a été réalisé à l'aide de l'environnement Simulink et les boîtes à outils SimPowerSystems et SimDriveline [39]. Les paramètres du véhicule sont donnés dans le tableau 2.1. Ils correspondent aux paramètres du véhicule Honda Clarity [1].

La figure 5.3 montre le système au complet étudié. La puissance de la pile à combustible est calculée dans le bloc de la commande optimale. Le courant de la pile à combustible est comparé avec le courant mesuré afin de commander le hacheur abaisseur à travers un régulateur PI. Le bloc, nommé de la commande optimale, calcule la puissance optimale de pile à combustible lors d'un cycle d'entraînement, et la puissance du supercondensateur est déduite par la différence entre la puissance demandée et la puissance de la pile à combustible. Le calcul de la puissance optimale de la pile à combustible et la connaissance de l'état d'énergie du supercondensateur sont nécessaires pendant le parcours (en temps réel). Cet état d'énergie  $SOE(t)$  est appliqué à l'entrée du bloc de la commande optimale. Il doit être maintenu borné afin d'augmenter la durée de vie du supercondensateur et le protéger des surcharges. Cette méthode donne une indépendance au système pour calculer la variable d'état adjoint. La connaissance des conditions de roulage et du parcours routier n'est pas requise. L'équation (5.31) calcule la puissance optimale de pile à combustible et la conversion en un courant de la pile à combustible est fait par une table (lookup table). Le courant du supercondensateur est la différence entre le courant demandé et celui de la pile à combustible. On ajoute aussi, le courant de freinage qui est absorbée par le supercondensateur. Le convertisseur de freinage est mis en place pour absorber le surplus de courant qui n'est pas autorisé par constructeur du supercondensateur et dissiper le surplus de puissance lorsque le supercondensateur est chargé.

Dans cette simulation, le problème de la commande optimale est développé en utilisant le principe du minimum de Pontryagin et il est validé sur un parcours routier **UDDS**.

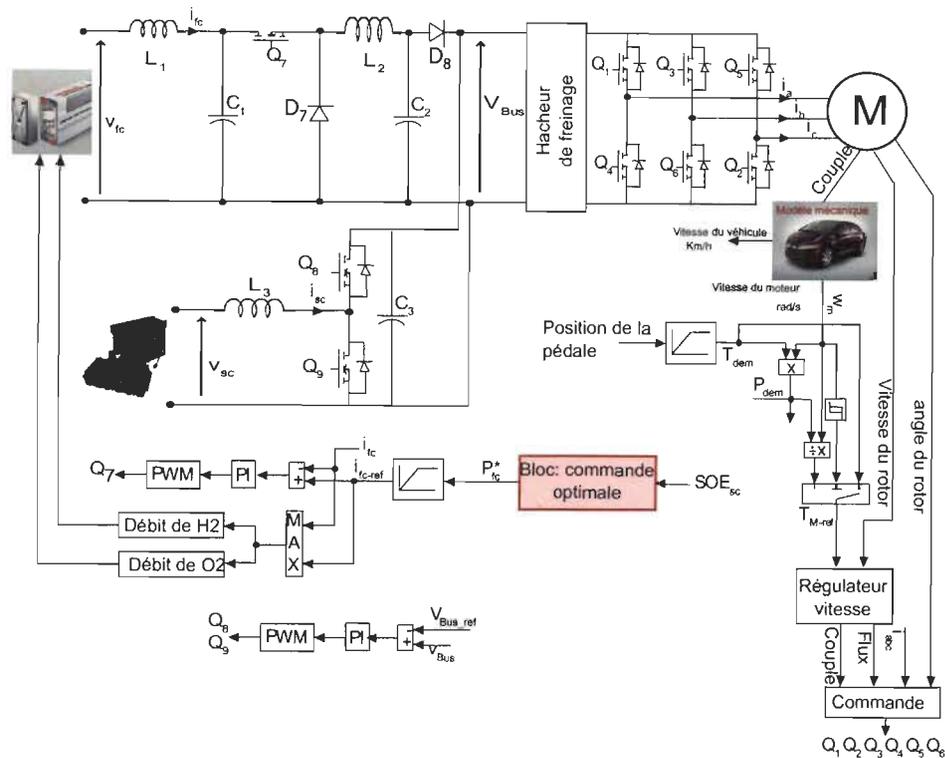


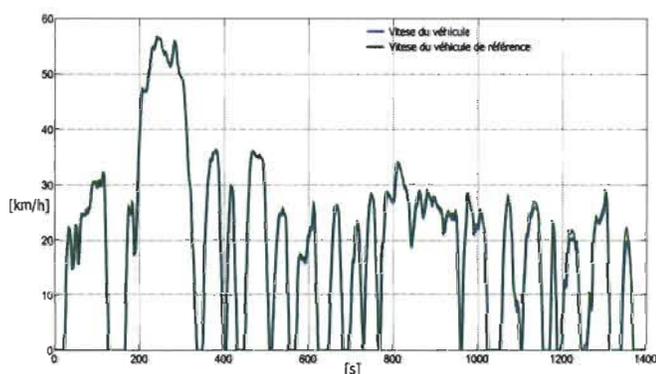
Figure 5.3 Configuration de la pile à combustible/Supercondensateur

Ce parcours qui dure 1400 s, a été choisi pour analyser les performances de la stratégie élaborée. Il contient plus d'accélération et de décélération que le parcours routier standard, ce qui engendre des pertes d'énergie et une diminution du rendement du système.

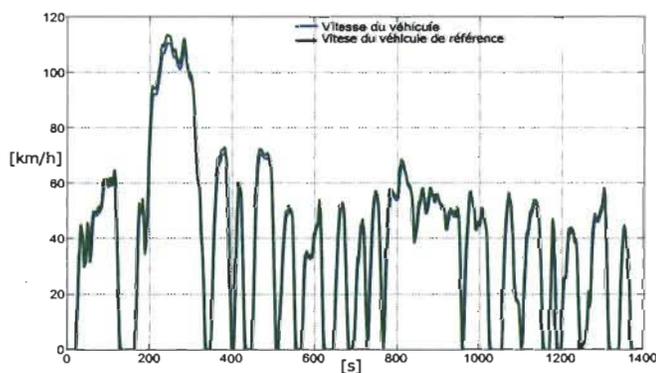
Le parcours autoroute **HWFET** a été aussi étudié. Ce parcours a été choisi pour analyser la capacité d'adaptation de cette stratégie. Le défi à réaliser dans ce parcours est, que durant le trajet qui dure 800 s, le véhicule n'effectue aucun arrêt sauf à la fin du parcours. Toutefois, les freinages et les décélération sont moins fréquents que dans le cas du parcours urbain. Dans ces conditions, la pile à combustible est beaucoup plus sollicitée et le supercondensateur ne reçoit pas beaucoup de retour de puissance pour épauler la pile à combustible.

### 5.5.1 Cas du parcours urbain UDDS

La simulation comporte deux parties pour analyser l'approche proposée en changeant les conditions de roulage. Tout d'abord, le parcours routier standard est choisi et la masse du véhicule a été fixée à  $1625 \text{ kg}$ . Deuxièmement, le parcours routier est multiplié par deux  $V_{ref} = 2 \times V_{UDDS}$ , et la masse du véhicule est imposée à  $2500 \text{ kg}$ . Les vitesses de la voiture mesurées dans ces deux cas sont représentées sur la figure 5.4.(a) et la figure 5.4.(b). Dans ces deux conditions extrêmes, on va analyser et comparer les résultats de simulation et observer le comportement énergétique du système.



(a)

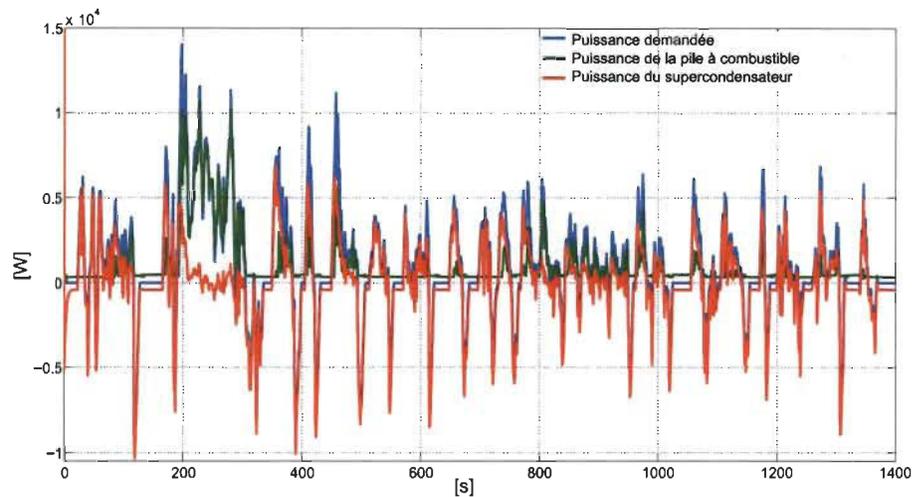


(b)

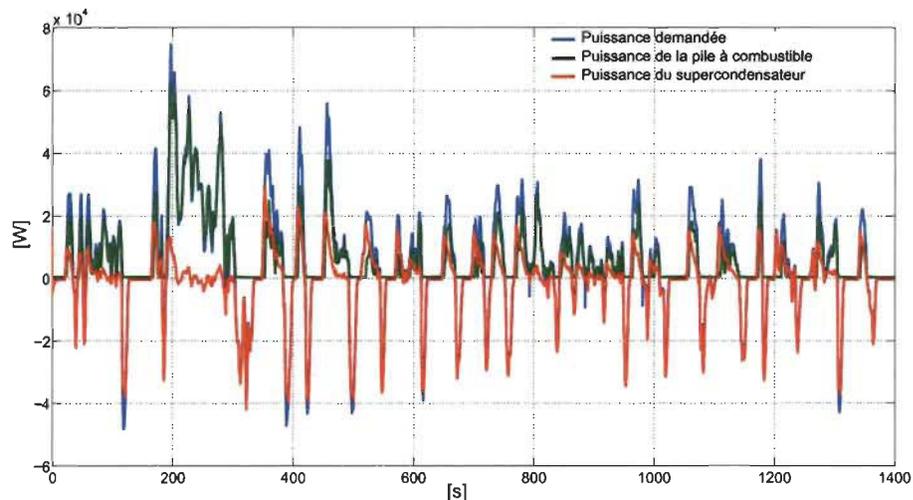
Figure 5.4 Vitesses du véhicule avec : (a)  $m_v = 1625 \text{ kg}$  et  $V_{ref} = V_{UDDS}$  (b)  $m_v = 2500 \text{ kg}$  et  $V_{ref} = 2.V_{UDDS}$

La figure 5.5.(a) et la figure 5.5.(b) illustrent les puissances obtenues à partir des deux sources. On note que la puissance demandée (puissance du moteur) au bus CC est partagée

entre la pile à combustible et le supercondensateur. Dans les deux figures, la puissance de la pile à combustible et la puissance du supercondensateur respectent les contraintes (vitesse, masse) imposées et leur évaluation est conforme au comportement prévu.



(a)



(b)

Figure 5.5 Puissances du moteur, de la pile à combustible et du supercondensateur avec :  
 (a)  $m_v = 1625 \text{ kg}$  et  $V_{ref} = V_{UDDS}$  (b)  $m_v = 2500 \text{ kg}$  et  $V_{ref} = 2 \times V_{UDDS}$

Pour les deux conditions (vitesse et masse) lors de la simulation, les courbes de l'état de charge sont présentés sur les figures 5.6.(a) et 5.6.(b).

Sur la figure 5.6.(a), on observe que l'état de charge du supercondensateur a pu atteindre une valeur minimale de  $SOC_{sc} = 51.6\%$  durant le parcours. Cependant, à la fin du parcours, l'état de charge est égal à  $SOC_{sc} = 59.7\%$ . Il est à peu près égal à l'état de charge initial  $60\%$ . On peut dire que les résultats de cette figure satisfont l'équation (5.25). Cela signifie que cette trajectoire est optimale.

La figure 5.6.(b) montre que l'état de charge a atteint durant le parcours une valeur minimale de  $SOC_{sc} = 41.7\%$ . À la fin du parcours, l'état de charge a atteint la valeur de  $67.7\%$ . La différence entre les valeurs initiale et finale est environ  $+13\%$ .

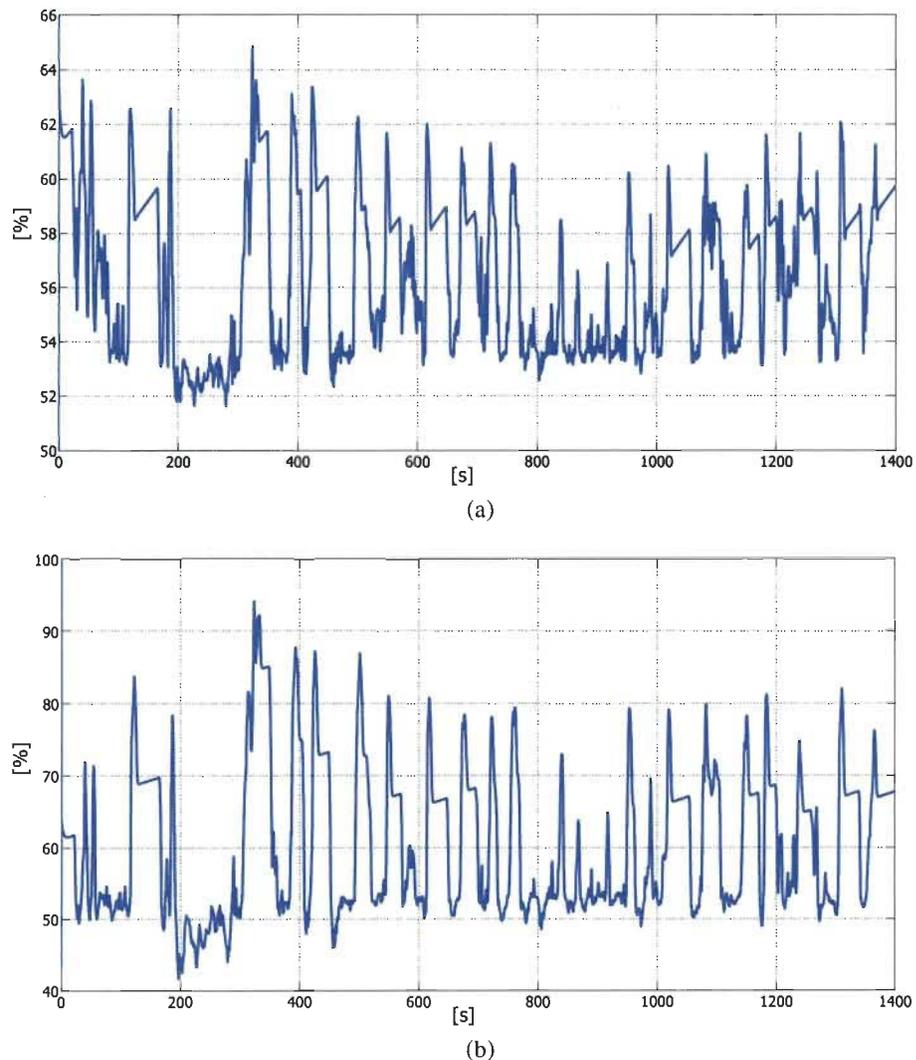
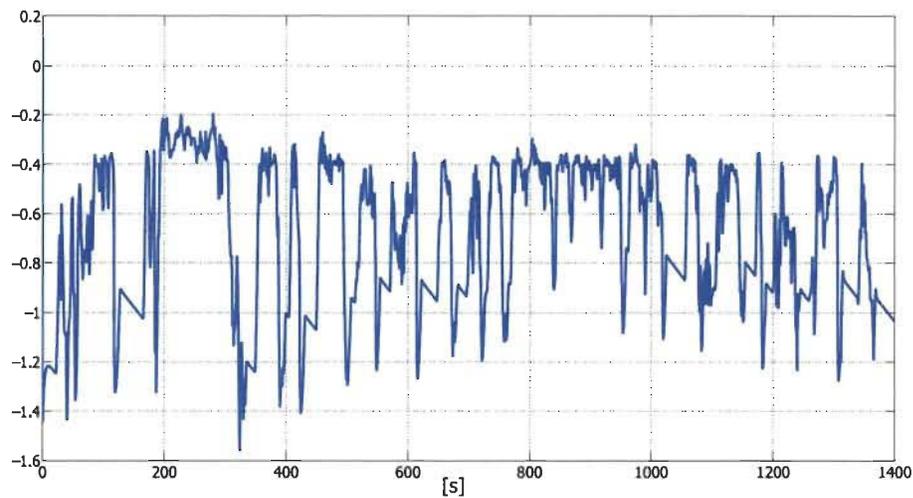
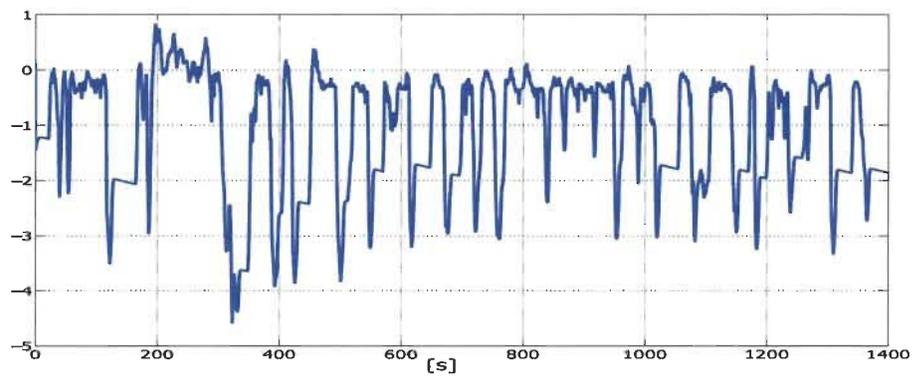


Figure 5.6 États de charge du supercondensateur avec : (a)  $m_v = 1625\text{ kg}$  and  $V_{ref} = V_{UDDS}$  (b)  $m_v = 2500\text{ kg}$  and  $V_{ref} = 2 \times V_{UDDS}$

Calculée à l'aide de l'équation (5.30), la variable de l'état adjoint pour les deux cas, est représentée sur la figure 5.7.(a) et la figure 5.7.(b). L'état d'énergie du supercondensateur pour les différents parcours routiers est important pour calculer la variable de l'état adjoint.



(a)



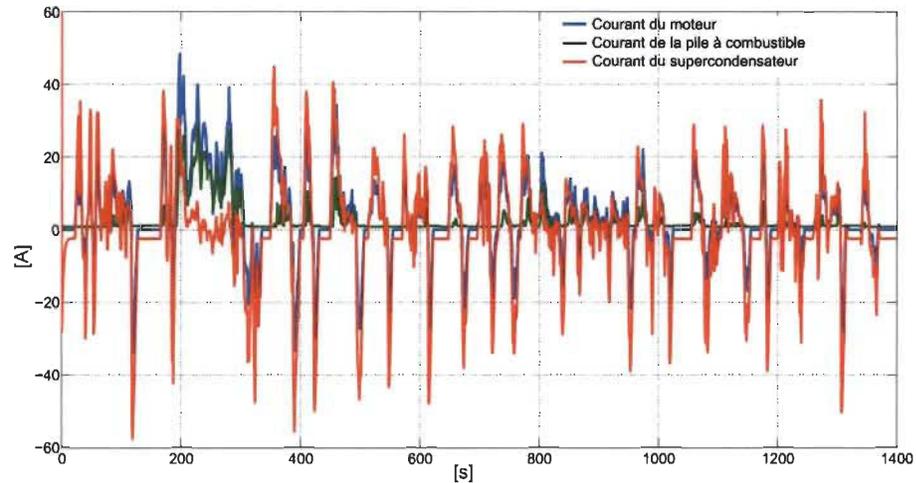
(b)

Figure 5.7 Fonction d'état adjoint avec (a)  $m_v = 1625 \text{ kg}$  et  $V_{ref} = V_{UDDS}$  (b)  $m_v = 2500 \text{ kg}$  et  $V_{ref} = 2 \times V_{UDDS}$

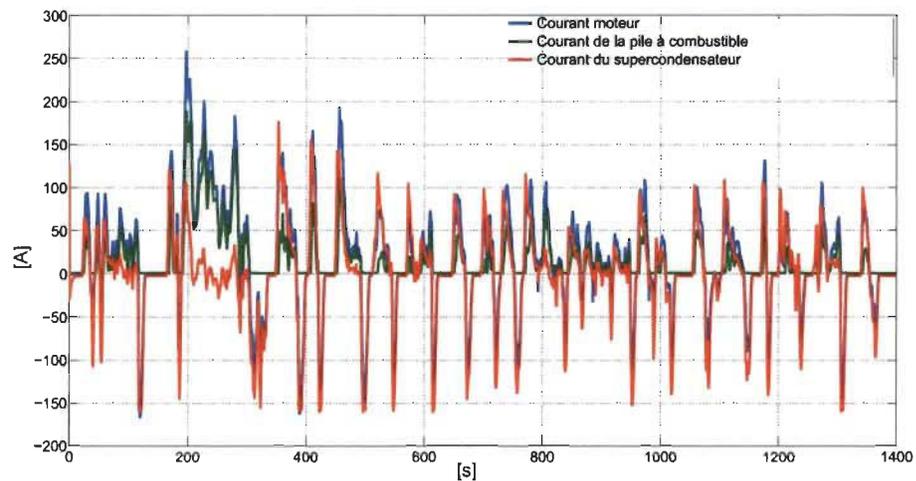
Comme le montre les figures précédentes, cette variable n'est pas constante, mais elle est calculée en temps réel et elle ne nécessite aucune étude hors ligne.

La figure 5.8.(a) et la figure 5.8.(b) montrent les courbes des courants du moteur, de

la pile à combustible et du supercondensateur pour les deux cas ( $m_v = 1625 \text{ kg}$  and  $V_{ref} = V_{UDDS}$  et  $m_v = 2500 \text{ kg}$  and  $V_{ref} = 2 \times V_{UDDS}$ ). On note que, sur la figure



(a)



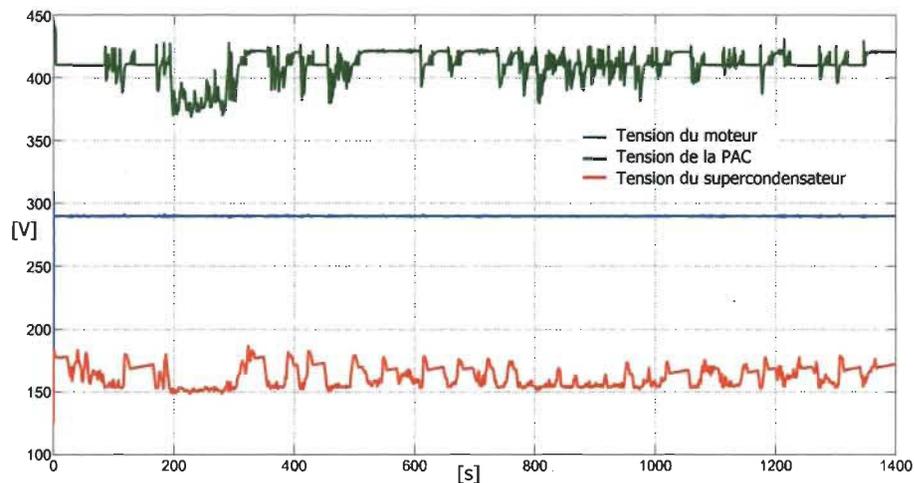
(b)

Figure 5.8 Courants du moteur, de la pile à combustible et du supercondensateur avec :  
(a)  $m_v = 1625 \text{ kg}$  et  $V_{ref} = V_{UDDS}$  (b)  $m_v = 2500 \text{ kg}$  and  $V_{ref} = 2 \times V_{UDDS}$

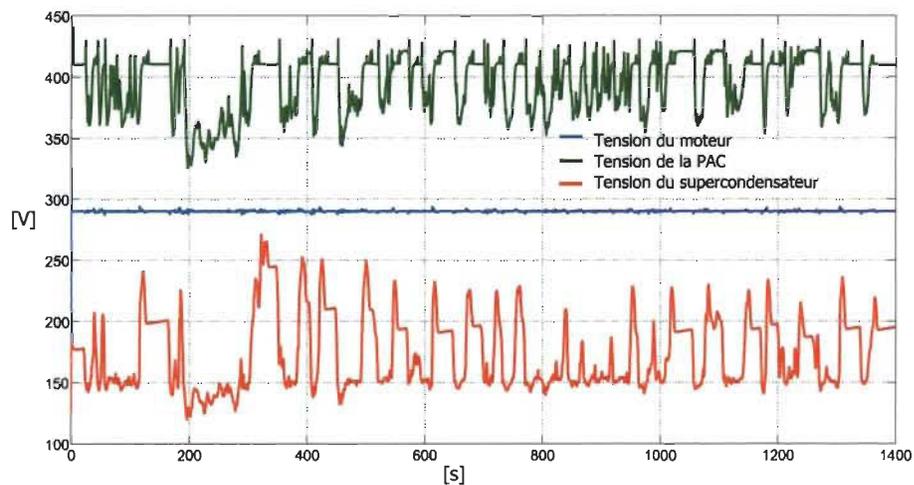
5.8, le courant du moteur a atteint, lors des accélérations, un maximum de  $48 \text{ A}$  et de  $258 \text{ A}$ , et lors des freinages des valeurs de  $33.76 \text{ A}$  et de  $-166 \text{ A}$  pour les deux cas (a) et (b) respectivement. Le courant du supercondensateur, dans le cas où il épaulé la pile à combustible, a atteint des valeurs de  $44.8 \text{ A}$  et de  $167.7 \text{ A}$  pour les deux cas (a) et (b) respectivement. Cette valeur est supérieure à  $160 \text{ A}$  et elle est tolérée par le constructeur puisqu'elle dure moins d'une seconde. Lors du retour d'énergie, le courant de freinage

vaut  $-57.5 A$  et  $-195.5 A$  pour les deux cas (a) et (b) respectivement. Le courant de la pile à combustible varie entre  $0.8 A$  et  $28.7 A$  dans le premier cas, et entre  $0.8 A$  et  $189 A$  dans le deuxième cas.

La figure 5.9.(a) et la figure 5.9.(b) illustrent les tensions de la pile à combustible et du supercondensateur. La tension du bus CC est maintenue constante à  $288 V_{cc}$ .



(a)



(b)

Figure 5.9 Tensions du moteur, de la pile à combustible et du supercondensateur avec : (a)  $m_v = 1625 kg$  and  $V_{ref} = V_{UDDS}$  (b)  $m_v = 2500 kg$  and  $V_{ref} = 2 \times V_{UDDS}$

Les figures 5.10 et 5.11 représentent les autres variables caractérisant le fonctionnement du système. La figure 5.10 présente les résultats de simulation pour le parcours

routier **UDDS** multipliée par deux et une masse de  $m_v = 1625 \text{ kg}$ .

On constate que la vitesse du véhicule varie entre 0 et  $56 \text{ km/h}$ . La puissance demandée varie aussi entre  $20 \text{ kW}$  et  $-15.5 \text{ kW}$ . Les graphiques confirment que la répartition de la puissance demandée est effectuée adéquatement entre la pile à combustible et le supercondensateur. La pile à combustible est épaulée par le supercondensateur lors des accélérations.

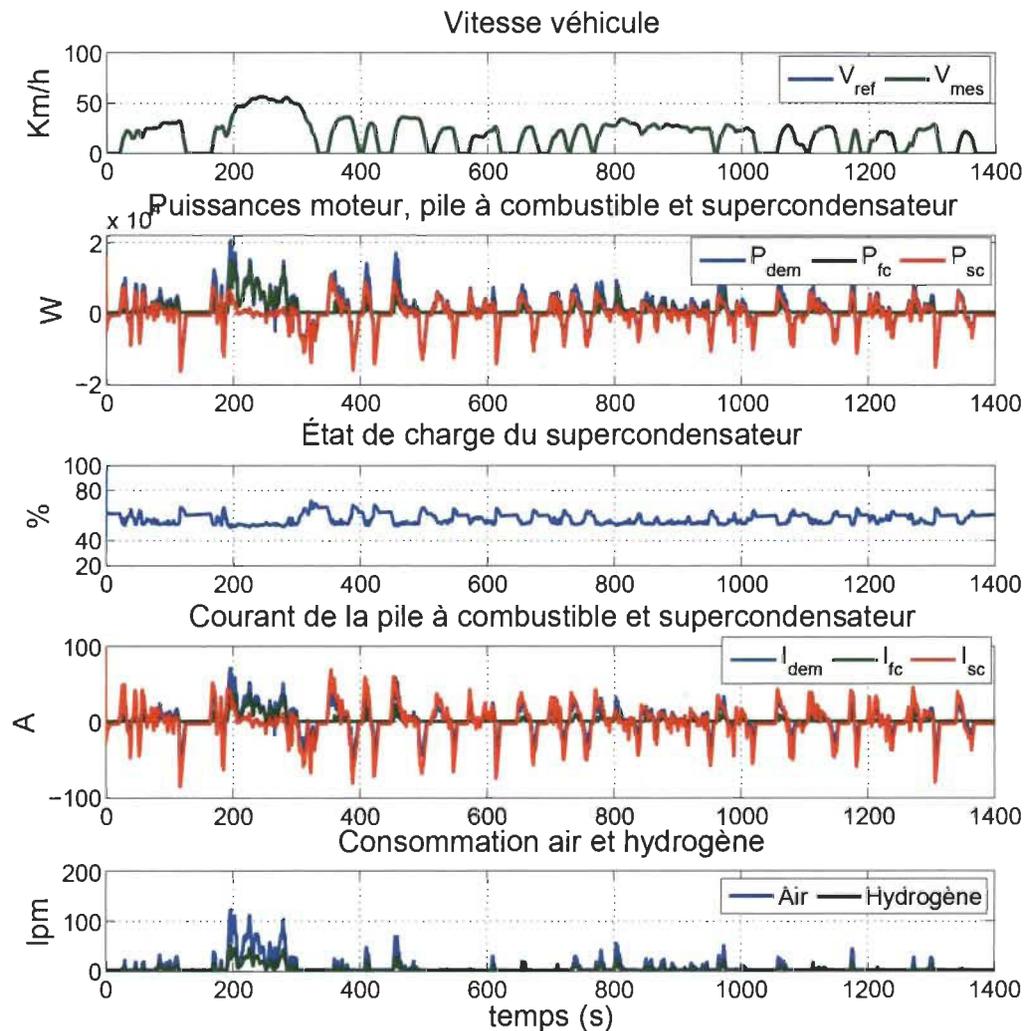


Figure 5.10 Résultats de la commande optimale pour  $m_v = 2500 \text{ kg}$  et  $V = V_{ref}$

Durant ce parcours, la valeur minimale que l'état de charge du supercondensateur a

atteint est  $SOC_{sc} = 51.5\%$ . À la fin du parcours, l'état de charge vaut  $SOC_{sc} = 60.7\%$ . On peut dire que les résultats de cette figure sont en accord avec l'équation (5.25). Cela signifie que cette trajectoire est optimale.

La figure 5.11 montre les résultats de simulation pour le parcours routier **UDDS** lorsque la masse du véhicule vaut  $m_v = 2500\text{ kg}$ . On note que la valeur minimale que

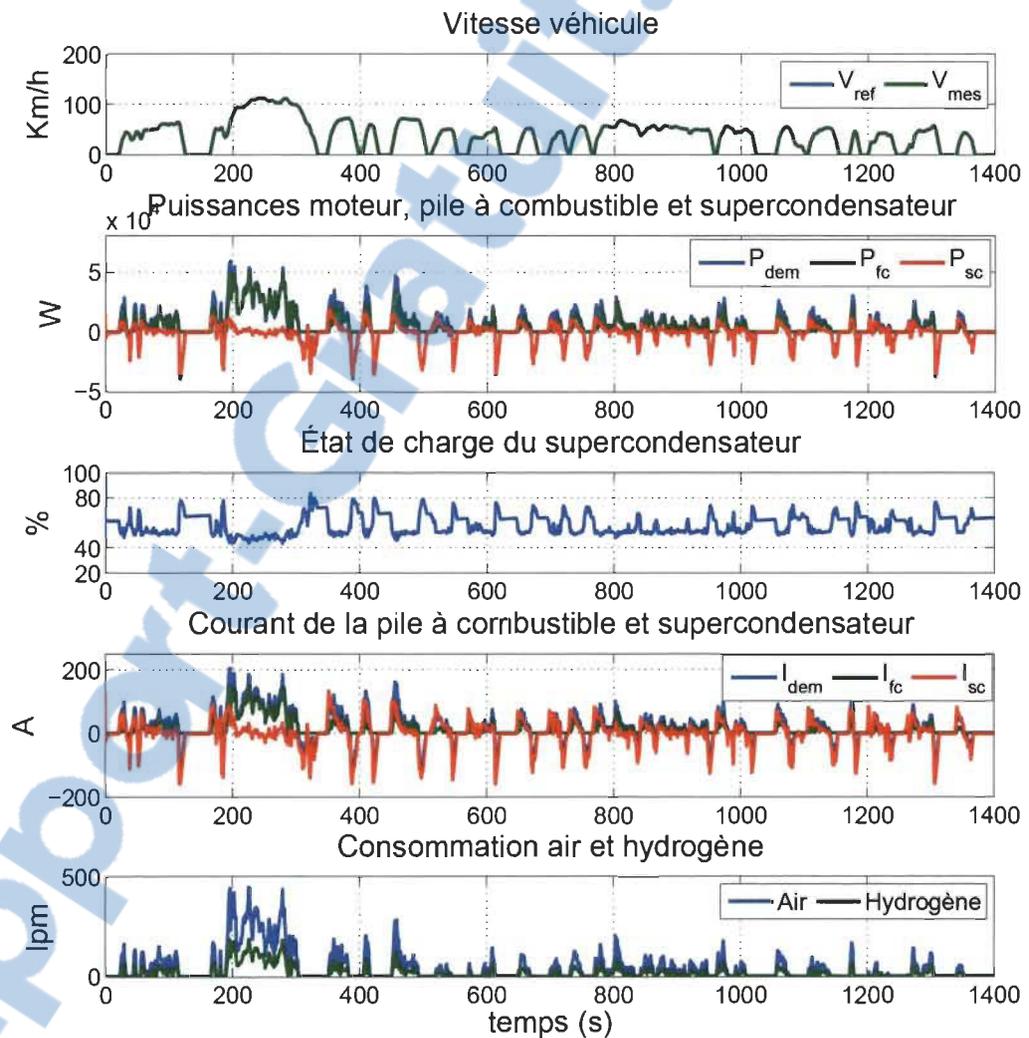


Figure 5.11 Résultats de la commande optimale pour  $m_v = 1625\text{ kg}$  et  $V = 2 \times V_{ref}$

l'état de charge du supercondensateur a atteint, durant le parcours, est égale à  $SOC_{sc} = 43.7\%$ , alors, qu'à la fin du parcours, l'état de charge est égal à  $SOC_{sc} = 64.1\%$ . Ainsi

la différence entre l'état de charge initial et final est de +7 %.

### 5.5.2 Cas du parcours autoroute HWFET

La figure 5.12 représente les résultats de simulation du parcours routier **HWFET** lorsque la masse du véhicule vaut  $m_v = 1625 \text{ kg}$ . On constate que le supercondensa-

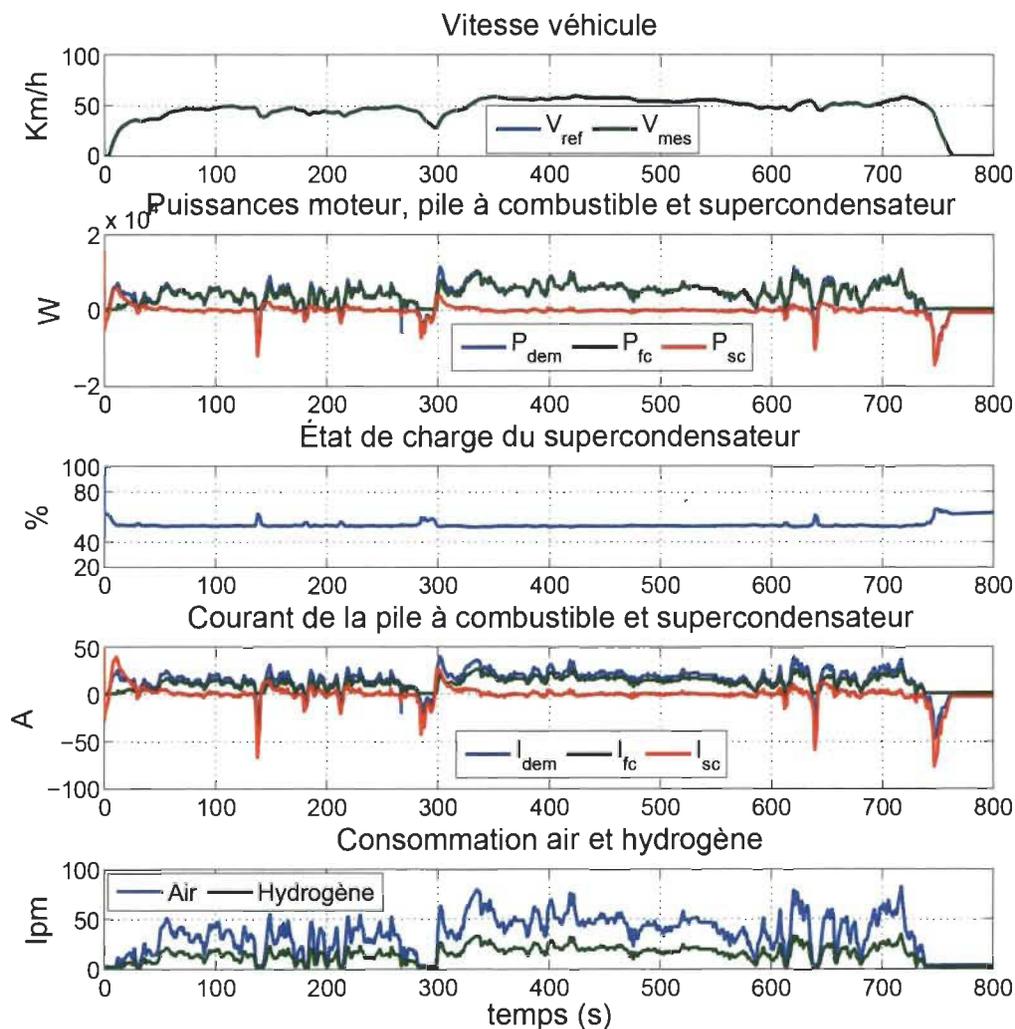


Figure 5.12 Résultat de la commande optimale pour  $m_v = 1625 \text{ Kg}$  et  $V = V_{ref}$

teur fournit la totalité de la puissance demandée lors des accélérations et au démarrage. Il fournit la puissance demandée jusqu'à  $11 \text{ kW}$  et le courant atteint  $59.5 \text{ A}$ . Lorsque l'état

de charge du supercondensateur avoisine  $SOC_{sc} = 54.5 \%$ , la pile à combustible, à son tour, fournit la puissance demandée par le moteur. L'état de charge du supercondensateur ne change pas beaucoup et reste au voisinage de  $SOC_{sc} = 51.8 \%$  durant la totalité du parcours sauf dans le cas des freinages ou des décélérations brusques du véhicule. À la fin du trajet, l'état de charge du supercondensateur revient pratiquement à sa valeur initiale  $SOC_{sc} = 63.2 \%$ . Cette figure montre également que la différence entre l'état de charge initial et l'état de charge final est d'environ  $+5.3 \%$ .

La figure 5.13 représente les résultats de simulation du parcours routier  $V = 2 \times V_{HWFET}$  et une masse du véhicule  $m_v = 1625kg$ . Les observations demeurent sensiblement les mêmes que celles de la figure précédente. Au démarrage, le supercondensateur fournit la puissance demandée jusqu'à  $9 kW$  et le courant atteint  $59.8 A$ . Il fournit la puissance demandée au démarrage jusqu'à atteindre  $SOC_{sc} = 50.6 \%$ . À son tour, la pile à combustible fournit la puissance demandée par le motopropulseur. Dans ce parcours, on a doublé le profil de la vitesse rapport à la figure précédente, l'état de charge du supercondensateur a atteint  $SOC_{sc} = 44.1 \%$  et il réagit dans le cas des freinages ou décélérations brusques du véhicule. À la fin du trajet, l'état de charge du supercondensateur revient pratiquement à sa valeur initiale, soit  $SOC_{sc} = 73.5 \%$ . À la différence de la figure précédente, le supercondensateur réagit plus rapidement dans ce cas. Cette figure montre que la différence entre l'état de charge initial et l'état de charge final est de  $+22.6 \%$ .

### 5.5.3 Analyse des résultats obtenus

Le figure 5.14 représente un agrandissement des résultats de simulation sur le partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère et freine entre l'instant  $t = 160 s$  et  $t = 340 s$ . Dans les deux cas de cette figure, le supercondensateur fournit la puissance demandée. On observe dans la figure 5.14.(a) que l'état de charge du supercondensateur atteint  $53 \%$  à l'instant  $t = 170 s$  et dans la figure

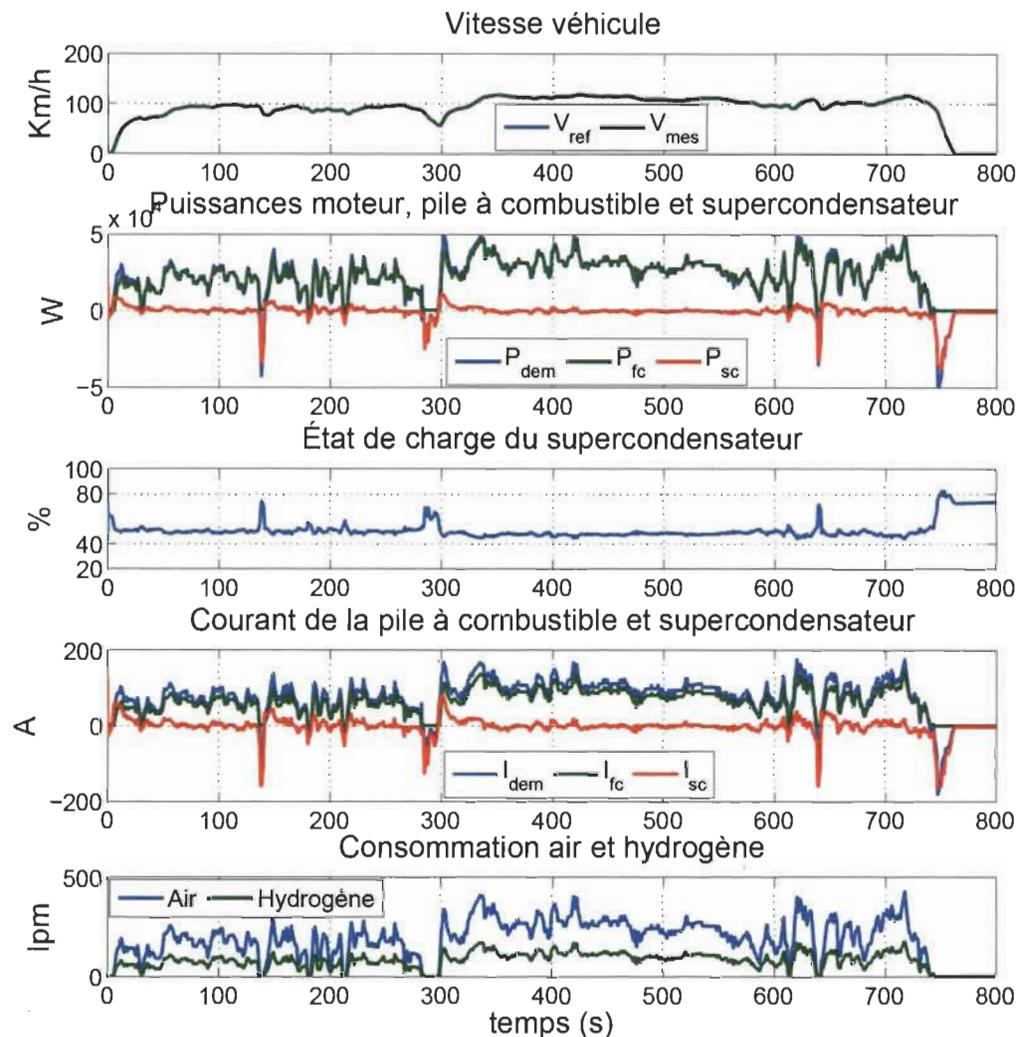
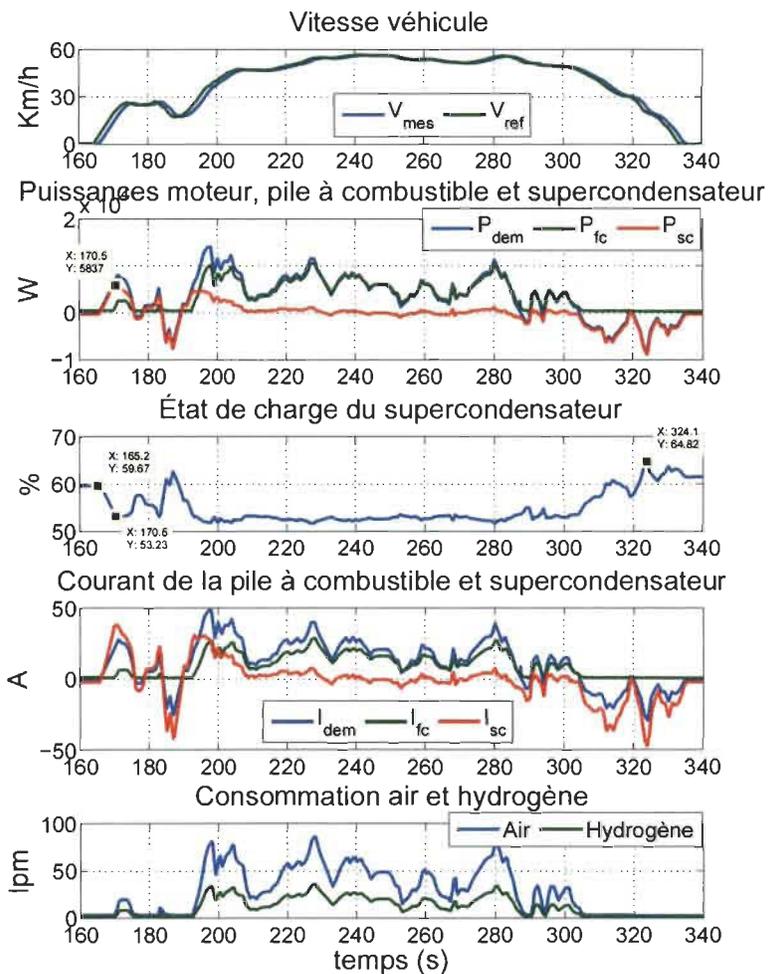
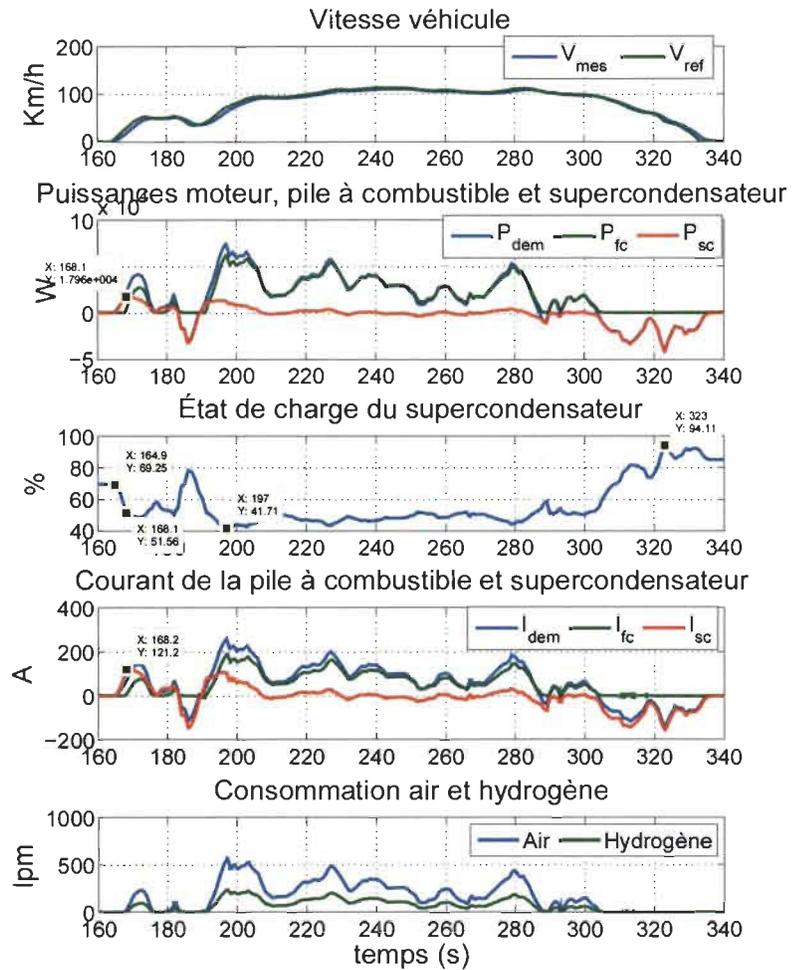


Figure 5.13 Résultat de la commande optimale pour  $m_v = 1625kg$  et  $V = 2 \times V_{ref}$

5.14.(b), il atteint un état de charge de 51 % à l'instant  $t = 168 s$ . À partir cet instant, la pile à combustible est donc activée pour répondre à cette demande de puissance. On constate aussi que dans les deux cas où la puissance demandée est faible ou importante, l'état de charge du supercondensateur reste proche de 50 % et 40 % respectivement, la pile à combustible assure de fournir la demande de puissance entre les instants  $t = 190 s$  et  $t = 305 s$ , quant au supercondensateur l'épaule pendant les brusques demande de puissance. À partir de l'instant  $t = 300 s$ , le supercondensateur est chargé par le retour d'énergie issu tu freinage. Son état de charge atteint 64 % et 94 % à l'instant  $t = 323$



(a)



(b)

Figure 5.14 Agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère et freine (a)  $m_v = 1625 \text{ kg}$ ,  $V = V_{ref}$  et (b)  $m_v = 2500 \text{ kg}$ ,  $V = 2 \times V_{ref}$

$s$  respectivement. Les courants mesurés de ces sources ainsi que la consommation en hydrogène et en air de la pile à combustible sont représentés dans cette figure.

Les figures 5.15 et 5.16 représentent un agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère pour un parcours urbain de vitesse  $V = V_{ref}$  et  $V = 2 \times V_{ref}$  respectivement. Cet agrandissement est pris entre les instants  $t = 560 s$  et  $t = 590 s$ .

Dans la figure 5.15, la pile à combustible fournit une puissance minimale. Pendant cette accélération, le supercondensateur fournit la totalité de la puissance demandée ; dans la figure 5.15.(a), le supercondensateur se décharge et son état de charge atteint 54 % et il atteint 53 % dans la figure 5.15.(b). Lorsque le véhicule commence à réduire sa vitesse, le supercondensateur stocke l'énergie issus de ce changement de vitesse.

Dans le cas de la figure 5.16. (a), le supercondensateur fournit la puissance demandée jusqu'à ce que son état de charge atteint 52 % à l'instant  $t = 571 s$ . La pile à combustible quant à elle commence à régir à partir de cet instant. Les mêmes remarques sont observées dans la figure 5.16. (b).

D'après les résultats obtenus, on peut dire que la puissance demandée est répartie entre la pile à combustible et le supercondensateur. Le contrôleur à base de la commande optimale calcule la puissance optimale que la pile à combustible doit fournir. L'état de charge du supercondensateur est régulé et maintenu borné.

Les résultats présentés montrent également que l'état de charge du supercondensateur dépend de l'intensité de la puissance demandée. Son état de charge minimum durant un parcours routier et son état de charge final dépendent des conditions de roulage tels que la masse du véhicule, la vitesse et le parcours routier.

Pour le parcours urbain **UDDS** et quelque soit la masse du véhicule ( 1625 et 2500  $kg$ ),

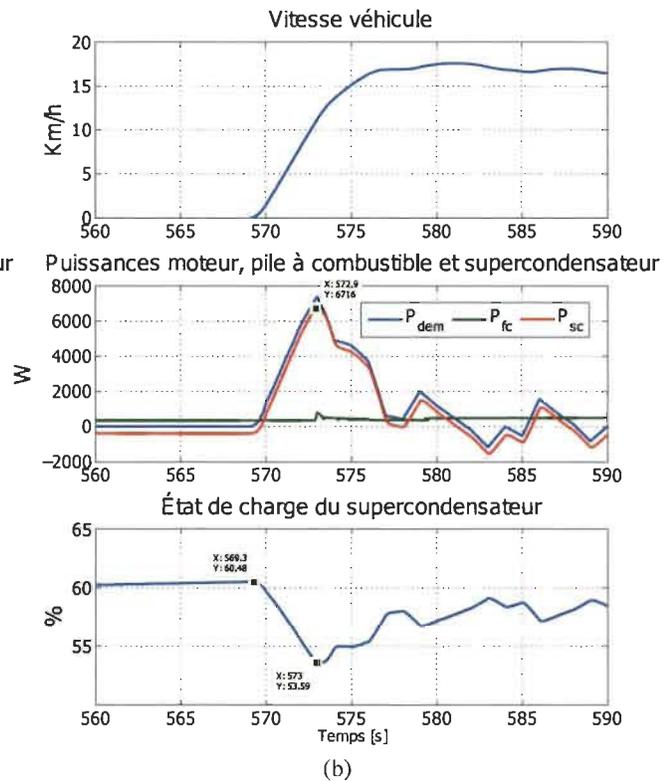
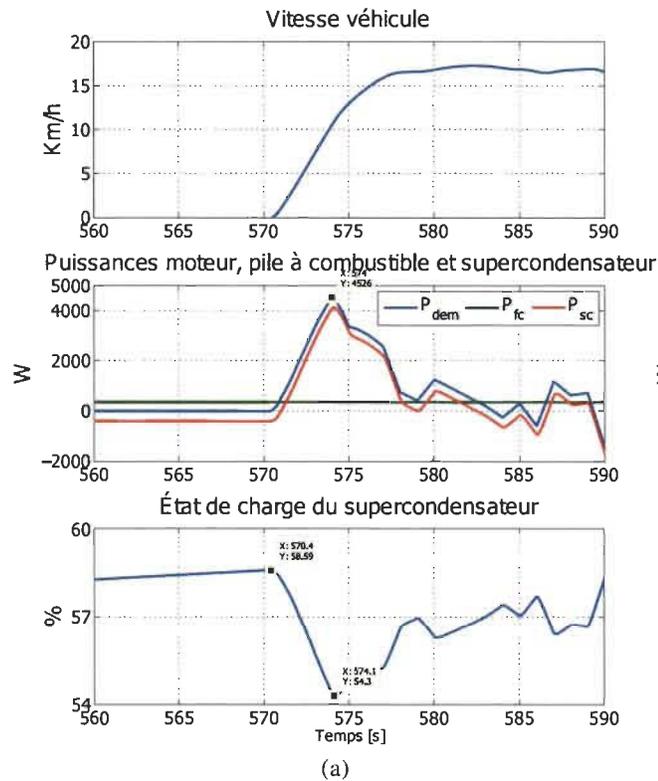


Figure 5.15 Agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère pour un parcours urbain de vitesse  $V = V_{ref}$  et une masse de (a)  $m_v = 1625 \text{ kg}$  et (b)  $m_v = 2500 \text{ kg}$

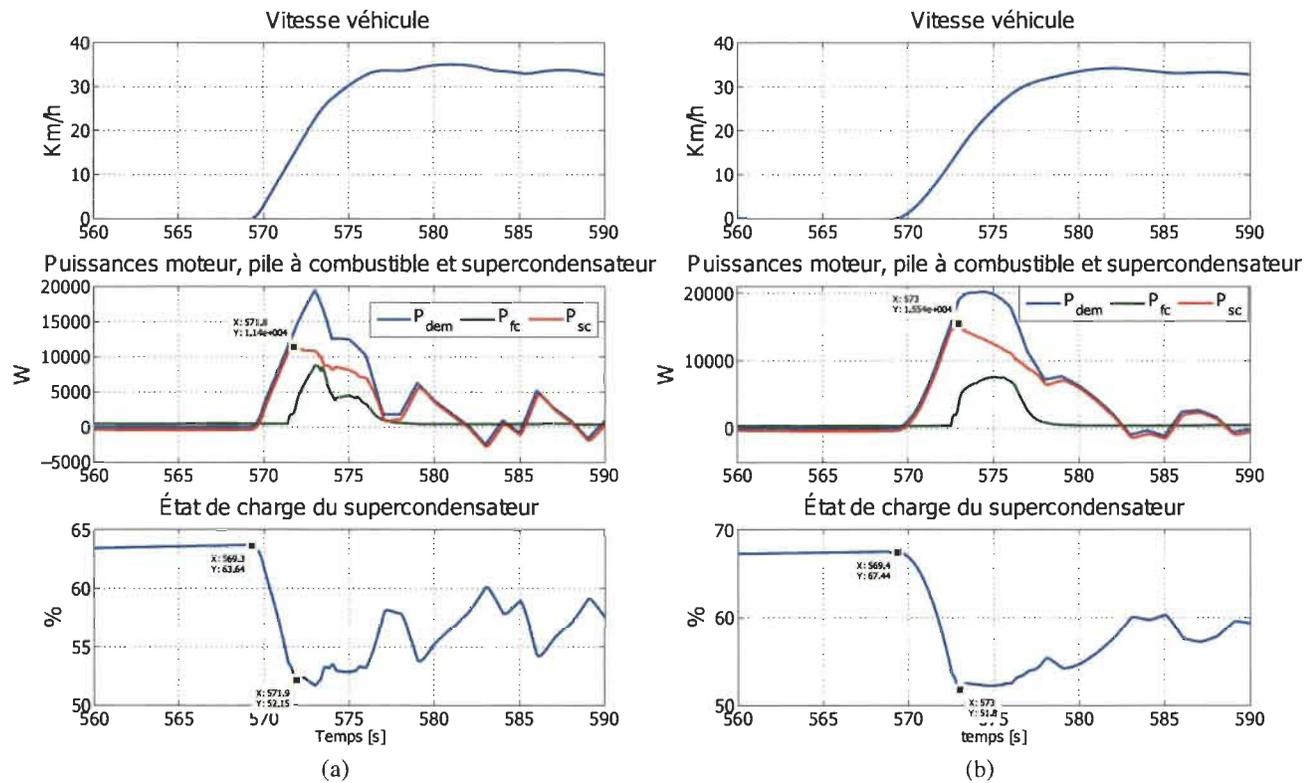


Figure 5.16 Agrandissement des résultats de simulation du partage de la puissance demandée entre les sources (PAC et SC) lorsque le véhicule accélère pour un parcours urbain de vitesse  $V = 2 \times V_{ref}$  et une masse de (a)  $m_v = 1625 \text{ kg}$  et (b)  $m_v = 2500 \text{ kg}$

la puissance de la pile à combustible calculée avec le contrôleur à base de la commande optimale est optimale. L'état de charge final, qui correspond au variable d'état du fin du parcours, est égal à l'état initial et vérifie la condition donnée dans l'équation (5.25).

Quand la vitesse est doublée ( dans notre cas, on a multiplié le parcours urbain **UDDS** par deux), l'état de charge à la fin du parcours ne correspond pas à l'état de charge initial. Cette différence se situe entre +13 % et +7 % et donc la solution est sous optimale.

Pour le parcours urbain **UDDS**, la différence observée entre l'état de charge initial et final du supercondensateur varie entre +5 % et +22.6 %. On peut dire que la solution obtenue est aussi sous optimale.

Il faut noter que les tests ont été effectués sans connaître à l'avance le parcours et les conditions de roulage et le temps de fin du parcours, ce que représente en soit un grand avantage.

## 5.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a exposé une stratégie de gestion basée sur la commande optimale en utilisant l'approche principe du minimum de Pontryagin pour un véhicule électrique à pile à combustible et supercondensateur. Cette approche est facile à mettre en œuvre en temps réel car elle est basée sur la minimisation instantanée du Hamiltonien. Les conditions futures du cycle de conduite ne sont pas connues, le temps final  $t_f$ , est aussi inconnu. En plus, la variable d'état adjoint est calculée en temps réel en utilisant l'équation (5.30) et il n'est pas constante.

Les résultats de simulation montrent que les puissances pour des parcours routiers inconnus sont partagées adéquatement entre les sources et la charge. De plus, les résultats indiquent que la consommation d'hydrogène est plus faible lors d'un parcours routier, et

l'état de charge du supercondensateur reste toujours borné. Pour terminer, cette approche n'a pas besoin d'une expertise ou des connaissances du système comparé aux autres stratégies ( la stratégie de la logique floue par exemple).

Toutefois, cette approche est sous optimale pour les raisons mentionnées précédemment. En ajoutant un algorithme qui prédit les conditions de roulage futures, cette approche peut mener à une solution optimale.

## CHAPITRE 6

### OPTIMISATION ÉNERGÉTIQUE BASÉE SUR LA CHAÎNE DE MARKOV ET LA COMMANDE OPTIMALE

#### Sommaire

6.1 Introduction . . . . .	153
6.2 État de l'art . . . . .	154
6.3 Modèle de la chaîne de Markov . . . . .	156
6.4 Résultats de simulation et discussion . . . . .	160
6.5 Conclusion . . . . .	165

#### 6.1 Introduction

Dans ce chapitre, on va proposer une nouvelle approche d'optimisation énergétique en temps réel pour un véhicule hybride avec deux sources d'alimentation : une pile à combustible agissent comme source de puissance primaire et un supercondensateur jouant le rôle d'une source secondaire. Cette approche combine une stratégie d'optimisation à base de la commande optimale qui est résolue par le principe minimum de Pontryagin, et la chaîne de Markov pour prédire les conditions futures de roulage (*CMCO*). En utilisant la commande optimale seule en temps réel, certains problèmes sont observés lorsque le véhicule atteint un seuil de puissance demandée. Dans ce cas, le supercondensateur doit intervenir pour épauler la pile à combustible, même si son état de charge est sous le seuil autorisé. Ce comportement est causé par la pile à combustible dont sa dynamique (sa réponse) est plus lente que celle du supercondensateur. Pour résoudre ce problème, un modèle de la chaîne de Markov est inséré dans l'algorithme pour prédire la demande

future en puissance pendant un parcours routier inconnu.

En temps réel, et à puissance demandée élevée et à grande vitesse, deux phénomènes ont été observés. Le premier apparaît à puissance demandée élevée, et le second survient à une variation brusque du courant tiré par la machine électrique. Pour éviter ces deux situations, un modèle basé sur la chaîne de Markov est insérée pour prédire la demande future en puissance pendant un parcours routier.

Le problème de la commande optimale est formulé comme un problème de minimisation de la consommation équivalente ECMS, et qui doit être résolu en s'appuyant sur le principe du minimum de Pontryagin. Un modèle de chaîne de Markov est ajouté sous forme d'un bloc séparé pour prédire la puissance demandée par le groupe motopropulseur.

Cette approche est validée en utilisant l'environnement MATLAB / Simulink. Les éléments électriques et mécaniques du véhicule hybride sont également modélisés en utilisant les boîtes à outils disponible. Dans ce chapitre, deux modèles sont comparés. Le premier modèle possède une chaîne de Markov, et le second ne l'est pas. Les résultats obtenus démontrent l'importance de l'ajout de la chaîne de Markov.

Ce chapitre est structuré en quatre sections. La section 6.2 présente l'état de l'art sur les méthodes de prédiction. La section 6.3 décrit le modèle de chaîne de Markov. La section 6.4 expose résultats de simulation et la dernière section concerne la conclusion du chapitre.

## **6.2 État de l'art**

Dans la littérature scientifiques, plusieurs stratégies de gestion de l'énergie ont été suggérées pour réduire la consommation d'hydrogène et contrôler le partage de puissance entre les sources d'énergie et la charge pour des parcours a priori connus. Or, en réalité, les

conditions de roulage et le parcours routier ne sont pas connus. La puissance demandée et les conditions d'utilisation des sources d'énergie sont donc inconnues.

Certaines stratégies nécessitent la connaissance :

- des conditions de circulation futures
- le parcours routier pour calculer la consommation optimale du carburant
- la puissance optimale de la pile à combustible calculée en temps différé

Ces stratégies sont généralement basées sur la programmation dynamique (DP) [49], ou sur la formulation de la commande optimale résolue par la programmation dynamique [60]. On trouve aussi la stratégie de gestion optimale de l'énergie en temps réel reposant sur la programmation dynamique déterministes (DDP) [67]. La programmation dynamique multi-dimension a été proposée pour trouver la solution optimale du problème de la gestion d'énergie, mais la connaissance du cycle de conduite doit être a priori connue [68]. La commande optimale basée sur le principe du minimum de Pontryagin peut être utilisée en temps réel, mais la connaissance de certaines conditions futures est nécessaire [58], [69]. Ces conditions peuvent être le temps de croisière et l'énergie négative disponibles lors d'un freinage comme exposé par la référence [61]. Un contrôleur PI basé sur le principe du minimum de Pontryagin avec trois paramètres et un contrôleur basé sur la logique floue avec dix paramètres ont été testés sur un véhicule à pile combustible et batterie [70]. L'algorithme génétique et la programmation quadratique ont été combinés pour améliorer la consommation d'un véhicule hybride, cependant des informations précises sur le parcours ont été requises [2].

D'autres stratégies d'optimisation basées sur la prédiction ont été proposées dans la littérature. Par exemple, un contrôleur basé sur la programmation dynamique stochastique (SDP) avec une chaîne de Markov construites à l'aide d'une base de données de conduite réel [71]. La programmation dynamique stochastique gère et optimise la puissance, quant à la variable de mémoire de Markov<sup>1</sup> a été utilisée pour représenter la distribution sto-

---

1. Markov memory variable

chastique de la demande de puissance par le conducteur [72]. Dans la référence [73], la stratégie de gestion d'énergie self-optimization basée sur l'influence stochastique pour un véhicule électrique a été proposée. Aussi, l'optimum de Pareto a été proposé pour un véhicule électrique dans la référence [74]. Cette méthode consiste à trouver la vitesse optimale qui maximise le rendement du moteur et minimise la consommation du véhicule grâce à l'optimisation multiobjectif.

La commande prédictive a aussi été proposée pour prédire les conditions de conduite futures [75]. Dans la référence [28], la stratégie de gestion à base de règles a été choisie pour tester l'impact de chaque composant du véhicule et la commande prédictive a été proposée pour une meilleur gestion de puissance. La gestion d'énergie basée sur l'optimisation d'itinéraire pour un véhicule hybride a été proposée par la référence [76]. La commande optimale basée sur la programmation dynamique et la ECMS<sup>2</sup> avec la prévisualisation du parcours à long horizon pour un véhicule électrique a été proposée par la référence [77].

### 6.3 Modèle de la chaîne de Markov

Le modèle de la chaîne de Markov donnant la relation entre l'état actuel et l'état futur du système est présentée par l'équation (6.1). La figure 6.1 illustre le processus général de Markov et l'interaction entre les états [78].

$$P(X(k+1) = j | X(k) = i) = p_{ij} \quad (6.1)$$

---

2. Equivalent Consumption Minimization Strategy

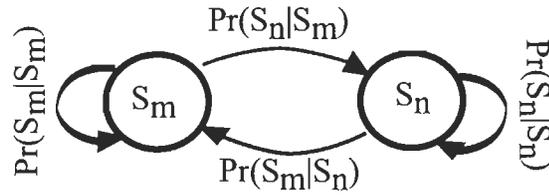


Figure 6.1 Processus de Markov et l'interaction entre les états

Dans ce chapitre, l'état dans le modèle de Markov est choisi comme un vecteur composé de la vitesse du véhicule ( $V_v$ ) et la puissance du motopropulseur ( $P_{dem}$ ). La probabilité de transition donnant des informations sur l'étape suivante ou future est présentée par l'équation (6.2a). L'équation (6.2b) exprime la probabilité lors de la prochaine étape de temps  $n$ . Ce calcul de probabilité est déterminé par la combinaison de ces paramètres ( $V_v$ ) et ( $P_{dem}$ ) [14], [79].

$$P(P_{dem}(k+1) | P_{dem}(k), V_v(k)) = p_{k,k+1} \quad (6.2a)$$

$$P(P_{dem}(k+n) | P_{dem}(k), V_v(k)) = p_{k,k+1}^n \quad (6.2b)$$

La vitesse du véhicule et les données de puissance demandée sont recueillies en temps réel pour un parcours routier **UDDS**. Ces données sont ensuite analysées pour avoir une distribution. Cette analyse des résultats conduit à diviser un parcours routier en séquences (tableau 6.1), qui en résulte en une matrice de probabilité de transition [80]. Cette matrice a pour rôle d'estimer la demande future d'énergie. Pour chaque séquence de vitesse du véhicule, les probabilités de transition sont calculées en comptant le nombre d'occurrences pour chaque transition.

Le tableau 6.2 indique le nombre d'occurrences de chaque calcul de séquence  $S$ , et l'équation (6.3) représente la matrice de calcul de ces occurrences. L'équation (6.4) reprend cette méthode de calcul, avec  $m_{(S_i, S_j)}$  est le nombre d'occurrences de transition de

$P_{dem}(k)$  à  $P_{dem}(k + 1)$  à  $V_v(k)$ , et  $m_{S_i}$  est le nombre total de transition de  $P_{dem}(k)$  [80], [81], défini dans l'équation (6.5). L'équation (6.6) donne une matrice de transition.

Tableau 6.1 Séquences d'un parcours routier

$V_v$ vs $P_{dem}$	$[P_{dem1}P_{dem2}]$	$[P_{dem2}P_{dem3}]$	$[P_{dem3}P_{dem4}]$
$[V_{v1}V_{v2}]$	$S_1$	$S_2$	$S_4$
$[V_{v2}V_{v3}]$	$S_1$	$S_3$	$S_4$

Tableau 6.2 Calcul du nombre d'occurrences

$(S_1, S_1)$	$m_{S_1, S_1}$
$(S_2, S_1)$	$m_{S_2, S_1}$
$(S_3, S_1)$	$m_{S_3, S_1}$
$(S_4, S_1)$	$m_{S_4, S_1}$
$(S_1, S_2)$	$m_{S_1, S_2}$
$(S_2, S_2)$	$m_{S_2, S_2}$
$(S_3, S_2)$	$m_{S_3, S_2}$
$(S_4, S_2)$	$m_{S_4, S_2}$
$(S_1, S_3)$	$m_{S_1, S_3}$
$(S_2, S_3)$	$m_{S_2, S_3}$
$(S_3, S_3)$	$m_{S_3, S_3}$
$(S_4, S_3)$	$m_{S_4, S_3}$
$(S_1, S_4)$	$m_{S_1, S_4}$
$(S_2, S_4)$	$m_{S_2, S_4}$
$(S_3, S_4)$	$m_{S_3, S_4}$
$(S_4, S_4)$	$m_{S_4, S_4}$

$$N = \begin{pmatrix} m_{S_1,S_1} & m_{S_1,S_2} & m_{S_1,S_3} & m_{S_1,S_4} \\ m_{S_2,S_1} & m_{S_2,S_2} & m_{S_2,S_3} & m_{S_2,S_4} \\ m_{S_3,S_1} & m_{S_3,S_2} & m_{S_3,S_3} & m_{S_3,S_4} \\ m_{S_4,S_1} & m_{S_4,S_2} & m_{S_4,S_3} & m_{S_4,S_4} \end{pmatrix} \quad (6.3)$$

$$p_{i,j} = p_{k,k+1} = \frac{m_{S_i,S_j}}{m_{S_i}} \quad (6.4)$$

$$m_{S_i} = \sum_{S_j=1}^n m_{S_i,S_j} \quad (6.5)$$

$$p = \begin{pmatrix} \frac{m_{S_1,S_1}}{m_{S_1,S_1} + \dots + m_{S_1,S_4}} & \dots & \dots & \frac{m_{S_1,S_4}}{m_{S_1,S_1} + \dots + m_{S_1,S_4}} \\ \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ \cdot & \dots & \dots & \cdot \\ \frac{m_{S_4,S_1}}{m_{S_4,S_1} + \dots + m_{S_4,S_4}} & \dots & \dots & \frac{m_{S_4,S_4}}{m_{S_4,S_1} + \dots + m_{S_4,S_4}} \end{pmatrix} \quad (6.6)$$

La figure 6.2 présente une chaîne de Markov à quatre états. L'interaction entre ces états est donnée par les probabilités. Par exemple, on suppose qu'à l'instant  $t = k$ , l'état  $S_2$  est observé. À l'instant  $t = k + n$ , le pas de temps suivant  $n$ , la probabilité de transition calculée donne une information sur la nature de l'état observé.

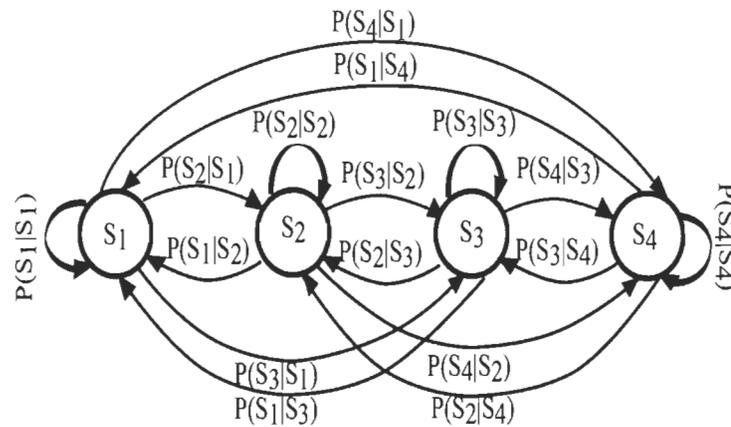


Figure 6.2 Présentation d'une chaîne de Markov à quatre états

#### 6.4 Résultats de simulation et discussion

La figure 6.3 donne la configuration d'un véhicule à pile à combustible et supercondensateur. La puissance optimale de la pile à combustible est calculée dans le bloc de la commande optimale. De plus, le bloc de la chaîne de Markov prédit la puissance demandée à l'étape suivante (future), c'est à dire, après trois étapes de temps. Dans le cas du supercondensateur, un générateur génère les signaux PWM de la tension de référence du bus CC maintenue à 288 V et celle mesurée pour contrôler le convertisseur bidirectionnel (buck/boost) via un régulateur PI. Un convertisseur de freinage est ajouté pour protéger le supercondensateur surplus d'énergie au cours d'un freinage dynamique brusque ou répétitif.

La figure 6.4 présente les deux blocs de la stratégie de gestion d'énergie en temps réel implémentée dans l'environnement Simulink. Une fonction MATLAB réalise la chaîne de Markov avec la matrice de probabilité de transition prédéfinie. Cette fonction a pour but de prédire la puissance demandée après trois étapes de temps. Le bloc de la commande optimale calcule la puissance optimale de la pile à combustible tout en maintenant l'état

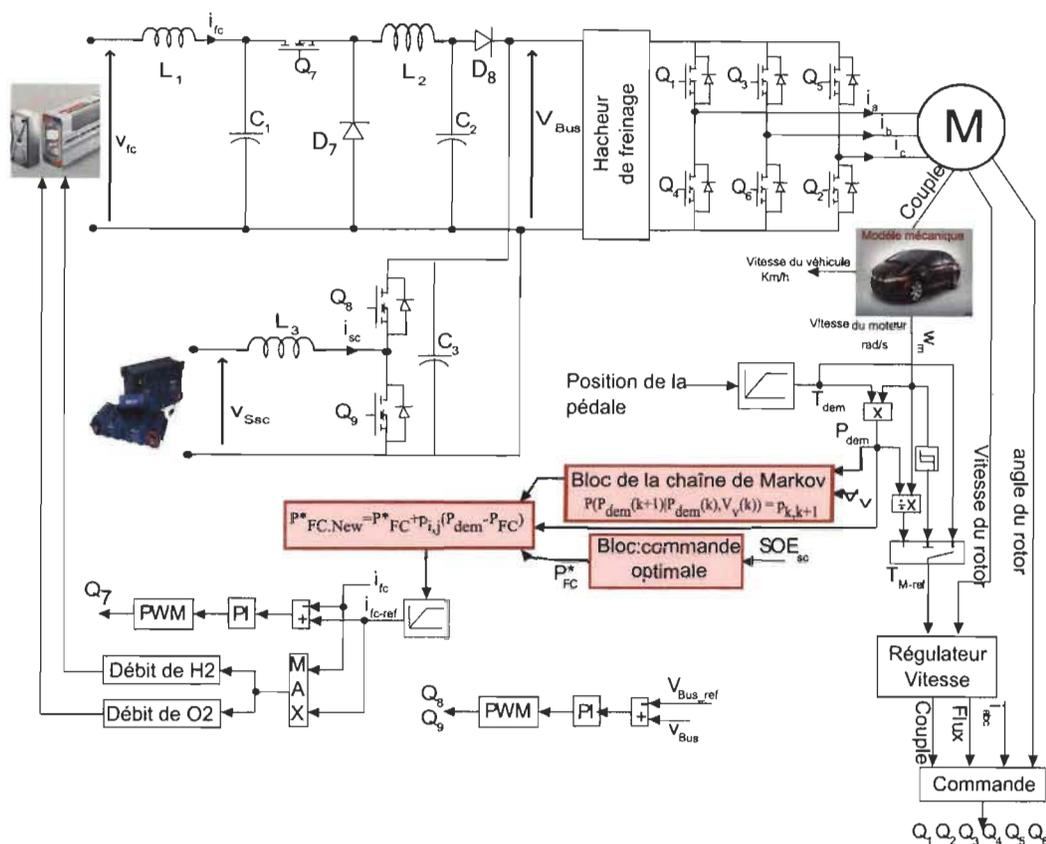


Figure 6.3 Système de gestion d'énergie à base d'une chaîne de Markov

de charge du supercondensateur borné.

La figure 6.5 montre les résultats de simulation de la stratégie proposée appliquée à un véhicule à pile à combustible et supercondensateur. On va comparer les résultats de deux modèles. Le premier modèle est sans la chaîne de Markov, et le second l'est. Dans les deux cas, on constate que la vitesse du véhicule suit la vitesse proposée. Dans cette simulation, le problème de contrôle optimal est résolu en utilisant le principe du minimum de Pontryagin pour le parcours routier **UDDS**.

Le bloc de la commande optimale calcule la puissance optimale de la pile à combustible lors du fonctionnement du véhicule (figure 6.5.(b)), et la puissance du supercondensateur (figure 6.5.(c)) est déduite par la différence entre la puissance demandée et la



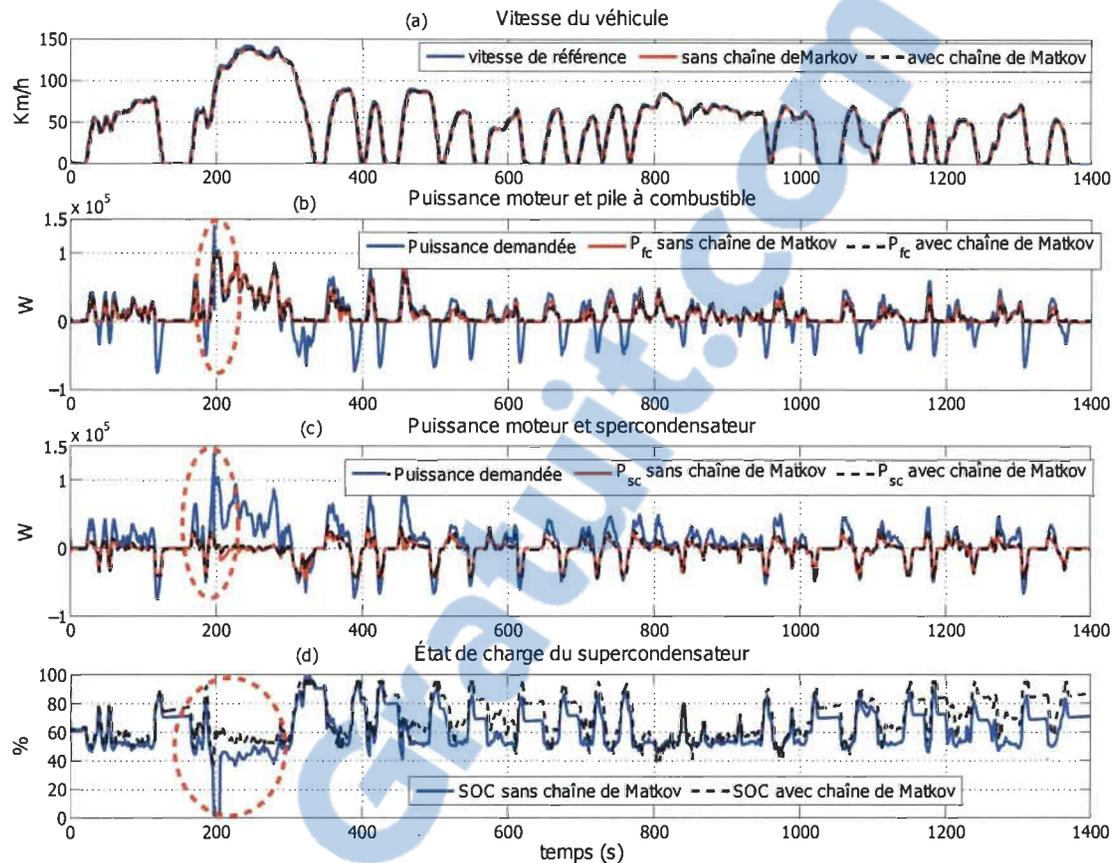


Figure 6.5 Résultats de simulation avec et sans chaîne de Markov

est complètement déchargé. Ce phénomène affecte la durée de vie du supercondensateur. Le second phénomène est à une puissance demandée élevée, la dynamique de la pile à combustible est lente contrairement à celle du supercondensateur. Dans ce cas, le supercondensateur réagit et épaula la pile à combustible jusqu'à ce que la pile à combustible soit active et répond au changement dans la puissance demandée. Ce problème peut également affecter l'état de charge de supercondensateur et par conséquent sa durée de vie. Pour éviter ce problème, une prédiction de la puissance demandée est nécessaire. Effectivement, le bloc de chaîne de Markov est ajouté pour remplir ce rôle. L'importance de ce bloc est la prédiction de la séquence, où la puissance demandée peut être élevée et susceptible de créer ces problèmes. Les résultats de simulation de la figure montrent, qu'avec l'ajout du bloc de la chaîne de Markov, les problèmes cités précédemment disparaissent

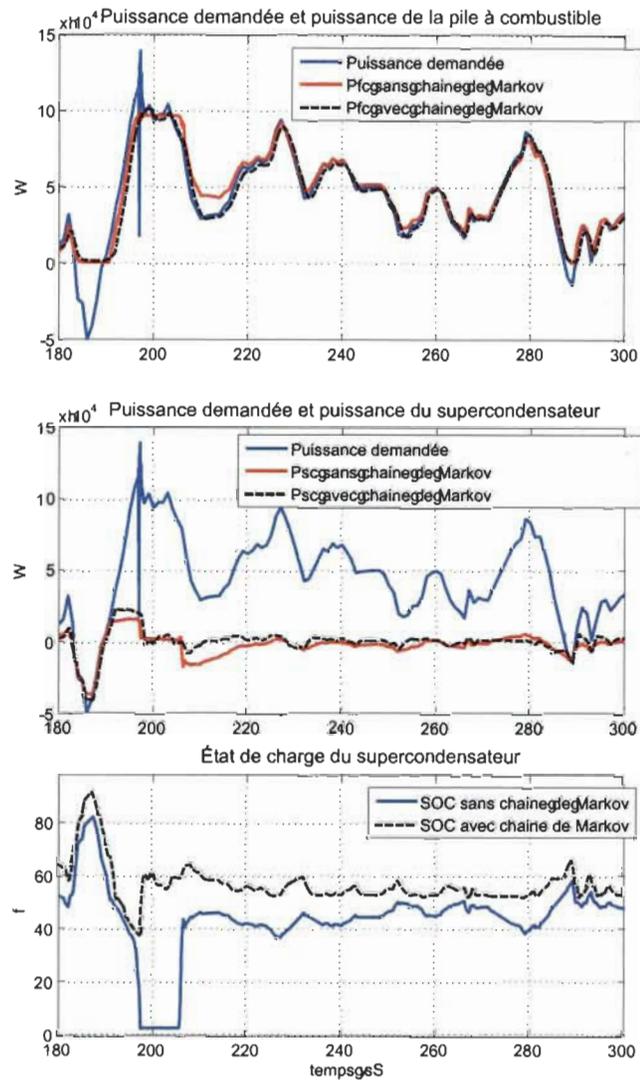


Figure 6.6 Agrandissement des résultats de simulation

complètement.

L'idée est de prédire la puissance demandée que la pile à combustible ne peut pas fournir, en multipliant la probabilité d'observer ce phénomène par la puissance de supercondensateur et l'ajouter à la puissance de la pile à combustible calculée à partir du bloc de la commande, ainsi la pile à combustible est forcée avant trois séquences de s'activer et fournir la puissance requise. L'avantage de ce bloc est qu'il peut être facilement intégré à d'autres stratégies d'optimisation. Le tableau 6.3 illustre la consommation de la pile à

combustible du véhicule. On constate que la consommation sont presque égales, mais les variations dangereuses dans l'état de charge du supercondensateur ont disparues.

Tableau 6.3 Consommation d'hydrogène

Conditions	$2.5 \times V_{UDDS}$ $m_v = 2500kg$
Distance (km)	18,2
Durée (s)	1400
Consommation sans la chaîne de Markov (l)	927,08
Consommation avec la chaîne de Markov (l)	927,23

## 6.5 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté et comparé les performances de deux stratégies de gestion d'énergie en temps réel basée sur la commande optimale et résolue par le principe de minimum de Pontryangin. L'une des stratégies contient une chaîne de Markov et l'autre non. Le bloc de la chaîne de Markov est ajouté au modèle afin de prédire la puissance demandée future et éviter certains problèmes dus aux variations brusques de la puissance demandée. Les deux modèles sont mis en œuvre dans un véhicule à pile à combustible / supercondensateur. En temps réel, les conditions de roulage et du parcours routier sont inconnus. La nature de la puissance demandée est inconnue. Les problèmes ont été étudiés à l'aide du parcours routier standard **UDDS** multiplié par deux et demi. Ce parcours a été choisi puisqu'il contient plusieurs accélérations et décélérations par rapport aux autres parcours et le véhicule hybride perd plus d'énergie et le rendement du système diminue. La multiplication de ce parcours par deux et demi force le système à fonctionner à puissance extrême et à haute vitesse ce qui permet d'étudier convenablement le comportement de la piles à combustible et le supercondensateur face à ces perturbations. Les résultats de simulation montrent que l'état de charge de supercondensateur est maintenu borné et la consommation de l'hydrogène est pratiquement équivalente au modèle sans la chaîne

de Markov. On constate que le modèle avec la chaîne de Markov est simple à mettre en œuvre, que le bloc de chaîne de Markov est séparé du bloc de la commande optimale. En plus, il peut être intégré à d'autres stratégies d'optimisation en temps réel.

## CHAPITRE 7

### ÉTUDE COMPARATIVE DES RÉSULTATS AVEC DES RÉFÉRENCES

#### Sommaire

<b>7.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>168</b>
<b>7.2</b>	<b>Définition des critères de comparaison</b>	<b>168</b>
7.2.1	Parcours et conditions de roulage	169
7.2.2	État de charge du supercondensateur	173
7.2.3	Consommation de la pile à combustible	173
7.2.4	Rendement de la pile à combustible	174
7.2.5	Étude menant à la réalisation d'une stratégie proposée	174
7.2.6	Temps de calcul	174
7.2.7	Robustesse d'une stratégie	175
<b>7.3</b>	<b>Comparaison des stratégies proposées entre elles</b>	<b>175</b>
<b>7.4</b>	<b>Synthèse de la comparaison</b>	<b>176</b>
7.4.1	Comportement du supercondensateur	176
7.4.2	Comportement de la pile à combustible	177
7.4.3	Temps de simulation	178
<b>7.5</b>	<b>Étude comparative</b>	<b>178</b>
<b>7.6</b>	<b>Limites des solutions proposées</b>	<b>181</b>
<b>7.7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>182</b>

## 7.1 Introduction

Dans ce travail de recherche, on a proposé quatre stratégies de gestion et d'optimisation énergétique d'un véhicule hybride à pile à combustible épaulée par une source auxiliaire (batteries ou supercondensateur). Par simulation numérique dans l'environnement Matlab Simulink, on a évalué les performances des quatre techniques proposées en matière de la consommation de l'hydrogène, de la répartition de la puissance de charge vis-à-vis de plusieurs profils de vitesse standards, et du maintien de l'état de charge de la source auxiliaire. Par ailleurs et tel que mentionné dans les chapitres précédents et publié dans la littérature récente, le partage de puissance optimal entre la source principale et la source auxiliaire permettant une consommation minimale en hydrogène nécessite de prendre en compte du profil de vitesse et des conditions routières. C'est dans cet objectif que les quatre stratégies de gestion ont été élaborées dans les chapitres précédents.

La première est une stratégie à base de règles. C'est une stratégie de gestion d'énergie instantanée en temps réel. Les règles sont déduites par expertise et à l'aide des connaissances acquises sur le système. La deuxième est une stratégie basée sur la logique floue. C'est aussi une méthode de gestion en temps réel. La répartition de la puissance de la charge entre les sources est assurée par un contrôleur à logique floue. Il est également conçu par expertise. La commande optimale est la troisième stratégie proposée. Elle est basée sur le principe de minimum de Pontryagin et vise à atteindre des performances supérieures aux précédentes. La quatrième méthode combine un prédicteur basé sur la chaîne de Markov et il se base sur la théorie de la commande optimale.

## 7.2 Définition des critères de comparaison

Pour évaluer les performances de chaque stratégie, plusieurs critères de comparaison ont été établis. Les premiers critères concernent la nature du parcours, le profil de vi-

tesse et les conditions routières (reflétées principalement par les variations de la masse et du profil de la vitesse du véhicule). Ces variables ont été variées et appliquées pour les quatre stratégies. Pour le supercondensateur, on a choisi, comme critères de comparaison, l'état de charge durant le parcours, l'état de charge moyen et l'état de charge à la fin du parcours. Ces trois critères (états de charge) sont importants pour vérifier le rôle et comportement du supercondensateur, et évaluer les performances des stratégies de gestion. Celles-ci visent à répartir et à partager convenablement la puissance demandée par le motopropulseur entre les deux sources et maintenir borné l'état de charge du dispositif de stockage. La comparaison porte aussi sur le comportement de la pile à combustible en vérifiant notamment sa consommation en hydrogène et son rendement. On propose aussi de préciser la nature de l'étude préalable accomplie en temps différé et menant à la réalisation de chaque stratégie. Comme derniers critères de comparaison, on a retenu le temps de calcul de chaque stratégie et sa robustesse face aux variations du profil de la vitesse et la masse du véhicule. Signalons que ces variables sont importantes et affectent directement le couple de la machine électrique et par conséquent la puissance demandée ou retournée au dispositif de stockage.

### **7.2.1 Parcours et conditions de roulage**

Dans les chapitres précédents, on a simulé et analysé les performances des stratégies proposées pour plusieurs cas et également pour des valeurs extrêmes de vitesse et la masse. Tel que précisé dans le tableau 7.1, les quatre premiers cas correspondent à un parcours urbain à basse ou à haute vitesse et avec une masse correspondant à un véhicule léger ou à un véhicule lourd. Les deux autres cas sont ceux avec un parcours d'autoroute à basse ou à haute vitesse et avec une masse du véhicule légère. Pour ces deux derniers cas, puisque la vitesse reste presque constante durant le parcours et avec un seul arrêt à la fin du parcours, une seule valeur de masse est effectuée. La vitesse quant à elle a été changée.

Tableau 7.1 – Comparaison de consommation d’hydrogène des quatre stratégies proposées dans ce travail de recherche

Stratégie	Parcours	Masse (kg)	Vitesse (km/h)	Distance (km)	SOC (%)	$\overline{SOC}^5$ (%)	SOC( $t_f$ ) (%)	Consommation		$\bar{\eta}^7$	$\eta^8$	Étude hors ligne	Temps de calcul	Robustesse
								(l)	$\bar{C}^6$ (l)					
Idéale	∇	∇	0-150	∇	40-95	≈ 60	≈ 60	min	min	max	max	Non		Oui
BR <sup>1</sup>	Urbain	1625	0-56.7	7.45	45-68	59.2	66.8	82.44	396.5	71	42.4-75.35	Expertise	2h50min	Non
		2500			40-69	57.8	64.6			95.58	70.59			
		1625	0-113.4	14.9	23.4-76.5	52.1	58	462.3		68.39	3.75-75.34			
		2500			34.89-88	55	62	517.11		68.58	2.59-75.35			
	Autoroute	1625	0-60	10.26	40-55	47.6	52	180.8		68.42	10.33-75.33			
		1625	0-120	20.51	31.4-75	42.9	65.3	1041		63.64	8.39-75.31			
LF <sup>2</sup>	Urbain	1625	0-56.7	7.45	46.7-63.9	53.6	57.7	77	391.7	72.72	23.74-74.93	Expertise	2h53min	Non
		2500			43.8-67	52.5	56	90		72.2	17.42-74.93			
		1625	0-113.4	14.9	40.6-80	53.3	59.8	450.2		68.52	7.8-74.93			
		2500			40.9-91.4	55.9	63.8	502.1		69.18	12.87-74.93			
	Autoroute	1625	0-60	10.26	43.5-63.7	47.7	58	185.3		68.26	19.12-74.92			
		1625	0-120	20.51	40.7-78.6	45.7	69.6	1046		64.5	9.2-74.93			
CO <sup>3</sup>	Urbain	1625	0-56.7	7.45	51.6-64.8	56.4	59.7	76.49	389.8	70.04	23.64-75.35	Non	2h50min	Oui
		2500			43.4-71.6	57.4	60.7	89.19		69.5	18.5-75.35			
		1625	0-113.4	14.9	43.4-83.8	58.2	64.1	446.3		68	13.41-75.34			

		2500			41.7-94.1	60.3	67.7	493.32		68.46	14.9-75.35			
	Autoroute	1625	0-60	10.26	43.4-65.9	53.8	63.2	188.5		68.6	25.69-75.32			
		1625	0-120	20.51	43.4-82.5	51.2	73.5	1045		64.54	11.08-75.34			
CO <sup>3</sup>	Urbain	2500	0-141.7	18.2	2.3-99	61.1	70.9	927.08	927.08	67.4	12.48-75.35	Non	Oui	
CMCO <sup>4</sup>	Urbain	2500	0-141.7	18.2	38-95	69.4	59.7	927.23	927.23	66.84	21.2-72.53	Statistique	3h13min	Oui

- 
1. À base de règles
  2. Logique floue
  3. Commande optimale
  4. Chaîne de Markov et Commande optimale
  5. Moyenne de l'état de charge
  6. Moyenne de la consommation de  $H_2$
  7. Rendement moyen de la pile à combustible
  8. Rendement minimal et maximal de la pile à combustible

Les deux critères d'entrée du système (vitesse et masse du véhicule) sont essentiels pour tester le comportement des stratégies ainsi déduire leur robustesse face au changement des conditions de roulage en imitant plus que possible les conditions réelles de conduite. En effet, on a choisi ce type de parcours urbain **UDDS** car il contient beaucoup d'accélération et décélération par rapport aux autres parcours ce qui affecte le rendement du véhicule à cause de la perte d'énergie. Aussi, on a changé la vitesse de ce cycle afin d'ajouter plus de contraintes lors de l'accélération et de la décélération du véhicule. Par conséquent, l'énergie cinétique du véhicule change puisqu'elle est proportionnelle au carré de la vitesse. Dans le cas réel d'utilisation, ce changement peut être causé soit par la nature de conduite de l'utilisateur, soit par la fluidité de la circulation. En plus, la masse du véhicule est aussi un critère important. En effet, le fonctionnement et la dynamique du véhicule en dépendent. L'énergie cinétique est proportionnelle à la moitié de la masse ce qui affecte le comportement du véhicule lors d'un parcours.

Lors des simulations, le parcours urbain **UDDS** dure 1400 s, de distance 7.45 km et dont sa vitesse maximale vaut 56.7 km/h. Le même parcours est multiplié par deux ( $2 \times V_{UDDS}$ ), qui dure 1400 s, de distance 14.9 km et sa vitesse maximale est 113.4 km/h. Aussi, on a considéré le parcours d'autoroute **HWFET**. Ce parcours dure 800 s, de distance 10.26 km et peut atteindre une vitesse maximale de 60 km/h. Ce même parcours est multiplié par deux ( $2 \times V_{HWFET}$ ) qui dure 800 s, de distance 20.51 km et sa vitesse maximale est de 120 km/h. Ces parcours ont été testés pour une masse du véhicule égale à 1625 kg puis 2500 kg. En plus, pour forcer le système à fonctionner à puissance extrême et atteindre une haute vitesse, le parcours **UDDS** a été multiplié par deux et demi ( $V_{ref} = 2.5 \times V_{UDDS}$ ) et la masse du véhicule est de 2500 kg. Alors, il dure 1400 s, la vitesse atteint 141.7 km/h et le véhicule parcourt une distance de 18.2 km. Ce parcours a été choisi pour analyser les performances de la stratégie de gestion d'énergie proposée.

### 7.2.2 État de charge du supercondensateur

L'état de charge du supercondensateur est un facteur important de comparaison de stratégies. Au contraire du parcours et conditions de roulage, l'état de charge du dispositif de stockage donne le comportement électrique de ce dispositif face à la variation de la charge. Rappelant que, ce dispositif, comme défini dans les chapitres précédents, épaula la pile à combustible lors des accélérations et récupère l'énergie du freinage ou des décélérations. Il est en fonction de la tension aux bornes du supercondensateur comme montrer dans le chapitre 2. Par conséquent, le maintenir borné est obligatoire car il peut assurer une amélioration de la durée de vie, le protéger de la surchauffe et aussi le protéger de la surcharge (Annexe A).

En effet, la stratégie de gestion d'énergie ou stratégie d'optimisation doit prendre en compte ce critère comme un objectif à atteindre quel que soit le parcours ou les conditions de roulage. En ajoutant aussi que, pour dire qu'une stratégie est optimale, l'état de charge du supercondensateur à la fin du parcours doit être égale ou proche de celui d'au début. Ces deux critères de comparaison sont aussi essentiels pour déduire la robustesse de ces stratégies face aux changements de la puissance demandée qui affectent le comportement électrique du dispositif de stockage. Aussi, la moyenne de l'état de charge durant un parcours montre le comportement du supercondensateur lors de sa charge et décharge.

### 7.2.3 Consommation de la pile à combustible

La consommation totale en hydrogène de la pile à combustible est calculée pour chaque test. Rappelant que l'objectif principal pour chaque stratégie de gestion ou d'optimisation est de minimiser tant que possible la consommation en hydrogène pour un parcours et conditions de roulage inconnus. Par conséquent, la consommation en hydrogène est importante pour déduire la stratégie la mieux adaptée face aux changements de

parcours et conditions de roulage.

#### **7.2.4 Rendement de la pile à combustible**

Le rendement d'un dispositif de conversion d'énergie est la relation entre l'énergie utile en sortie et l'énergie fournie en entrée par le système. Dans le cas de la pile à combustible, l'énergie utile en sortie est l'énergie électrique générée, quant à l'énergie fournie en entrée est l'énergie contenue dans une masse d'hydrogène qu'on appelle pouvoir calorifique inférieur LHV<sup>1</sup> [82]. Le rendement de la pile à combustible durant un parcours routier est calculé. On présente la moyenne du rendement ainsi que sa valeur minimale et maximale pour pouvoir comparer les stratégies de gestion proposées entre elles.

#### **7.2.5 Étude menant à la réalisation d'une stratégie proposée**

On a fixé, dans ce travail de recherche, de se contenter sur des stratégies de gestion ou d'optimisation applicables et utilisables en temps réel. Il arrive que certaines stratégies nécessitent une connaissance approfondie du système (expertise) qui mène à leurs réalisations. Dans le tableau 7.1, on a précisé la nature de l'étude menant à la réalisation de chaque stratégie. Cette exigence est essentielle pour respecter le cahier des charges qui impose qu'aucune étude hors ligne n'est autorisée dans la technique retenue.

#### **7.2.6 Temps de calcul**

Le temps de calcul ou de simulation est obtenu pour chaque stratégie proposée dans le tableau. Les informations à propos du matériel utilisé sont présentées dans l'annexe H.

---

1. LHV Lower heating value

### 7.2.7 Robustesse d'une stratégie

La robustesse de la stratégie face aux changements des conditions de conduite ainsi que les changements des conditions de roulage est importante. Cette robustesse montre le comportement des sources d'énergie (la pile à combustible et le supercondensateur) du véhicule durant son fonctionnement.

### 7.3 Comparaison des stratégies proposées entre elles

Une fois que les critères de comparaisons sont définis, on va procéder en premier lieu à comparer les performances de l'une par rapport aux autres. Le tableau 7.1 résume les résultats et les critères de comparaison des quatre stratégies proposées dans ce travail de recherche.

Pour effectuer la comparaison de ces stratégies, on a considéré, comme point de référence, une stratégie idéale. Les caractéristiques de cette dernière sont désignées dans la ligne 1 du tableau 7.1. On suppose qu'une stratégie est idéale lorsqu'elle répond le plus possible aux objectifs visés. C'est-à-dire, quel que soit le parcours routier poursuivi, la masse du véhicule, la distance parcourue, le profil de vitesse (variant de  $0\text{km/h}$  à  $150\text{km/h}$ ), l'état de charge du supercondensateur, durant tout le parcours et avec des conditions de roulage inconnues, doit être maintenu borné entre 40 et 95 %, l'état de charge à la fin du parcours doit être sensiblement égal à l'état de charge initial ( $SOC(t_f) = SOC(t_0)$ ), la consommation en hydrogène doit être le minimum possible. En plus, on ne doit pas avoir recours à une étude hors ligne (cette étude est à éviter étant donné les inconvénients cités dans les chapitres précédents), et le temps de calcul doit être le plus simple et plus court possible.

## 7.4 Synthèse de la comparaison

Tel précisé précédemment, pour effectuer la comparaison des quatre stratégies entre elles, on a considéré une stratégie idéale comme base de comparaison. On aurait pu également utiliser une autre stratégie éprouvée par des tests patraques. Toutefois, il semble que cette stratégie n'est pas encore disponible.

### 7.4.1 Comportement du supercondensateur

Il faut rappeler que la stratégie à base de règles proposée comporte une anomalie observée lors des simulations. En effet, pendant une demande brusque de puissance, le supercondensateur va fournir cette puissance malgré son faible état de charge. L'état de charge atteint la valeur catastrophique de 23.4 % dans le cas de la stratégie à base de règles. Ce phénomène a été expliqué par la réaction rapide du supercondensateur et la lenteur de la pile à combustible à fournir la puissance demandée. Pour la stratégie à base de la logique floue, elle atteint une valeur de 40.6 %, quant à la stratégie à base de la commande optimale atteint une valeur de 41.7 %. Ces valeurs sont inquiétantes.

En temps réel, à haute puissance demandée et à grande vitesse, deux phénomènes ont été observés. Le premier se manifeste à haute puissance demandée, et le second se manifeste à une demande de courant brusque.

Pour forcer le système à fonctionner à puissance extrême et atteindre une haute vitesse, le parcours **UDDS** est multiplié par deux et demi  $V_{ref} = 2.5 \times V_{UDDS}$ . Comme le système ne réagit pas assez rapidement pour stabiliser le pic de la demande de puissance, la pile à combustible ne peut pas fournir plus que sa puissance maximale, et le supercondensateur épaulé la pile à combustible pour compenser cet écart de puissance en dépit de son état de charge. Le problème est que le supercondensateur continue à épauler la pile à combustible, bien que son état de charge est faible  $SOC_{min} = 40\%$ .

Les résultats ont montré que l'état de charge de supercondensateur est maintenu borné et la consommation de l'hydrogène est restée pratiquement équivalente au modèle sans la chaîne de Markov. Le modèle est simple à mettre en œuvre, la partie de la chaîne de Markov est séparée de la partie de la commande optimale. En plus, il peut être adapté à d'autres stratégies d'optimisation en temps réel.

#### 7.4.2 Comportement de la pile à combustible

Le tableau 7.1 montre également que, pour le parcours urbain **UDDS**, la stratégie à base de théorie de la commande optimale est celle qui engendre la consommation d'hydrogène la plus faible. Cette constatation reste valable même si le parcours **UDDS** est doublé et pour les différentes masses de véhicule. La consommation dans le cas de la stratégie à base de la logique floue est très proche de celle de la commande optimale. Pour le parcours **HWFET**, c'est la stratégie à base de règles qui réalise la plus faible consommation en hydrogène par rapport aux autres stratégies et la commande optimale a engendré une consommation la plus élevée. Le tableau 7.1 montre aussi que les deux stratégies avec et sans chaîne de Markov débauchent sensiblement sur la même quantité d'hydrogène consommée.

Pour les quatre stratégies proposées, les rendements moyens de la pile à combustible sont assez proches pour tous les parcours routiers. Pour le rendement instantané, les valeurs les plus faibles ont été observées dans le cas de la stratégie à base de règles. En effet, il atteint 3.75 % et 2.59 % dans le cas à haute vitesse et pour les deux masses du véhicule. Dans le cas de la stratégie à base de la commande optimale, le rendement minimal est plus élevé que celui des deux autres stratégies. Quant aux rendements maximaux, on constate, qu'ils sont proches pour toutes les stratégies proposées.

### 7.4.3 Temps de simulation

D'après le tableau 7.1, on constate que le temps de calcul de la stratégie à base de règles et celui de la commande optimale sont égaux. Par contre, le temps de calcul de la stratégie à base de la commande optimale dépasse de trois minutes (*3 min*) celui de la stratégie à base de la logique floue. On constate aussi que le temps de calcul pour la stratégie qui combine la chaîne de Markov et la commande optimale est de trois heures quinze minutes (*3h15min*), soit 23 minutes (*23 min*) supérieur à celui de la commande optimale.

## 7.5 Étude comparative

Pour valider les performances des méthodes proposées, on a aussi comparé les résultats obtenus dans ce travail avec les résultats publiés dans les cinq références sélectionnées dans la littérature. Ces dernières ont été sélectionnées en tenant aussi bien de leur qualité que de leur proximité du notre sujet de recherche. L'annexe G résume ces références et décrit sommairement les résultats obtenus. Les références sélectionnées présentent des stratégies hors ligne et celles en temps réel. On y trouve la programmation dynamique, l'optimisation convexe, le principe du minimum de Pontryagin, la logique floue, la stratégie à base de règles, la commande prédictive et la stratégie utilisant un contrôleur PI. Ces stratégies d'optimisation globales sont réalisées en mode hors ligne et elles ont été validées exclusivement en simulation. Mentionnant aussi que le cycle de roulage, les paramètres liés au parcours routier, le temps du trajet dans la plupart des stratégies proposées sont connus.

Le tableau 7.2 résume cette étude en comparant les conditions et le cycle de roulage prises dans les méthodes proposées dans ce travail de recherche avec ceux des références sélectionnées. Les quatre stratégies proposées dans ce rapport sont notées par les symboles

S1 à S4 et elles sont comparées avec les cinq références représentées par les symboles R1 à R5. Dans ces études, deux masses du véhicule ont été considérées, et elles sont symbolisées dans le tableau par  $M_1$  et  $M_2$ . On ne spécifie pas les valeurs de ces deux masses car les autres références n'ont pas les mêmes valeurs.

Les résultats obtenus sont optimaux, mais leur utilisation en temps réel nécessite une réadaptation. Par contre, les stratégies locales sont applicables en temps réel, mais dans certaines stratégies proposées dans la littérature, quelques paramètres supplémentaires sont nécessaires pour obtenir des résultats optimaux.

En effet, dans la référence R1, une stratégie de gestion à base de la commande prédictive est proposée et comparée avec la programmation dynamique et la stratégie à base de règles. Les résultats publiés montrent que l'état de charge du supercondensateur reste borné durant le parcours et, comparée aux deux autres méthodes, la consommation de carburant est plus faible. De plus cette méthode est instantanée et nécessite la connaissance de la constante de pénalité. Cette dernière doit être déduite à l'aide de nombreuses simulations pour trouver la meilleure valeur qui donnerait un résultat optimal [28].

Tableau 7.2 Étude comparative

Conditions			Stratégies sélectionnées					Stratégies proposées				
Parcours	Vitesse	Masse	R1	R2	R3	R4	R5	S1	S2	S3	S4	
Urbain	Basse	$M_1$	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Non	
		$M_2$	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Non	
	Haute	$M_1$	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
		$M_2$	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
	Très haute	$M_1$	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Non	Oui
	Autoroute	Basse	$M_1$	Non	Non	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Non
Haute		$M_1$	Non	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	

Dans la référence R2, le cycle urbain est testé pour trois stratégies (l'optimisation instantanée, la logique floue et le contrôleur PI) [29]. Ces méthodes ont été implémentées en

temps réel sans la connaissance du parcours routier. La stratégie proposée dans la référence R3 combine les réseaux neurones et la transformation en ondelettes [30]. Par contre, la méthode de la référence R4 compare les performances d'une stratégie se basant sur le principe du minimum de Pontryagin avec celles obtenus dans le cadre d'une stratégie qui se fonde sur la programmation dynamique pour trois cycles de roulage (le cycle urbain, le cycle NEDC 2000 et le cycle Japon 1015). Il a été confirmé, dans cette référence, que le principe du minimum de Pontryagin est mieux adapté que la programmation dynamique en ce qui concerne le temps de calcul qui est quasi-instantané. Cela permet l'utilisation de technique en temps réel [31]. La même démarche a été présentée dans la référence R5. La programmation dynamique et l'optimisation convexe ont été testées pour quatre cycles de roulage, mais elles restent des méthodes hors ligne et la connaissance du cycle et les conditions de roulage sont nécessaires pour mener à un résultat optimal [33].

À propos des stratégies proposées dans cette thèse, en plus de viser l'optimisation en temps réel, elles ont été validées sur les différentes conditions de circulation et en considérant deux cycles de roulage (urbain ou autoroute) avec des profils de vitesse également variables (basse, haute et très haute). La masse (le nombre de passagers) du véhicule a été aussi variée. Ces conditions variables ont permis non seulement de tester l'efficacité (la réduction de la consommation en hydrogène et le maintien de l'état de charge de la source secondaire borné) des stratégies élaborées, mais aussi de connaître leurs limites faces aux changements brusques de la vitesse ou des variations soudaines de la puissance demandée par le système de propulsion. Les références sélectionnées ou les autres méthodes disponibles dans la littérature n'ont pas vérifié les effets des variations des conditions de roulage sur l'optimalité et la robustesse des résultats obtenus.

## 7.6 Limites des solutions proposées

La stratégie proposée est la commande optimale combinée avec un prédicteur basé sur la chaîne de Markov. Cette stratégie comporte deux parties. Le premier est un contrôleur à base de la commande optimale et la seconde partie est la chaîne de Markov.

La chaîne de Markov utilisée est calculée à partir d'un parcours routier connu. Pour une étude complète, une base de données des trajets parcourus par un utilisateur chaque jour et sur au moins une année. Cette base de données donnera une idée sur la fréquence d'utilisation du véhicule et les vitesses atteintes lors les différents trajets. Avec cette base de données, la chaîne de Markov peut être améliorée pour servir les autres trajets.

Dans ce travail de recherche, la notion de température du système n'est pas abordée. Or, la température de la source secondaire (batterie ou supercondensateur) est primordiale pour améliorer la durée de vie de cette source et assurer une sécurité du système.

Dans notre cas, les stratégies proposées dans cette thèse sont appliquées au système pour des conditions idéales. La température du supercondensateur est  $T_{sc} = 25$  °C, la température de la pile à combustible est  $T_{fc} = 95$  °C et la température du reste du système est constante et idéale. Or, dans les conditions d'utilisation normale, le système est exposé à la variation de température extérieure à cause du changement du climat. La température du véhicule conduit en hiver n'est surtout pas celle en été. Aussi, la température de chaque composant varie selon son utilisation. Ces conditions affectent forcément le comportement des composants électriques dans le véhicule et donc le rendement et la durée de vie du système. L'annexe C donne une introduction de l'effet de la température sur son comportement et sa durée de vie.

## 7.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a comparé les résultats obtenus par les quatre stratégies proposées entre elles et avec les résultats présentés dans les cinq stratégies sélectionnées dans la littérature. Mentionnons que toutes ces approches visent les mêmes objectifs en termes de consommation et le maintien de l'état de charge de la source secondaire.

La première comparaison a été effectuée sur les stratégies proposées et selon des différents critères présélectionnés bien définis (masse, vitesse, état de charge, consommation, rendement de la pile à combustible). Ces stratégies offrent des résultats similaires concernant le partage de la puissance demandée entre la pile à combustible et le supercondensateur, mais avec une consommation en hydrogène variable selon les conditions de roulage. L'état de charge reste borné mais avec des valeurs extrémales différentes.

La deuxième comparaison a été accomplie entre les stratégies proposées et les cinq stratégies sélectionnées. Ces dernières stratégies ont offert des comparaisons entre la technique à base de la programmation dynamique et des autres stratégies applicables en ligne telles celles fondées sur la commande optimale, la logique floue, le contrôleur PID, et la commande prédictive. On a sélectionné ces stratégies car elles offrent une meilleure gestion d'énergie entre les sources et la source secondaire reste bornée durant le parcours.

Dans les deux cas, les stratégies de gestion d'énergie proposées ont des performances supérieures, et les effets des variations des conditions de roulage sur l'optimalité et la robustesse des résultats obtenus ont été vérifiées.

## CHAPITRE 8

### CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS

#### 8.1 Conclusion générale

Dans ce travail de recherche, l'idée de base proposée est d'élaborer une stratégie de gestion d'énergie multiobjectif en temps réel pour un véhicule à pile à combustible et supercondensateur. La pile à combustible est une source primaire et le super condensateur est une source secondaire. Dans le cas général, une stratégie de gestion d'énergie a pour rôle de répartir la puissance exigée par la charge entre les sources afin de minimiser la consommation d'hydrogène au niveau de la pile à combustible et augmenter la durée de vie du supercondensateur.

Plusieurs stratégies d'optimisation énergétique ou de gestion d'énergie ont été proposées par les chercheurs afin d'assurer cette répartition de puissance entre ces deux sources et la charge. La majorité de ces travaux de recherche converge vers le même objectif. Cet objectif consiste à :

- ✓ réduire la consommation de l'hydrogène pendant le fonctionnement du véhicule,
- ✓ assurer une meilleure économie d'énergie,
- ✓ améliorer l'autonomie ainsi que la durée de vie des sources d'énergie utilisées dans le véhicule.

Les stratégies d'optimisation en temps réel proposées dans la littérature dépendent de certains paramètres résultant des algorithmes d'optimisation qui sont déterminées par des études hors ligne.

Ces stratégies nécessitent aussi une connaissance du parcours, des conditions de rou-

lage et une base de données importantes pour stocker les résultats. D'autres stratégies ont besoin d'un temps de calcul prohibitif et leur implémentation nécessite une réécriture des résultats adaptable en temps réel.

Ce travail de recherche constitue une contribution dans l'application des stratégies d'optimisation en temps réel. En effet, des objectifs précis ont été fixés : le véhicule doit s'adapter à n'importe quelles conditions de roulage telle que l'accélération, la décélération, le freinage, la montée, la descente, le changement de masse, le temps final du parcours, . . . . Aussi le véhicule doit s'adapter à tout parcours routier tel que le parcours semi urbain, urbain et autoroute. La stratégie d'optimisation proposée ne doit pas avoir recours à un système de localisation GPS, ou à de grandes bases de données. Cette stratégie doit être simple à mettre en œuvre et facile à implémenter. La stratégie d'optimisation proposée doit prévenir des situations extrêmes inconnues telles que la nature de la puissance demandée à haute ou brusque demande de puissance par la charge.

On a proposé quatre stratégies :

- La stratégie de gestion à base de règles est une stratégie instantanée et donc applicable en temps réel. Cette stratégie est constituée de plusieurs règles définies par expertise. L'algorithme de gestion répartit convenablement la puissance demandée entre la pile à combustible et le super condensateur. On a observé qu'à une demande brusque de puissance, le supercondensateur va fournir ce surplus de puissance en dépit de son état de charge. En effet, ce phénomène peut être expliqué par la dynamique rapide du supercondensateur et la dynamique lente de la pile à combustible à fournir rapidement la puissance. Aussi, l'algorithme a une réponse instantanée et sous forme OUI ou NON (ON/OFF) et donc elle est plus agressive.
- la deuxième stratégie basée sur la logique floue qui dépend elle aussi à des règles prédéfinies, elle est moins agressive que la stratégie précédente puisque la transition est progressive entre les états OUI et NON et on remarque cette différence dans les solutions présentées. Toutefois, cette stratégie se limite dans l'accumulation de

plusieurs règles ce qui rend le traitement complexe, le temps de calcul et de simulation est long et l'implémentation de l'algorithme en temps réel devient relativement compliquée.

- La troisième stratégie est celle de la commande optimale. Cette approche est facile à mettre en œuvre et n'a pas besoin d'une expertise ou des connaissances du système comparé aux autres stratégies. On a observé que, pour des parcours routiers et conditions de roulages inconnus, la puissance demandée est partagée adéquatement entre les sources et la charge. De plus, la consommation en hydrogène est plus faible dans le parcours urbain comparé aux autres stratégies, et l'état de charge du supercondensateur reste toujours borné. L'inconvénient est que cette approche est sous optimale vu que les conditions futures du cycle de conduite ne sont pas connues, ainsi que le temps final  $t_f$ .

On a observé que certains problèmes sont observés lorsque le véhicule atteint le seuil de puissance demandée. On remarque en temps réel, dans des cas extrêmes de fonctionnement (une puissance demandée élevée et une grande vitesse), deux phénomènes. Le premier est obtenu à puissance demandée élevée, et le second survient à une variation brusque du courant demandé par la machine électrique.

- La quatrième stratégie est proposée pour éviter les problèmes rencontrés. Elle est basée sur la commande optimale et sur la chaîne de Markov insérée pour prédire la demande future d'énergie pendant un parcours routier.

On a observé que l'état de charge du supercondensateur est maintenu borné malgré les conditions extrêmes imposées. La consommation en hydrogène est pratiquement équivalente au modèle sans la chaîne de Markov. Cette stratégie est simple à mettre en œuvre car le bloc de chaîne de Markov est séparé du bloc de la commande optimale.

## 8.2 Contributions apportées

Dans cette thèse, plusieurs contributions ont été accomplies. D'abord, la première stratégie basée sur des règles définies avec expertise humaine a été combinée avec le principe de minimisation de la consommation équivalente (ECMS). L'algorithme proposé ne dépend pas des conditions de roulage ou du type de parcours routier. On a pu prouver que cette stratégie n'est pas tout à fait robuste surtout lors des variations brusques de la puissance demandée, mais sa capacité à gérer la puissance demandée entre les deux sources et maintenir borné l'état de charge du supercondensateur est considérable. Alors, on peut conclure que cette stratégie seule n'est pas adaptée et ne peut pas être implémentée dans un véhicule, car la nature et l'état des routes et de l'utilisateur peuvent causer des pics et brusques demandes de puissance et de courant.

Dans la stratégie à base de logique floue, on a prouvé que l'état de charge du supercondensateur est mieux géré par rapport à la stratégie à base de règles surtout lors de brusques demandes de puissance du groupe motopropulseur lorsqu'il fonctionne à grande vitesse. Or, l'inconvénient de cette méthode est que les règles utilisées doivent être réduites et simplifiées puisque, si toutes les règles sont prises en compte, le temps de calcul devient élevé.

La commande optimale résolue par le principe du minimum de Pontryagin a été appliquée sans aucune étude préalable en temps différé. Notamment, on l'a simplifiée en deux équations séparées : la première calcule en temps réel la variable du vecteur d'état adjoint, et la seconde déduit la puissance optimale que la pile à combustible doit fournir. On a aussi pu calculer le vecteur d'état adjoint en temps réel en collectant l'information instantanée disponible pendant le fonctionnement du véhicule.

Dans la stratégie de gestion à base de la commande optimale et la chaîne de Markov, on a intégré un prédicteur à la commande optimale. Cette stratégie de gestion s'est bien adaptée à la nature de la dynamique (la réponse) des sources d'énergies surtout lors des

conditions extrêmes (une grande vitesse et une grande masse du véhicule).

### **8.3 Recommandations**

Une amélioration dans le prédicteur à base de chaîne de Markov est importante dans la suite de ce travail de recherche. Cette étape est essentielle pour n'importe quelle stratégie de gestion ou d'optimisation. Car chaque stratégie ne couvre pas le changement brusque de puissance demandée ou de vitesse du véhicule. Des méthodes statistiques seront utilisées pour calculer et prédire ces situations. Pour compléter cette tâche, une base de données des trajets parcourus par un utilisateur chaque jour et sur au moins une année est donc essentielle.

Une autre perspective importante est de mettre au point un simulateur qui permet la mesure de la température de chaque composant et les conditions météorologiques extérieures. Inclure aussi la température dans le problème d'optimisation et étudier son effet sur la consommation, la durée de vie et le rendement de chaque composant du véhicule. Enfin, une perspective de validation expérimentale de la stratégie proposée.

## RÉFÉRENCES

- [1] Honda Fuel Cell Power FCX. <http://automobiles.honda.com/fcx-clarity/specifications.aspx>.
- [2] Zheng Chen, Chris Chunting Mi, Rui Xiong, Jun Xu, and Chenwen You. Energy management of a power-split plug-in hybrid electric vehicle based on genetic algorithm and quadratic programming. *Journal of Power Sources*, 248 :416–426, 2014.
- [3] Saida Kermani. *Gestion énergétique des véhicules hybrides : de la simulation à la commande temps réel*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2009.
- [4] Sébastien Delprat. *Evaluation de stratégies de commande pour véhicules hybride parallèles*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2002.
- [5] Jérôme Bernard. *Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande*. PhD thesis, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2007.
- [6] Laura V Pérez, Guillermo R Bossio, Diego Moitre, and Guillermo O García. Optimization of power management in an hybrid electric vehicle using dynamic programming. *Mathematics and Computers in Simulation*, 73(1) :244–254, 2006.
- [7] Ilya Kolmanovsky, Irina Siverguina, and Bob Lygoe. Optimization of powertrain operating policy for feasibility assessment and calibration : Stochastic dynamic programming approach. In *American Control Conference, 2002. Proceedings of the 2002*, volume 2, pages 1425–1430. IEEE, 2002.
- [8] Minjin Kim, Young-Jun Sohn, Won-Yong Lee, and Chang-Soo Kim. Fuzzy control based engine sizing optimization for a fuel cell battery hybrid mini-bus. *Journal of Power Sources*, 178(2) :706–710, 2008.

- [9] Niels J Schouten, Mutasim A Salman, and Naim A Kheir. Energy management strategies for parallel hybrid vehicles using fuzzy logic. *Control Engineering Practice*, 11(2) :171–177, 2003.
- [10] JL Torres, R Gonzalez, A Gimenez, and J Lopez. Energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles. a comparative study. *Applied Energy*, 113 :816–824, 2014.
- [11] Naim A Kheir, Mutasim A Salman, and Niels J Schouten. Emissions and fuel economy trade-off for hybrid vehicles using fuzzy logic. *Mathematics and computers in simulation*, 66(2) :155–172, 2004.
- [12] Hyun-Sik Ahn and Nam-Su Lee. Power distribution control law for fchev-a fuzzy logic-based approach. In *Control and Automation, 2005. ICCA'05. International Conference on*, volume 1, pages 486–490. IEEE, 2005.
- [13] Pericle Zanchetta, Mark Sumner, Francesco Cupertino, Maria Marinelli, and Ernesto Mininno. On-line and off-line control design in power electronics and drives using genetic algorithms. In *Industry Applications Conference, 2004. 39th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2004 IEEE*, volume 2, pages 864–871. IEEE, 2004.
- [14] L Wang. Hybrid electric vehicle design based on a multi-objective optimization evolutionary algorithm. *M.S. Thesis Texas A-M University*, 2005.
- [15] Vanessa Paladini, Teresa Donateo, Arturo De Risi, and Domenico Laforgia. Supercapacitors fuel-cell hybrid electric vehicle optimization and control strategy development. *Energy Conversion and Management*, 48(11) :3001–3008, 2007.
- [16] Cristian Musardo, Giorgio Rizzoni, Yann Guezennec, and Benedetto Staccia. Aecms : An adaptive algorithm for hybrid electric vehicle energy management. *European Journal of Control*, 11(4) :509–524, 2005.
- [17] Paganelli Rodatz, G Paganelli, A Sciarretta, and L Guzzella. Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle. *Control Engineering Practice*, 13(1) :41–53, 2005.

- [18] P Tulpule, V Marano, and G Rizzoni. Effects of different phev control strategies on vehicle performance. In *American Control Conference, 2009. ACC'09.*, pages 3950–3955. IEEE, 2009.
- [19] Volkan Sezer, Metin Gokasan, and Seta Bogosyan. A novel ecms and combined cost map approach for high-efficiency series hybrid electric vehicles. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 60(8) :3557–3570, 2011.
- [20] Valerie H Johnson, Keith B Wipke, and David J Rausen. Hev control strategy for real-time optimization of fuel economy and emissions. Technical report, SAE Technical Paper, 2000.
- [21] Saida Kermani, Rochdi Trigui, Sebastien Delprat, Bruno Jeanneret, and Thierry Marie Guerra. Phil implementation of energy management optimization for a parallel hev on a predefined route. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 60(3) :782–792, 2011.
- [22] J Bernard, S Delprat, TM Guerra, and FN Büchi. Fuel efficient power management strategy for fuel cell hybrid powertrains. *Control Engineering Practice*, 18(4) :408–417, 2010.
- [23] Piyush Bubna, Doug Brunner, Suresh G Advani, and Ajay K Prasad. Prediction-based optimal power management in a fuel cell/battery plug-in hybrid vehicle. *Journal of Power Sources*, 195(19) :6699–6708, 2010.
- [24] Lina Fu, U Ozguner, Pinak Tulpule, and Vincenzo Marano. Real-time energy management and sensitivity study for hybrid electric vehicles. In *American Control Conference (ACC), 2011*, pages 2113–2118. IEEE, 2011.
- [25] Chan-Chiao Lin, Huei Peng, Jessy W Grizzle, and Jun-Mo Kang. Power management strategy for a parallel hybrid electric truck. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 11(6) :839–849, 2003.
- [26] Andreas Schell, Huei Peng, Doanh Tran, Euthie Stamos, Chan-Chiao Lin, and Min Joong Kim. Modelling and control strategy development for fuel cell electric vehicles. *Annual Reviews in Control*, 29(1) :159–168, 2005.

- [27] Min-Joong Kim and Huei Peng. Power management and design optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles. *Journal of power sources*, 165(2) :819–832, 2007.
- [28] Dean Rotenberg, Ardalan Vahidi, and Ilya Kolmanovsky. Ultracapacitor assisted powertrains : Modeling, control, sizing, and the impact on fuel economy. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 19(3) :576–589, 2011.
- [29] Ahmad Fadel and Biao Zhou. An experimental and analytical comparison study of power management methodologies of fuel cell–battery hybrid vehicles. *Journal of Power Sources*, 196(6) :3271–3279, 2011.
- [30] Y Ates, O Erdinc, M Uzunoglu, and B Vural. Energy management of an fc/uc hybrid vehicular power system using a combined neural network-wavelet transform based strategy. *International journal of hydrogen energy*, 35(2) :774–783, 2010.
- [31] CH Zheng, GQ Xu, YI Park, WS Lim, and SW Cha. Comparison of pmp and dp in fuel cell hybrid vehicles. *International Journal of Automotive Technology*, 15(1) :117–123, 2014.
- [32] Jérôme Bernard, Sebastien Delprat, FN Buchi, and Thierry-Marie Guerra. Fuel-cell hybrid powertrain : Toward minimization of hydrogen consumption. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 58(7) :3168–3176, 2009.
- [33] Tobias Nüesch, Philipp Elbert, Michael Flankl, Christopher Onder, and Lino Guzzella. Convex optimization for the energy management of hybrid electric vehicles considering engine start and gearshift costs. *Energies*, 7(2) :834–856, 2014.
- [34] Yann Collette and Patrick Siarry. *Optimisation multiobjectif*. Editions Eyrolles, 2002.
- [35] Hanane Hemi, Jamel Ghouili, and Ahmed Cheriti. A real time energy management for electrical vehicle using combination of rule-based and ecms. In *Electrical Power & Energy Conference (EPEC), 2013 IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2013.
- [36] Hanane Hemi, Jamel Ghouili, and Ahmed Cheriti. A real time fuzzy logic power management strategy for a fuel cell vehicle. *Energy Conversion and Management*, 80 :63–70, 2014.

- [37] Hanane Hemi, Jamel Ghouili, and Ahmed Cheriti. An optimal control solved by pontryagin's minimum principle approach for a fuel cell/supercapacitor vehicle. pages 87–92, 2014.
- [38] Hanane Hemi, Jamel Ghouili, and Ahmed Cheriti. Combination of markov chain and optimal control solved by pontryagin's minimum principle for a fuel cell/supercapacitor vehicle. *Energy Conversion and Management*, 91 :387–393, 2015.
- [39] MathWorks. <http://www.mathworks.com>.
- [40] Olivier Tremblay and Louis-A Dessaint. Experimental validation of a battery dynamic model for ev applications. *World Electric Vehicle Journal*, 3(1) :1–10, 2009.
- [41] Guzzella Lino and Sciarretta Antonio. Vehicle propulsion systems, introduction to modeling and optimization. *Springer*, 2007.
- [42] Woonki Na, Taesik Park, Taehyung Kim, and Sangshin Kwak. Light fuel-cell hybrid electric vehicles based on predictive controllers. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 60(1) :89–97, 2011.
- [43] Pablo García, Juan P Torreglosa, Luis M Fernández, and Francisco Jurado. Viability study of a fc-battery-sc tramway controlled by equivalent consumption minimization strategy. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(11) :9368–9382, 2012.
- [44] Zhan-li Cheng, Wei-rong Chen, Qi Li, Zhi-ling Jiang, and Zhi-han Yang. Modeling and dynamic simulation of an efficient energy storage component-supercapacitor. In *Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific*, pages 1–4. IEEE, 2010.
- [45] Maxwell Technologies Products. <http://www.maxwell.com/>.
- [46] Sanjaka G Wirasingha and Ali Emadi. Classification and review of control strategies for plug-in hybrid electric vehicles. *vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 60(1) :111–122, 2011.

- [47] João P Trovão, Paulo G Pereirinha, Humberto M Jorge, and Carlos Henggeler Antunes. A multi-level energy management system for multi-source electric vehicles—an integrated rule-based meta-heuristic approach. *Applied Energy*, 105 :304–318, 2013.
- [48] Riccardo Biasini, Simona Onori, and Giorgio Rizzoni. A near-optimal rule-based energy management strategy for medium duty hybrid truck. *International Journal of Powertrains*, 2(2) :232–261, 2013.
- [49] Bo-Chiuan Chen, Yuh-Yih Wu, and Hsien-Chi Tsai. Design and analysis of power management strategy for range extended electric vehicle using dynamic programming. *Applied Energy*, 113 :1764–1774, 2014.
- [50] CH Zheng, CE Oh, YI Park, and SW Cha. Fuel economy evaluation of fuel cell hybrid vehicles based on equivalent fuel consumption. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(2) :1790–1796, 2012.
- [51] Laura Tribioli, Michele Barbieri, Roberto Capata, Enrico Sciubba, Elio Jannelli, and Gino Bella. A real time energy management strategy for plug-in hybrid electric vehicles based on optimal control theory. *Energy Procedia*, 45 :949–958, 2014.
- [52] Souso Kelouwani, Kodjo Agbossou, Yves Dubé, and Loïc Boulon. Fuel cell plug-in hybrid electric vehicle anticipatory and real-time blended-mode energy management for battery life preservation. *Journal of Power Sources*, 221 :406–418, 2013.
- [53] Yuan Zou, Hou Shi-jie, Li Dong-ge, Gao Wei, and Xiao-song Hu. Optimal energy control strategy design for a hybrid electric vehicle. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2013, 2013.
- [54] Qi Li, Weirong Chen, Yankun Li, Shukui Liu, and Jin Huang. Energy management strategy for fuel cell/battery/ultracapacitor hybrid vehicle based on fuzzy logic. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 43(1) :514–525, 2012.
- [55] Chun-Yan Li and Guo-Ping Liu. Optimal fuzzy power control and management of fuel cell/battery hybrid vehicles. *Journal of power sources*, 192(2) :525–533, 2009.

- [56] O Erdinc, B Vural, and M Uzunoglu. A wavelet-fuzzy logic based energy management strategy for a fuel cell/battery/ultra-capacitor hybrid vehicular power system. *Journal of Power sources*, 194(1) :369–380, 2009.
- [57] F. Chevré and F. Guély. Cahier technique n191 la logique floue.
- [58] Namwook Kim, Sukwon Cha, and Huei Peng. Optimal control of hybrid electric vehicles based on pontryagin’s minimum principle. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 19(5) :1279–1287, 2011.
- [59] Stephanie Stockar, Vincenzo Marano, Marcello Canova, Giorgio Rizzoni, and Lino Guzzella. Energy-optimal control of plug-in hybrid electric vehicles for real-world driving cycles. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 60(7) :2949–2962, 2011.
- [60] W. Dib, L. Serrao, and A. Sciarretta. Optimal control to minimize trip time and energy consumption in electric vehicles. In *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2011 IEEE*, pages 1–8, Sept 2011.
- [61] Reza Razavian, Nasser L Azad, and John McPhee. On real-time optimal control of a series hybrid electric vehicle with an ultra-capacitor. In *American Control Conference (ACC), 2012*, pages 547–552. IEEE, 2012.
- [62] CH Zheng, NW Kim, and SW Cha. Optimal control in the power management of fuel cell hybrid vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(1) :655–663, 2012.
- [63] Namwook Kim, Suk Won Cha, and Huei Peng. Optimal equivalent fuel consumption for hybrid electric vehicles. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 20(3) :817–825, 2012.
- [64] G Rousseau, D Sinoquet, and P Rouchon. Constrained optimization of energy management for a mild-hybrid vehicle. *Oil & Gas Science and Technology-Revue de l’IFP*, 62(4) :623–634, 2007.

- [65] Balaji Sampathnarayanan, Simona Onori, and Stephen Yurkovich. An optimal regulation strategy for energy management of hybrid electric vehicles. In *CDC*, pages 7063–7068, 2012.
- [66] D Subbaram Naidu. *Optimal control systems*, volume 2. CRC press, 2002.
- [67] Liangfei Xu, Fuyuan Yang, Jianqiu Li, Minggao Ouyang, and Jianfeng Hua. Real time optimal energy management strategy targeting at minimizing daily operation cost for a plug-in fuel cell city bus. *international journal of hydrogen energy*, 37(20) :15380–15392, 2012.
- [68] Mehdi Ansarey, Masoud Shariat Panahi, Hussein Ziarati, and Mohammad Mahjoob. Optimal energy management in a dual-storage fuel-cell hybrid vehicle using multi-dimensional dynamic programming. *Journal of Power Sources*, 250 :359–371, 2014.
- [69] Chen Zhang and A Vahid. Real-time optimal control of plug-in hybrid vehicles with trip preview. In *American Control Conference (ACC), 2010*, pages 6917–6922. IEEE, 2010.
- [70] Farouk Odeim, Jürgen Roes, Lars Wülbeck, and Angelika Heinzl. Power management optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles with experimental validation. *Journal of Power Sources*, 252 :333–343, 2014.
- [71] Daniel F Opila, Xiaoyong Wang, Ryan McGee, and JW Grizzle. Real-time implementation and hardware testing of a hybrid vehicle energy management controller based on stochastic dynamic programming. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 135(2) :021002, 2013.
- [72] Scott Jason Moura, Hosam K Fathy, Duncan S Callaway, and Jeffrey L Stein. A stochastic optimal control approach for power management in plug-in hybrid electric vehicles. *Control Systems Technology, IEEE Transactions on*, 19(3) :545–555, 2011.
- [73] Christoph Romaus, D Wimmelbucker, Karl Stephan Stille, and J Bocker. Self-optimization energy management considering stochastic influences for a hybrid

- energy storage of an electric road vehicle. In *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International*, pages 67–74. IEEE, 2013.
- [74] Warren Vaz, Arup KR Nandi, Robert G Landers, and Umit O Koylu. Electric vehicle range prediction for constant speed trip using multi-objective optimization. *Journal of Power Sources*, 275 :435–446, 2015.
- [75] Saida Kermani, Sebastien Delprat, Thierry-Marie Guerra, Rochdi Trigui, and Bruno Jeanneret. Predictive energy management for hybrid vehicle. *Control Engineering Practice*, 20(4) :408–420, 2012.
- [76] Viktor Larsson, L Johannesson Mårdh, Bo Egardt, and Sten Karlsson. Commuter route optimized energy management of hybrid electric vehicles. *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 15(3) :1145–1154, 2014.
- [77] Chen Zhang and A Vahid. Real-time optimal control of plug-in hybrid vehicles with trip preview. In *American Control Conference (ACC), 2010*, pages 6917–6922. IEEE, 2010.
- [78] John A Gubner. *Probability and random processes for electrical and computer engineers*. Cambridge University Press, 2006.
- [79] Omar Laldin, Mazhar Moshirvaziri, and Olivier Trescases. Predictive algorithm for optimizing power flow in hybrid ultracapacitor/battery storage systems for light electric vehicles. *Power Electronics, IEEE Transactions on*, 28(8) :3882–3895, 2013.
- [80] Qiuming Gong, Shawn Midlam-Mohler, Vincenzo Marano, Giorgio Rizzoni, and Yann Guezennec. Statistical analysis of phev fleet data. In *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2010 IEEE*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [81] Alessandro Di Giorgio, Francesco Liberati, and Antonio Pietrabissa. On-board stochastic control of electric vehicle recharging. In *Decision and Control (CDC), 2013 IEEE 52nd Annual Conference on*, pages 5710–5715. IEEE, 2013.
- [82] Diego Feroldi and Marta Basualdo. Description of pem fuel cells system. In *PEM Fuel Cells with Bio-Ethanol Processor Systems*, pages 49–72. Springer, 2012.

- [83] Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. <http://energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-technology-challenges>.
- [84] Pucheng Pei, Qianfei Chang, and Tian Tang. A quick evaluating method for automotive fuel cell lifetime. *International Journal of Hydrogen Energy*, 33(14) :3829–3836, 2008.
- [85] CH Zheng, GQ Xu, YI Park, WS Lim, and SW Cha. Prolonging fuel cell stack lifetime based on pontryagin’s minimum principle in fuel cell hybrid vehicles and its economic influence evaluation. *Journal of Power Sources*, 248 :533–544, 2014.
- [86] Yuedong Zhan, Youguang Guo, Jianguo Zhu, and Li Li. Current short circuit implementation for performance improvement and lifetime extension of proton exchange membrane fuel cell. *Journal of Power Sources*, 270 :183–192, 2014.
- [87]
- [88] Monzer Al Sakka, Hamid Gualous, Joeri Van Mierlo, and Hasan Culcu. Thermal modeling and heat management of supercapacitor modules for vehicle applications. *Journal of Power Sources*, 194(2) :581–587, 2009.
- [89] Ramzi Chaari, Olivier Briat, and J-M Vinassa. Capacitance recovery analysis and modelling of supercapacitors during cycling ageing tests. *Energy Conversion and Management*, 82 :37–45, 2014.
- [90] EPCOS UltraCap™ double layer capacitors. Ultracaptm double layer capacitors—.
- [91] Pradyumna Goli, Stanislav Legedza, Aditya Dhar, Ruben Salgado, Jacqueline Renteria, and Alexander A Balandin. Graphene-enhanced hybrid phase change materials for thermal management of li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 248 :37–43, 2014.
- [92] O Erdinc, B Vural, and M Uzunoglu. A dynamic lithium-ion battery model considering the effects of temperature and capacity fading. In *Clean Electrical Power, 2009 International Conference on*, pages 383–386. IEEE, 2009.

- [93] Peter Andersson and Olle Collin. Parameterization of a 14.5 ah lifepo4-battery cell. 2009.
- [94] mpoweruk. <http://www.mpoweruk.com/bms.htm>.
- [95] Kay Chen Tan, Eik Fun Khor, and Tong Heng Lee. *Multiobjective Evolutionary Algorithms and Applications : Algorithms and Applications*. Springer, 2006.
- [96] Jürgen Branke, Kalyanmoy Deb, Kaisa Miettinen, and Roman Slowinski. *Multiobjective optimization : Interactive and evolutionary approaches*, volume 5252. Springer, 2008.
- [97] Vincent Barichard. *Approches hybrides pour les problèmes multiobjectifs. These de l'Universit d'Angers, Angers, 2003.*
- [98] Y.K. Tan, J. C. Mao, and K. J. Tseng. Modelling of battery temperature effect on electrical characteristics of li-ion battery in hybrid electric vehicle. *Power Electronics and Drive Systems (PEDS), 2011 IEEE Ninth International Conference on*, pages 637–642, Dec 2011.
- [99] Kejun Qian, Chengke Zhou, Yue Yuan, and M Allan. Temperature effect on electric vehicle battery cycle life in vehicle-to-grid applications. In *Electricity Distribution (CICED), 2010 China International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [100] Federico Baronti, Gabriele Fantechi, Emanuele Leonardi, Roberto Roncella, and Roberto Saletti. Effective modeling of temperature effects on lithium polymer cells. In *Electronics, Circuits, and Systems (ICECS), 2010 17th IEEE International Conference on*, pages 990–993. IEEE, 2010.
- [101] F Baronti, G Fantechi, L Fanucci, E Leonardi, R Roncella, R Saletti, and S Saponara. State-of-charge estimation enhancing of lithium batteries through a temperature-dependent cell model. In *Applied Electronics (AE), 2011 International Conference on*, pages 1–5. IEEE, 2011.
- [102] Salvio Chacko and Yongmann M Chung. Thermal modelling of li-ion polymer battery for electric vehicle drive cycles. *Journal of Power Sources*, 213 :296–303, 2012.

- [103] M Shadman Rad, DL Danilov, M Baghalha, M Kazemeini, and PHL Notten. Adaptive thermal modeling of li-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 102 :183–195, 2013.
- [104] CH Zheng, NW Kim, YI Park, WS Lim, SW Cha, and GQ Xu. The effect of battery temperature on total fuel consumption of fuel cell hybrid vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(13) :5192–5200, 2013.
- [105] David Linden and Thomas B Reddy. *Handbook of Batteries 3rd*. McGraw-Hill, 2002.
- [106] Damien Grenier, Francis Labrique, Herve Buyse, and Ernest Matagne. *Électromécanique : convertisseurs d'énergie et actionneurs*. Dunod, 2001.

## ANNEXE A

### DURÉE DE VIE DES SOURCES D'ÉNERGIE ÉTUDIÉES

Étant donné que la source primaire (la pile à combustible) et la source secondaire (le supercondensateurs et/ou la batteries) ont des durées de vie courtes, alors, les maximiser représente un défi et un objectif ultime. Ainsi, le coût des ces sources est minimisé et leur utilisation devient plus rentable.

#### A.1 Durée de vie de la pile à combustible

On rapporte dans la référence [83] que des chercheurs, travaillant sur l'amélioration de la pile à combustible, visent à atteindre une durée de vie proche des voitures thermiques conventionnelles. Cette durée de vie est environ 5000 *heures* et 150000 *miles* (= 241401 *km*) et un intervalle de température de fonctionnement du véhicule entre 40 °C à 80 °C. Pour que les véhicules à pile à combustible soient acceptés sur le marché, il faut satisfaire plus de 40000 *heures* de fonctionnement stable à une température entre -35 °C à 40 °C [83].

La référence [83] expose des facteurs importants pour améliorer la durée de vie de la pile à combustible. Les chercheurs ont fait beaucoup de tests pour rendre cette source plus durable. Beaucoup de problèmes sont la cause de la détérioration de la durée de vie de la pile à combustible : le problème de la gestion de l'eau dans les piles à combustible utilisés dans les véhicules et la dynamique de certains paramètres de la pile à combustible. Le problème de la température de la pile à combustible et la température ambiante provoquent un problème de gestion thermique ce qui peut faire dégrader l'état de la pile à combustible.

La référence [84] présente une évaluation de la durée de vie de la pile à combustible. La durée de vie de la pile à combustible dans les véhicules est courte par rapport aux autres applications. La raison est liée à la nature du parcours routier, à la demande de forte de puissance de la charge et à la marche-arrêt de la pile à combustible.

La référence [85] propose d'améliorer la durée de vie de la pile à combustible avec le principe du minimum de Pontryagin pour un véhicule hybride. La stratégie prend en compte la durée de vie et l'économie de la consommation de l'hydrogène pour la pile à combustible en même temps. La durée de vie de la pile à combustible est améliorée dans cette référence en évitant la répétition et le changement rapide de la puissance de la pile à combustible en réponse à une demande de puissance de la charge.

Dans la référence [86], la durée de vie est améliorée et le problème de lenteur au démarrage est contourné. La méthode du courant du court-circuit (current short circuit method) a été proposée et a contribué à une amélioration de la durée de vie.

## **A.2 Durée de vie du supercondensateur**

La référence [87] démontre que les cycles charge et décharge du supercondensateur ont un impact sur sa durée de vie. Les paramètres qui accélèrent son vieillissement sont la tension et la température.

La référence [88] modélise le comportement thermique et propose un modèle thermique du supercondensateur. La température a un effet sur son vieillissement et donc sur sa durée de vie.

La référence [89] présente une étude du supercondensateur lors d'un vieillissement accéléré. Cette étude montre que l'état de vieillissement du supercondensateur a un effet sur ses performances : sa capacité diminue et la résistance interne augmente.

Dans la référence [45], la vie du supercondensateur est principalement affectée par une combinaison de la tension et de la température de fonctionnement. La température est le principal facteur de sa détérioration. Le supercondensateur a une durée de vie illimitée lorsqu'il est soumis à des conditions favorables. D'après cette référence, la durée de vie du supercondensateur spécifiée par les normes de l'industrie est dégradée quand il y a une diminution de 20 % de sa capacité et/ou 200 % d'augmentation de sa résistance interne. La tension donne un avantage à la durée de vie du supercondensateur, mais elle est moins important que l'effet de la température. Or, une baisse de tension nominale de 0.1 V permet de prolonger la durée de vie du supercondensateur.

Dans les référence [45] et [90], la durée de vie est réduite de moitié dans deux cas : une augmentation de temperature de +10 °C et une augmentation de tension de 0.2 V par rapport à la tension nominale.

D'une manière globale, tous les travaux de recherche et les tests de fabricants de supercondensateurs sont unanimes que la température est un facteur essentiel sur vieillissement et la durée de vie du supercondensateur.

Dans ce travail de recherche, l'aspect thermique du supercondensateur qui n'a été considéré. Tous les composants ont un seuil minimal de tension pour une utilisation efficace. Or le supercondensateur peut être utilisé entre sa tension nominale et zéro volt [45], [90]. Pour augmenter l'énergie et la puissance du supercondensateur, il est souhaitable de travailler avec une tension aussi élevée que possible [90]. En effet, dans ce travail de recherche l'état de charge du supercondensateur a été maintenu borné entre (40 % et 95 %.

### **A.3 Durée de vie de la batterie**

Les batteries Li-ion sont des composants importants dans les véhicules hybrides. Elles jouent le rôle d'une source primaire dans le cas des véhicules électriques et une source

secondaire dans le cas des véhicules hybrides à pile à combustible ou les véhicules hybrides thermiques. Les problèmes que peuvent avoir cette source en plus de la diminution de sa durée de vie sont généralement à cause de la température. Les coûts de maintenance et de remplacement de ces sources sont considérables. Le remplacement fréquent de ces sources a aussi un impact environnemental majeur et contribue à la dégradation de la nature. Cela contrarie l'idée de base de l'utilisation des véhicules propres qui préservent la nature et minimisent la quantité des gaz à effet de serre libérés dans l'atmosphère.

Dans la référence [91], on mentionne que le comportement thermique et la fiabilité de la batterie peuvent être améliorées avec 'hybrid phase change material with graphene fillers'.

La référence [92] propose un modèle dynamique de la batterie lithium-ion et analyse l'effet de la température et la détérioration de la capacité de la batterie sur sa durée de vie.

Dans la référence [93], on expose plusieurs facteurs qui affectent la durée de vie de la batterie.

- Les hautes températures ambiantes et l'augmentation de la température lors de son utilisation causent une diminution et une dégradation de sa durée de vie et peuvent aussi l'endommager.
- Le regroupement de plusieurs batteries en série ou en parallèle a un effet sur leur durée de vie.
- La durée de vie dépend aussi d'état de décharge  $DOD = 1 - SOC$  de la batterie, c-à-d que quand la batterie est déchargée à chaque cycle plusieurs fois plus de  $DOD \geq 80\%$  ( $SOC \leq 20\%$ ), la batterie s'use plus rapidement.
- La batterie usée et à remplacer quand la différence entre sa capacité actuelle et initiale est de 20 %.

Dans la référence [45], on propose de mettre des supercondensateurs en parallèle avec la batterie pour améliorer sa durée de vie.

Dans les références citées dans l'état de l'art et dans la référence [94], l'état de charge de la batterie est exploité et utilisé pour améliorer sa durée de vie. En effet, le fait de garder borné l'état de charge durant un parcours routier peut garantir, à une certaine limite, l'amélioration de leur autonomie et leur durée de vie. L'état de charge doit être maintenu bornée entre 40 % et 80 %. La durée de vie de la batterie peut être réduite si la batterie est déchargée moins de 40 % et peut avoir un risque de surcharge si elle est chargée plus de 80 %.

## ANNEXE B

## RAPPELS THÉORIQUES SUR L'OPTIMISATION MULTIOBJECTIF

Cette annexe présente un sommaire rappel sur l'optimisation multiobjectif. Les différentes approches de résolution du problème de l'optimisation multiobjectif sont aussi décrites.

## B.1 Introduction

Le problème de l'optimisation multiobjectif regroupe plusieurs objectifs ou critères. Chacun de ces objectifs est un problème monoobjectif à résoudre. La résolution du problème d'optimisation multiobjectif est de minimiser ou maximiser tous les objectifs posés. Le problème de l'optimisation multiobjectif est décrit par l'équation (B.1) [34].

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser} \quad \vec{f}(\vec{x}) \\ \text{avec} \quad \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \\ \text{et} \quad \vec{h}(\vec{x}) = 0 \\ \text{où} \quad \vec{x} \in \mathbb{R}^n, \vec{f}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^k, \vec{g}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^m \text{ et } \vec{h}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^p \end{array} \right. \quad (\text{B.1})$$

avec  $\vec{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  est le vecteur de décision composé de  $x_i$  variables du problème,  $n$  est le nombre de variables.  $\vec{f}$  est le vecteur de fonction objectifs composé de  $k$  objectifs.  $\vec{g}$  est les contraintes d'inégalités de  $m$  contraintes.  $\vec{h}$  est les contraintes d'égalités de  $p$  contraintes.

La solution optimale de ce problème est une multitude de point de  $\mathbb{R}^k$ . La recherche de la solution de ce problème consiste à chercher le meilleur compromis entre les objectifs posés. Une relation d'importance entre les objectifs est nécessaire pour définir la relation de dominance entre eux. Dans la majorité des problèmes d'optimisation multiobjectif, la solution du problème n'est pas unique. Les objectifs posés peuvent aussi être contradictoires.

Pour choisir les solutions qui correspondent au mieux au problème de l'optimisation multiobjectif, une relation de dominance doit exister entre la solution choisie et les autres solutions restantes. Plusieurs relations de dominance ont été utilisées la plus célèbre est la notion de la dominance au sens de Pareto.

## **B.2 Techniques de résolution classiques**

Dans cette section, les méthodes classiques de résolution d'un problème d'optimisation multiobjectif sont présentées dans les références [34], [95].

### **B.2.1 Méthode de pondération**

Cette méthode de résolution est la plus évidente. Le problème est modélisé en une seule équation regroupant sous forme d'une somme pondérée tous les objectifs à atteindre. Chaque objectif est multiplié par un coefficient de pondération.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{minimiser} \quad f = \sum_{i=1}^k \omega_i \cdot f_i(\vec{x}) \\ \text{avec} \quad \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \\ \text{et} \quad \vec{h}(\vec{x}) = 0 \\ \text{où} \quad \vec{x} \in \mathbb{R}^n, \vec{f}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^k, \vec{g}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^m \text{ et } \vec{h}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^p \end{array} \right. \quad (\text{B.2})$$

avec  $\omega_i$  est le coefficient de pondération pour l'objectif  $i$ . Ce coefficient est positif. L'équation (B.3) représente ce coefficient pour  $k$  objectifs,

$$\sum_{i=1}^k \omega_i = 1 \quad (\text{B.3})$$

L'avantage de cette méthode est qu'elle est simple à mettre en œuvre et d'une grande efficacité dans certain cas. Or, le premier point faible de cette méthode réside dans la détermination des coefficients de pondération  $\omega_i$ . En plus, cette méthode n'est valable que sur un ensemble convexe. Les solutions qui se trouvent dans un ensemble concave ne sont pas pris en compte.

### B.2.2 Méthode de compromis

La méthode du compromis est appelée la méthode  $\epsilon$ -contrainte dans d'autres livres comme [96].

Cette méthode consiste à passer d'un problème d'optimisation multiobjectif à un simple problème monoobjectif et d'ajouter des contraintes au problème. D'une autre manière, choisir un seul objectif prioritaire à optimiser et convertir les autres  $(k - 1)$  objectifs en contraintes d'inégalité. La méthode de compromis est formulée dans l'équation (B.4).

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{minimiser} \quad \vec{f}_i(\vec{x}) \\
 \text{avec} \quad \vec{f}_1(\vec{x}) \leq \epsilon_1 \\
 \quad \quad \quad \vdots \\
 \quad \quad \quad \vec{f}_{i-1}(\vec{x}) \leq \epsilon_{i-1} \\
 \quad \quad \quad \vec{f}_{i+1}(\vec{x}) \leq \epsilon_{i+1} \\
 \quad \quad \quad \vdots \\
 \quad \quad \quad \vec{f}_k(\vec{x}) \leq \epsilon_k \\
 \quad \quad \quad \vec{g}(\vec{x}) \leq 0 \\
 \text{et} \quad \vec{h}(\vec{x}) = 0 \\
 \text{où} \quad \vec{x} \in \mathbb{R}^n, \vec{f}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^k, \vec{g}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^m \text{ et } \vec{h}(\vec{x}) \in \mathbb{R}^p
 \end{array} \right. \quad (\text{B.4})$$

Avec  $\vec{c}$  est un vecteur de contraintes.

L'avantage de cette méthode est sa simplicité. Traiter un problème monobjectif est simple comparé à un problème multiobjectif. Or, son majeur inconvénient réside dans les contraintes ajoutées au problème. La résolution de ce problème devient compliquée et prend un temps de calcul considérable. La connaissance des valeurs de  $\epsilon_i$  est aussi importante.

### B.3 Méthode à base des algorithmes évolutionnaires

Les algorithmes évolutionnaires présentent l'évolution naturelle d'une population assistée par ordinateur. La base de ces algorithmes est l'évolution aléatoire d'une population constituée de plusieurs individus. Plusieurs algorithmes évolutionnaires ont été élaborés. La plus connue d'entre elles est les algorithmes génétiques. Ces algorithmes ont été inspirés par les chaînes des gènes ou chromosomes des organismes vivants ADN. De la même

manière, dans les algorithmes génétiques, l'individu est considéré comme un chromosome. Ces algorithmes sont aussi basées sur des chaînes binaires et un ensemble de codes génétiques comme la croisement, mutation, . . . [97].

#### **B.4 Méthode floues**

La méthode floue consiste à traiter les fonctions objectifs d'une manière floue. Cette méthode passe d'une décision binaire vue par les autres méthodes d'optimisation multiobjectif à une décision moins contraignante et progressive par l'utilisation des méthodes floues.

Le livre [34] présente quelque méthodes floues comme la logique floue, la méthode de Sakawa et la méthode de Reardon.

#### **B.5 Conclusion**

Dans ce travail de recherche, une stratégie d'optimisation énergétique multiobjective multicritères pour un véhicule à pile à combustible et supercondensateur sera proposée.

Les objectifs à atteindre lors de la répartition de puissance demandée en temps réel sont :

**Minimiser** la consommation de l'hydrogène,

**Maximiser** la récupération d'énergie de freinage

**Maximiser** la durée de vie de la source secondaire (batterie et/ou supercondensateur),

**Minimiser** le coût du système de tension.

Une des stratégies d'optimisation multiobjectif citées dans les sections précédentes

pourra résoudre ce problème à plusieurs objectifs. Cette stratégie doit respecter certaines contraintes liées au système. Cette stratégie sera analysée et implémentée pour un parcours inconnu et des conditions de roulages aussi inconnues. Or, les inconvénients liés à leur utilisation compliquent son implémentations dans le cadre de ce travail de recherche.

Le choix des méthodes citées précédemment présente de nombreux inconvénients. Dans le cas de ce travail de recherche, la nature et les conditions du problème d'optimisation sont inconnus. La stratégie d'optimisation choisie doit aussi être implémentée en temps réel. Le choix est donc porté sur une stratégie d'optimisation énergétique qui ne nécessite pas une étude hors ligne.

Une stratégie d'optimisation multiobjective classique ne sera pas en mesure de satisfaire ces exigences car la connaissance de la nature du problème et une étude hors ligne pour fixer certains paramètres sont primordiales.

Les algorithmes évolutionnaires malgré leur popularité mais restent limités dans leur utilisation dans le cas de ce travail de recherche. Un grand inconvénient de ces algorithmes est qu'ils nécessitent une étude hors ligne ce qui mène à un temps de calcul long pour résoudre le problème d'optimisation.

La méthode floue est plus appropriée à cause de ces avantages comme sa robustesse, son adaptation facile aux variations et sa simplicité. La logique floue est composée de plusieurs règles déterminées soit par une étude hors ligne comme la programmation dynamique ou par expertise. Néanmoins, l'accumule de plusieurs variables dans le problème à optimiser rend difficile le calcul et son implementation en temps réel sera aussi plus compliquée [46].

## ANNEXE C

### MODÉLISATION DE LA BATTERIE

#### C.1 Introduction

Dans cette annexe, on présente la modélisation et les résultats de simulation d'un nouveau modèle de batterie au lithium-ion. Le modèle élaboré est simple et peut être implémenté dans le simulateur du véhicule électrique étudié. Il décrit plus adéquatement le comportement de la batterie utilisée comme source d'énergie dans un véhicule électrique ou hybride au cours d'un parcours routier. La température et le nombre de cycle de vie de la batterie sont considérés.

Cette annexe est structurée en quatre sections. La section C.2 expose l'état de l'art de la modélisation thermique des batteries. La section C.3 aborde le modèle standard de la batterie. La section C.4 décrit le modèle proposé de la batterie. Dans cette section, on développe le nouveau modèle de la batterie en insérant les équations de la température et de la durée de vie. La section C.5 présente les résultats de simulation de ce modèle, et on termine par une conclusion.

#### C.2 État de l'art sur la modélisation de la batterie

Dans les véhicules électriques à pile à combustible, la batterie lithium-ion est utilisée en tant que source d'énergie secondaire. Elle sert à épauler la pile à combustible lors des accélérations et peut être chargée par la pile à combustible ou par récupération de l'énergie des freinages ou de descentes lors d'un parcours routier. Surchargée ou déchargée profon-

dément, la batterie peut être endommagée et sa durée de vie diminue considérablement. De plus, la température interne affecte la durée de vie de la batterie qui peuvent subir des graves dommages si elle est exposée à des températures supérieures à celles autorisées par le constructeur. La référence [98] propose un modèle de batterie qui est capable de simuler les effets de la température sur le comportement de la batterie. La référence [99] compare trois modèles classiques de batteries dédiées aux véhicules électriques. Il a été montré que la température ambiante affecte la durée de vie de la batterie. La référence [100] propose un modèle thermique pour une batterie de LIPO<sup>1</sup> capable de prédire son comportement. Les résultats de cette modélisation implémentée sur Simulink sont comparés avec les essais expérimentaux. La référence [101] présente une relation entre l'état de charge estimé de la batterie et la température. Dans la référence [102], le comportement en trois dimensions d'un modèle d'une batterie lithium-ion polymère a été exposé ; ce modèle est utile pour prédire la performance thermique de la batterie lors d'un parcours routier. La référence [103] a proposé l'exploitation des processus de transfert et de production de chaleur thermique. Cette méthode est générique et indépendante de la composition chimique de la cellule et de la conception de la batterie.

Les constructeurs définissent l'intervalle de température de fonctionnement optimale entre 0 °C et 25 °C pour améliorer la durée de vie de la batterie. Le modèle actuel de la batterie disponible dans l'environnement MATLAB/Simulink est un modèle standard qui fonctionne à une température fixe de 25 °C. Cela correspond à l'état idéal de la batterie. Au repos  $t = 0s$ , la température de la batterie est égale à la température ambiante, mais lors du fonctionnement de la batterie en temps réel, la température de la batterie augmente en fonction de l'utilisation ou de la durée de fonctionnement (la charge ou la décharge). Or, il a été démontré que ce phénomène affecte la durée de vie et détériore la qualité de la batterie si la température est hors de la plage autorisée par le fabricant. Dans ce cas, la connaissance de ces paramètres (température, cycle de vie) est importante pour les inclure dans le modèle de la batterie utilisée dans le système du véhicule électrique. Dans cette

---

1. LIPO Batteries Lithium-POLymère

annexe, un nouveau modèle simple de la batterie est élaboré et simulé à des températures différentes. L'intérêt de ce modèle est d'étudier la capacité et le comportement de la batterie sur une large plage de température de fonctionnement et d'améliorer sa durée de vie. Ce modèle peut être inséré dans le système de traction des véhicules électriques [104].

### C.3 Modèle standard de la batterie

La batterie est une pile électrochimique qui transforme l'énergie chimique en énergie électrique. L'avantage d'utiliser des batteries dans des véhicules électriques est qu'elles ont une densité d'énergie élevée par rapport à la pile à combustible. Toutefois, sa charge et son recyclage sont encore problématiques. Différents types de batteries sont utilisés dans les véhicules électriques. Cette étude concerne uniquement les batteries lithium-ion en raison de leur performance par rapport aux autres types de batteries et leur large utilisation en transport. En partant du modèle dynamique de la batterie disponible dans la librairie SimPowerSystems de l'environnement MATLAB, on va élaborer et valider ce nouveau modèle.

La figure C.1 montre le circuit équivalent simplifié d'une batterie. Il est composé d'une résistance interne et d'une source de tension variable  $V_{oc}$ . Le paramètre  $V_{oc}$  peut être calculé en utilisant deux équations différentes [105]. Si le courant aux basses fréquences est positif, alors la batterie est en mode décharge et  $V_{oc} = V_{Discharge}$ , comme décrit dans l'équation (C.1). Par contre, si le courant à basse fréquence est négatif, alors la batterie est en mode charge et  $V_{oc} = V_{Charge}$ , tel que calculé par l'équation (C.2).

$$V_{Discharge} = V_0 - \frac{K Q_{max}}{Q_{max} - q} i^* - \frac{K Q_{max}}{Q_{max} - q} q + Ae^{-Bq} \quad (C.1)$$

$$V_{Charge} = V_0 - \frac{K Q_{max}}{0.1Q_{max} - q} i^* - \frac{K Q_{max}}{Q_{max} - q} q + Ae^{-Bq} \quad (C.2)$$

où  $Q_{max}$  est la capacité maximale en (Ah),  $V_0$  est une tension constante en (V),  $A$  repré-

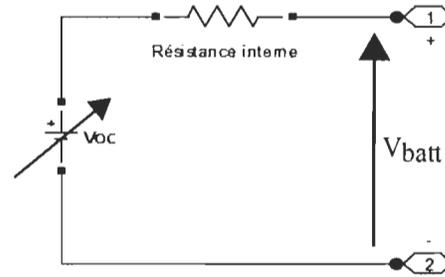


Figure C.1 Circuit équivalent simplifié d'une batterie

sente la tension exponentielle en ( $V$ ),  $B$  est la capacité exponentielle en  $(Ah)^{-1}$ ,  $q = it$ , est la capacité instantanée ( $Ah$ ) et  $K$  est la polarisation constante  $(Ah)^{-1}$ .

L'état de charge de la batterie  $SOC$  s'exprime comme suit :

$$SOC_{Batt} = 100 \left( 1 - \frac{\int i(t) dt}{Q_{max}} \right) \quad (C.3)$$

#### C.4 Modèle proposé de la batterie

Le nouveau circuit équivalent d'une batterie est aussi composé d'une résistance interne et d'une source de tension  $V_{oc}$ . Toutefois, le paramètre  $V_{oc}$  est déterminé par deux équations données dans la référence [105]. Ces deux équations sont modifiées dans cette annexe pour inclure la durée de vie et l'effet de la température. L'équation (C.4) présente la capacité disponible. Elle dépend du nombre de cycle de vie et implicitement de la température de la batterie.

$$q(t) = \alpha \beta it \quad (C.4)$$

où  $\alpha$  est un facteur lié à la capacité de la batterie. Ce facteur dépend de la température de la batterie tel que décrit par la figure C.2, et  $\beta$  est un facteur lié à la capacité de la batterie et qui dépend de sa durée de vie comme l'illustre la figure C.3. La référence [105] donne

une relation entre la température, le nombre de cycle de vie et la capacité de la batterie.

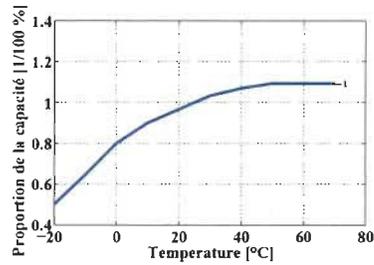


Figure C.2 Effet de la température de la batterie lithium-ion sur  $\alpha$

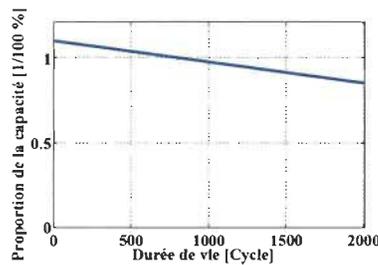


Figure C.3 Effet de la durée de vie de la batterie lithium-ion sur  $\beta$

La figure C.4 montre, qu'entre les températures 0 °C et 25 °C, la durée de vie de la batterie est au maximum, et lorsque la température de la batterie diminue au-dessous de 0 °C ou augmente en dessus de 25 °C, la durée de vie de la batterie diminue [99], [105].

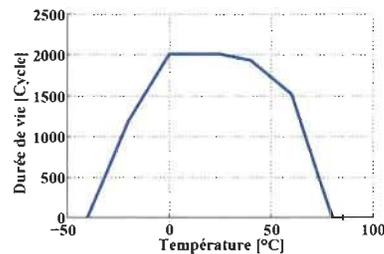


Figure C.4 Effet de la température sur la durée de vie de la batterie lithium-ion

L'équation du nombre de cycle de vie est modélisée dans l'environnement MAT-

LAB/Simulink, comme le montre la figure C.5. Une table (lookup table) est utilisée dans

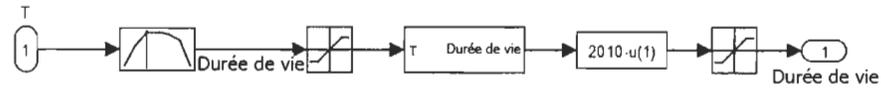


Figure C.5 Bloc de calcul du cycle de vie de la batterie

ce modèle pour tenir compte de l'effet de la température sur le cycle de vie de la batterie (Fig.C.4). La figure C.6 illustre le bloc de calcul de la capacité disponible de la batterie décrite par l'équation (C.4). Le modèle de température de la batterie est exprimé par

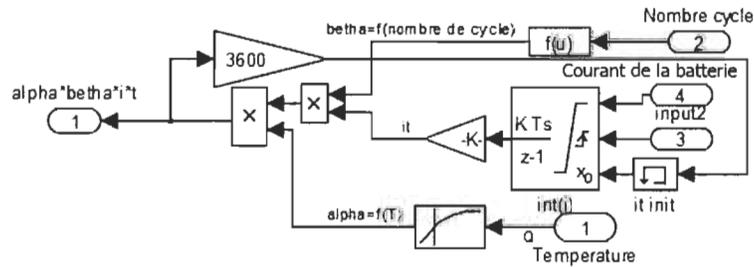


Figure C.6 Bloc de calcul de la capacité disponible de la batterie

l'équation (C.5). Elle dépend de la température ambiante et des composantes thermiques de la batterie [100], [101].

$$T_{Batt} = T_a + \frac{1}{C_{th}} \int (|V_{oc} - B_{Batt}| I_{Batt} - \frac{T_{Batt} - T_a}{R_{th}}) \quad (C.5)$$

où  $T_a$  est la température ambiante,  $C_{th}$  est la capacité calorifique et  $R_{th}$  est la résistance thermique de la batterie.

La figure C.7 montre le bloc du modèle Simulink utilisé pour implémenter l'équation (C.5).

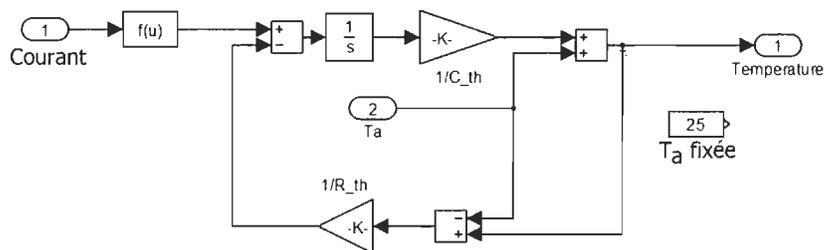


Figure C.7 Bloc de calcul de la température de la batterie

La figure C.8 montre le nouveau modèle de la batterie regroupant tous les blocs cités précédemment.

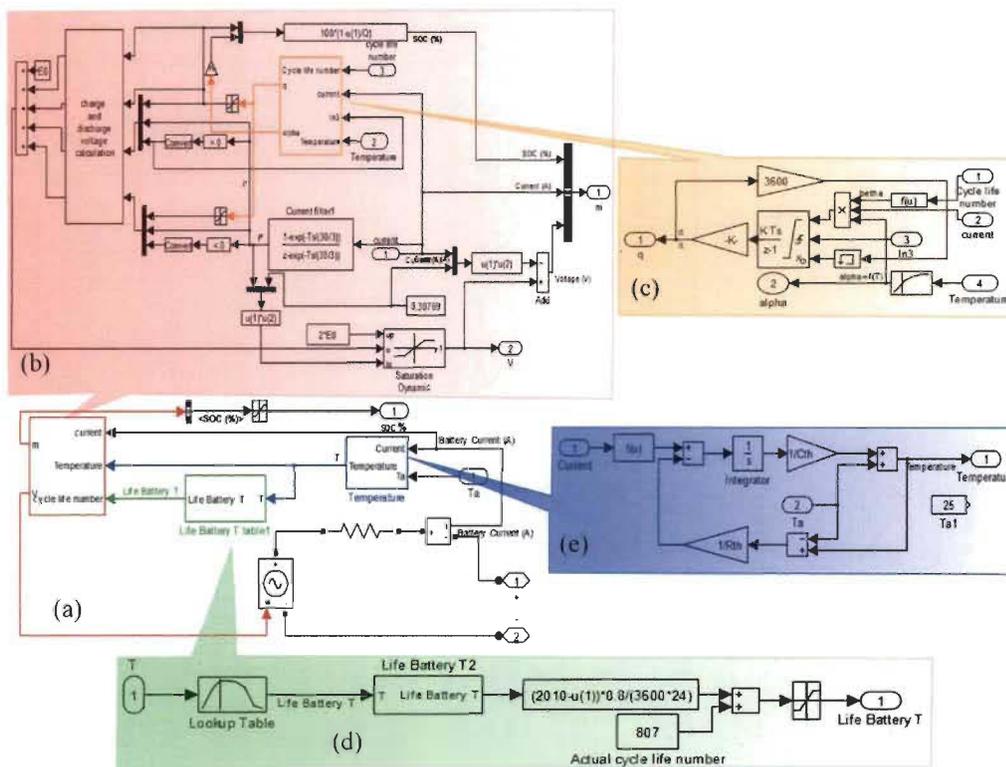


Figure C.8 Nouveau modèle de la batterie

## C.5 Présentation et l'analyse des résultats de simulation

Dans cette annexe, un modèle de batterie simulant le processus de charge et de décharge est utilisé. Ce modèle est modélisé dans l'environnement MATLAB / Simulink. La figure C.9 montre le schéma Simulink utilisé pour valider et comparer le comportement du nouveau modèle avec le modèle standard de la batterie.

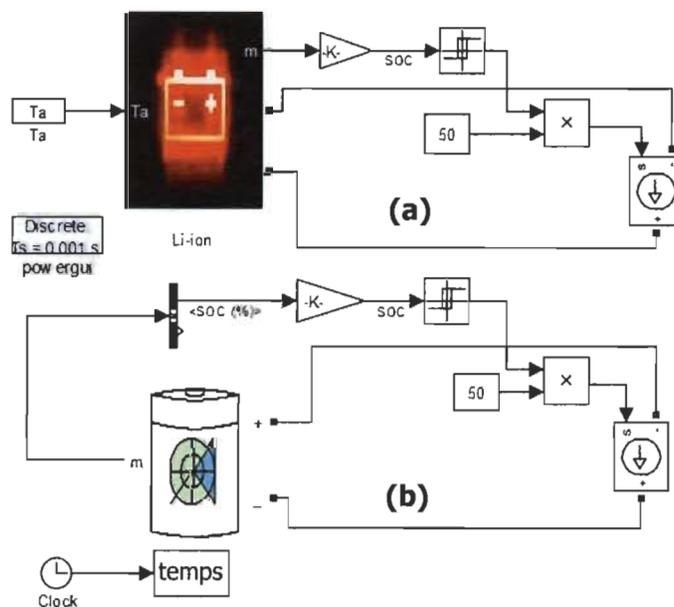


Figure C.9 Schéma Simulink du deux modèles de la batterie (a) nouveau modèle (b) ancien modèle

### C.5.1 Effet de la température

La batterie Li-ion de  $6.5 \text{ Ah}$ ,  $200 \text{ V}$  est modélisée et connectée à une charge de type source de courant constante de  $50 \text{ A}$  pour la première simulation. Pour la deuxième simulation, la batterie est connectée à une charge de type source de courant variable de  $50 \pm \varepsilon \text{ A}$ . Dans les deux cas, la charge fonctionne dans la plage de l'état de charge de la batterie  $SOC \in [SOC_{min}, SOC_{max}]$ . Si l'état de charge de la batterie est inférieur à  $SOC_{min}$ , la

batterie est chargée par un courant de  $-50$  A. Lorsque le  $SOC$  de la batterie est égal à  $SOC_{max}$ , la batterie doit être déchargée. Les simulations utilisent des températures ambiantes comprises entre  $-20$  °C et  $60$  °C. La température de la batterie calculée par le nouveau modèle est comparée avec la valeur donnée par le modèle standard dans laquelle la température de la batterie est fixée à  $25$  °C.

Figure C.10 montre les formes d'onde de l'état de décharge, du courant et de la tension aux bornes de la batterie lorsque la température est fixée à  $25$  °C. Les courbes de la figure C.10.(a) sont issues du nouveau modèle de la batterie, et celles de la figure C.10.(b) sont issues du modèle standard. Le modèle de batterie standard et le nouveau modèle sont fixés à  $25$  °C cela implique que les paramètres  $\alpha = \beta = 1$ .

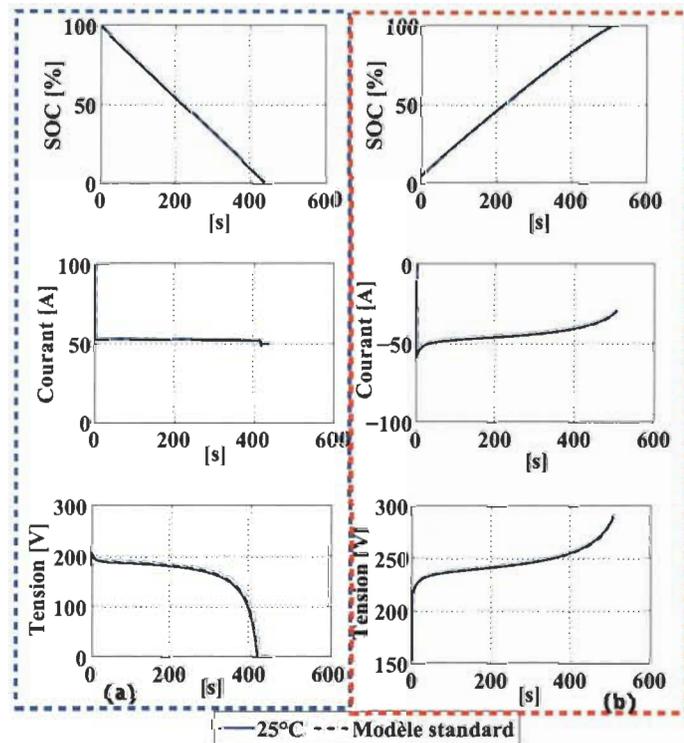


Figure C.10 Résultats du nouveau modèle dynamique et du modèle standard à  $25$  °C de la batterie à (a)  $SOC_0 = 100\%$  et (b)  $SOC_0 = 5\%$

Dans le cas du modèle standard, la température de la batterie est fixé à 25 °C, et sa performance est égale à 100 % de sa capacité totale. Ainsi, les deux facteurs  $\alpha$  et  $\beta$  sont égales à 1. Cette valeur du facteur  $\beta$  correspond à un cycle de vie de la batterie de 807. Pour comparer ce modèle à l'autre, la température est fixée comme représenté sur la figure C.8.(e) une constante.

La figure C.11 montre les résultats du nouveau modèle et du modèle standard de la batterie avec une charge variable. La comparaison de résultats indique que le nouveau modèle a un comportement identique à celui du modèle standard. Or, en fonctionnement réel, la température augmente en charge et décharge.

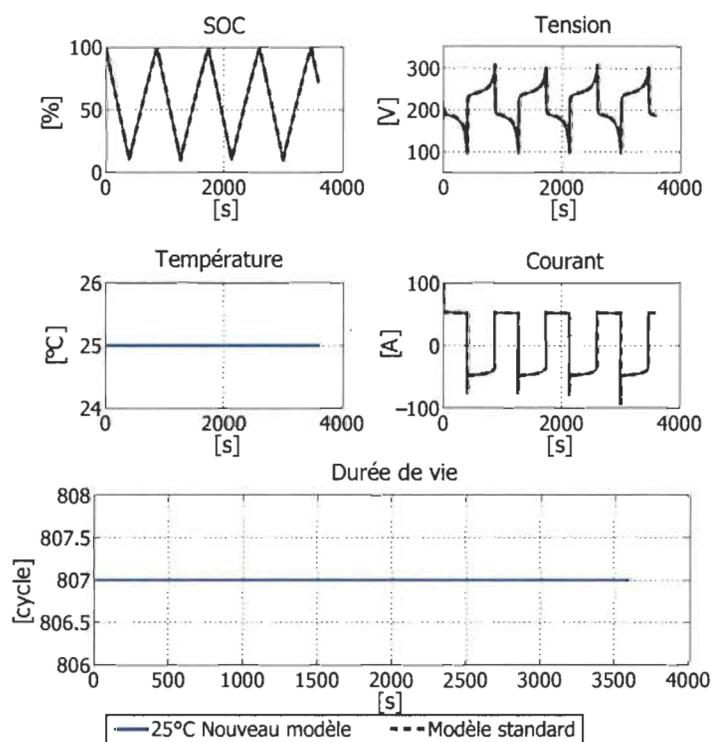
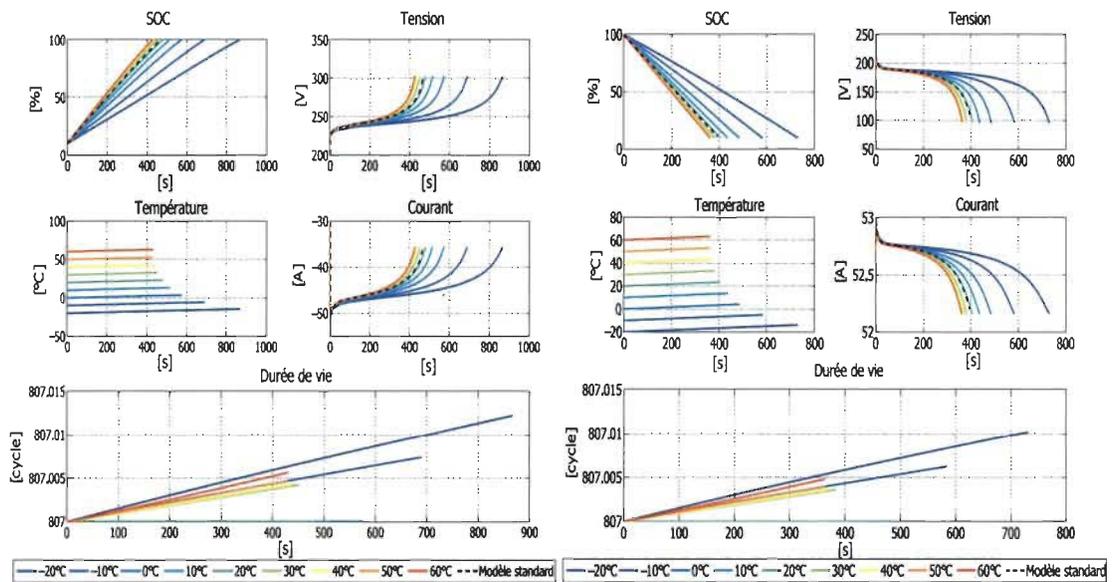


Figure C.11 Résultats du nouveau modèle dynamique et du modèle standard à 25 °C et sur une période de 3600s

La figure C.12 illustre l'effet de la température sur le fonctionnement de la batterie en

mode charge (C.12.(a)) et de décharge (C.12.(b)) avec une charge constante. On constate que la tension et le courant du modèle standard dans lequel la température et la durée de vie de la batterie ne sont pas incluses, ne sont pas affectés par les variations de température pendant le fonctionnement de la batterie. Par contre, le nouveau modèle reflète mieux le comportement dynamique de la batterie. Quand la nature du courant et la tension changent, la température et la durée de vie de la batterie augmentent.



(a)

(b)

Figure C.12 Résultats du nouveau modèle dynamique de la batterie et les résultats du modèle standard en mode (a) charge et (b) décharge

La figure C.13 illustre le comportement de la batterie à des différentes températures ambiantes avec une charge variable pendant 3600 s. La figure C.13.(a) représente le comportement de la batterie en mode charge avec  $SOC_0 = 10\%$  et la figure C.13.(b) celui en mode décharge avec  $SOC_0 = 100\%$ . L'état de charge de la batterie est maintenu borné entre 10% et 100% au cours de cette simulation. Le nouveau modèle reflète mieux les effets de la température sur la tension, le courant et le cycle de vie.

Dans les figures C.12 et C.13, la température de la batterie qui se situe entre 0 °C et

25 °C augmente sans aucun impact sur la durée de vie de la batterie. Si la température de la batterie augmente et dépasse 25 °C ou diminue sous 0 °C, le cycle de vie est alors affectée. En outre, si la température de la batterie est sous 0 °C et augmente pendant le fonctionnement de la batterie, le cycle de vie est affectée jusqu'à ce que la température atteigne la température idéale (entre 0 °C et 25 °C). Ces figures montrent également que le temps de charge et de décharge de batterie lors des températures froides (−20 °C to 0 °C) est faible que celui des températures plus élevées. Pour ces raisons, il est important de contrôler la température de la batterie pour contrôler la décharge et l'efficacité de la charge afin d'améliorer la durée de vie de la batterie. Sachant que la mesure de la durée de vie de la batterie est très difficile (elle peut prendre quelques années), cette étude présente une approximation de la durée vie de la batterie pour souligner l'effet de la température sur le comportement dynamique de la batterie.

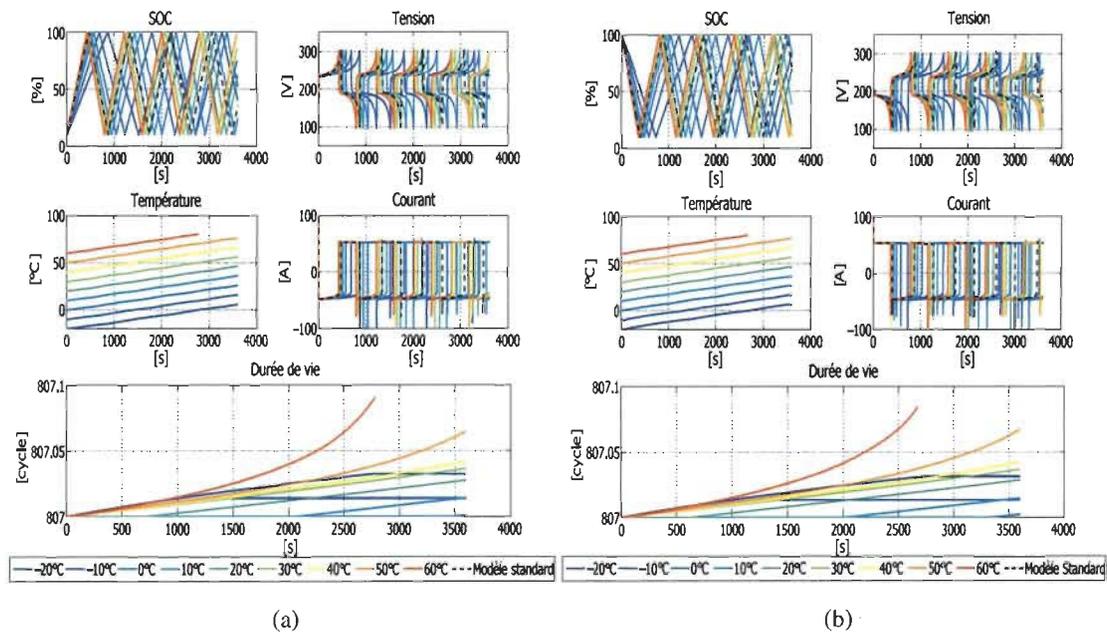


Figure C.13 Résultats de simulation du nouveau modèle dynamique et du modèle standard durant 3600s (a) en mode charge et (b) en mode décharge

### C.5.2 Effet du courant de la charge

La figure C.14.(a) montre les effets de la nature du courant de la charge sur le comportement de la batterie. La courbe bleue dans cette figure représente un fonctionnement réel de la batterie si elle est connectée à un hacheur. En fait, le courant de charge n'est pas constant, comme la courbe rouge, mais plutôt ondulatoire. Ce courant affecte la température, la tension et la nature du courant de la batterie et donc sa durée de vie de la batterie. En outre, la durée de fonctionnement de la batterie est faible dans la courbe bleue par rapport à celle de la courbe rouge. Dans ce test, on arrête la simulation lorsque la température de la batterie dépasse  $70^{\circ}\text{C}$ . À cette température, la batterie peut être endommagée.

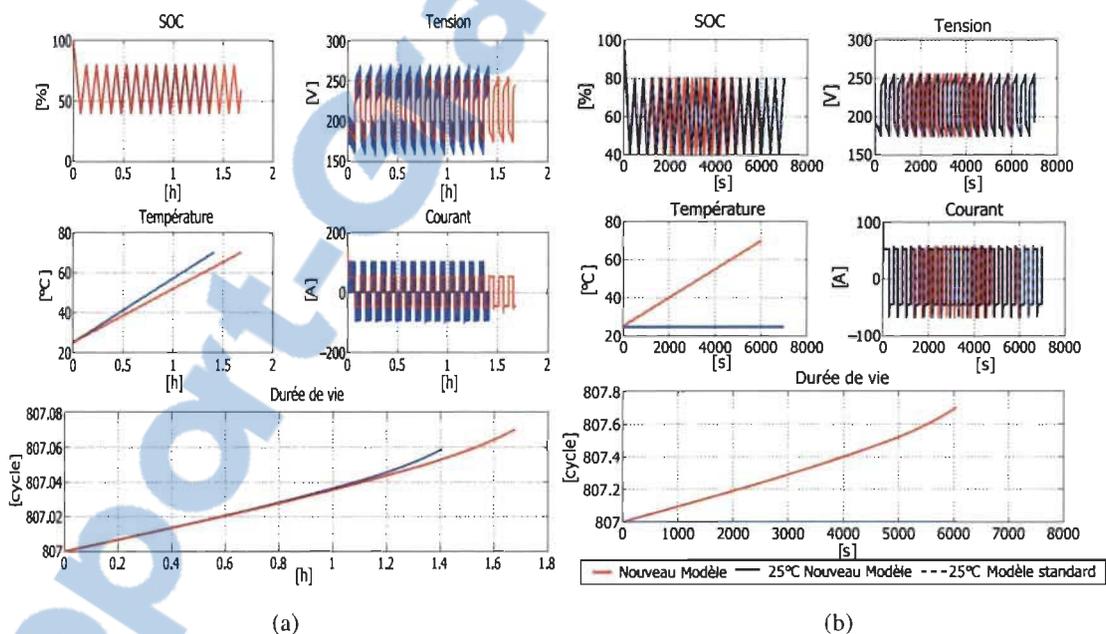


Figure C.14 Effets sur le comportement de la batterie (a) effet du courant de la charge et (b) effet de la température

La figure C.14.(b) donne la comparaison entre trois modèles. Le premier est le nouveau modèle avec le calcul de la température, le second est le nouveau modèle en fixant température à  $25^{\circ}\text{C}$  lors du fonctionnement de la batterie, et le dernier est le modèle standard. La courbe rouge montre que la température influe sur le comportement de la

batterie, lorsque la température augmente, le courant et la tension sont affectés aussi.

La figure C.15 représente une comparaison de la batterie en mode charge (figure C.15.(a)) et en mode décharge (figure C.15.(b)) à une température ambiante  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  pour différents courants de la charge. À un courant de charge égal à  $100\text{ A}$ , la charge et décharge est rapide comparé à celle à  $20\text{ A}$  et par conséquent, la température et la durée de vie augmentent.

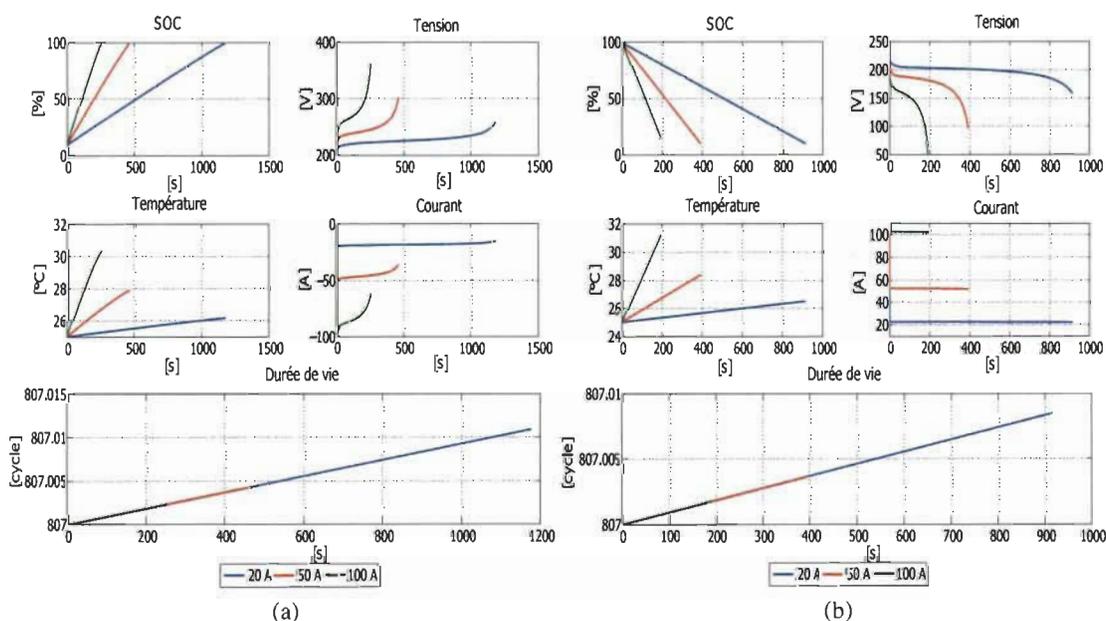


Figure C.15 Effet du courant de la charge sur le comportement de la batterie en mode (a) charge et (b) décharge

### C.5.3 Effet de la durée de vie

La figure C.16 donne l'effet de la durée de vie de la batterie sur son comportement en mode charge comme montré dans la C.16.(a) et en mode décharge comme illustrer sur la figure C.16.(b). Ces figures ont été effectuées à une température ambiante de  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  fixe. On constate que la charge de la batterie et sa décharge est plus rapide lorsque la batterie est neuve ( $0\text{ cycle}$ ).

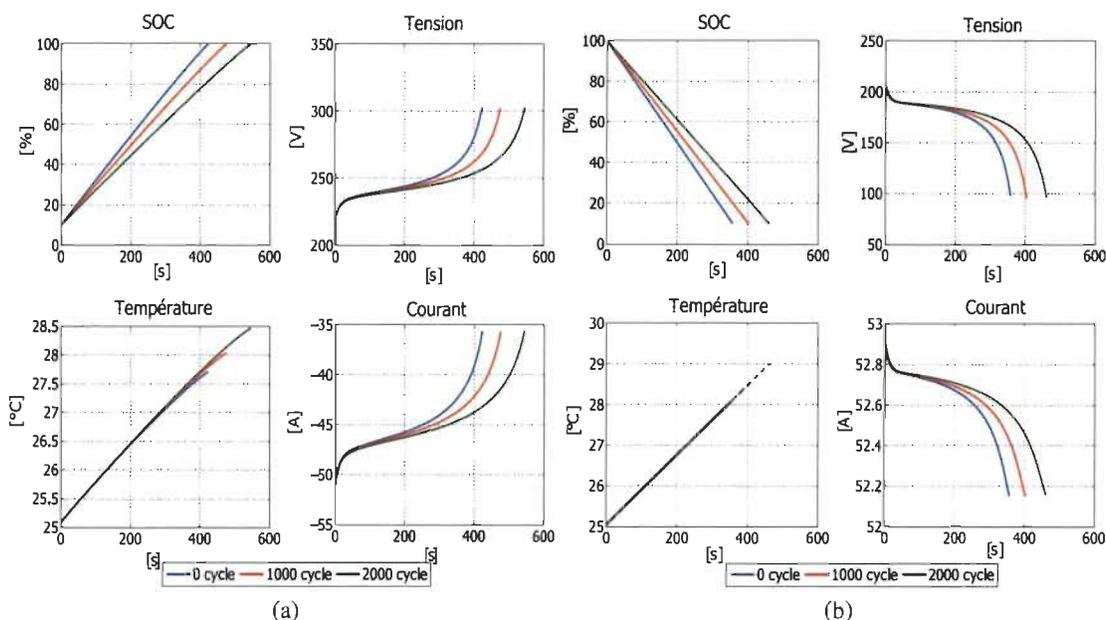


Figure C.16 Effet de la durée de vie de la batterie sur son fonctionnement en mode (a) charge et (b) décharge

## C.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté un modèle simple de la batterie. Ce modèle décrit le comportement de la batterie à des différentes températures et simule également les effets de variation de charge sur le comportement électrique et thermique de la batterie. À basse température, les résultats de simulation confirment que la batterie est lente pour se décharger et se charger. En revanche, pour les températures plus élevées, la charge et décharge sont rapides. Dans des conditions extrêmes de température, la durée de vie de la batterie diminue et des dommages graves à la batterie peuvent se produire. La température de fonctionnement idéale est de l'ordre de  $0^{\circ}\text{C}$  à  $25^{\circ}\text{C}$ . Il est connu par des recherches et les fabricants de batteries. En maintenant la température de la batterie dans cette gamme de température idéale, la durée de vie de la batterie peut être améliorée, en augmentant ainsi son efficacité et sa protection contre des dommages irréparables.

## ANNEXE D

## QUELQUES PRISES D'ÉCRAN DU SIMULATEUR UTILISÉ

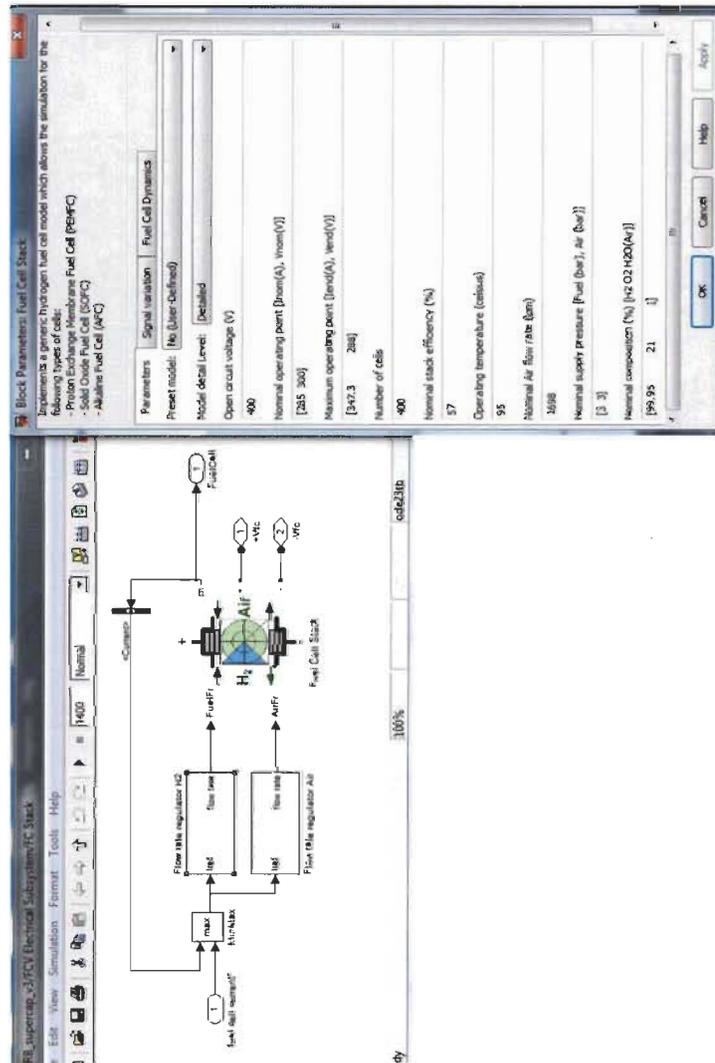


Figure D.1 Paramètres de la pile à combustible utilisée [39]









Block Parameters: 13.9 Ah 288 V Battery

Battery (mask)

Implements a generic battery that model most popular battery types. Uncheck the "Use parameters based on Battery type and nominal values" parameter to edit the discharge characteristics.

Parameters: View Discharge Characteristics Battery Dynamics

Battery type: Lithium-Ion

Nominal Voltage (V): 288

Rated Capacity (Ah): 13.9

Initial State-Of-Charge (%): 60

Use parameters based on Battery type and nominal values

Maximum Capacity (Ah): 13.9

Fully Charged Voltage (V): 335.2283

Nominal Discharge Current (A): 6.0425

Internal Resistance (Ohms): 0.20719

Capacity (Ah) @ Nominal Voltage: 13.5704

Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)]: [311.1511 0.682913]

OK Cancel Help Apply

Figure D.6 Paramètres de la batterie utilisée [39]

**ANNEXE E****SUPERCONDENSATEUR**

**FEATURES AND BENEFITS\***

- Up to 1,000,000 duty cycles or 10 year DC life
- 16V DC working voltage
- Resistive or active cell balancing available
- Temperature output
- Overvoltage outputs available
- High power density
- Compact, rugged, fully enclosed splash-proof design

**TYPICAL APPLICATIONS**

- Wind turbine pitch control
- Transportation
- Heavy industrial equipment
- UPS systems



**PRODUCT SPECIFICATIONS**

ELECTRICAL	BMOD0500 P016 B01	BMOD0500 P016 B02
Rated Capacitance <sup>1</sup>	500 F	500 F
Minimum Capacitance, initial <sup>1</sup>	500 F	500F
Maximum Capacitance, initial <sup>1</sup>	600 F	600 F
Maximum ESR <sub>DC</sub> , initial <sup>1</sup>	2.1 mΩ	2.1 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR <sub>DC</sub> <sup>1</sup>	100 A	100 A
Rated Voltage	16 V	16 V
Absolute Maximum Voltage <sup>2</sup>	17 V	17 V
Absolute Maximum Current	1,900 A	1,900 A
Leakage Current at 25°C, maximum (B01 Suffix - VMS 2.0) <sup>3</sup>	5.2 mA	N/A
Leakage Current at 25°C, maximum (B02 Suffix - Passive Balancing) <sup>3</sup>	N/A	170 mA
Maximum Series Voltage	750 V	750 V
Capacitance of Individual Cells <sup>11</sup>	3,000 F	3,000 F
Maximum Stored Energy, Individual Cell <sup>11</sup>	3.0 Wh	3.0 Wh
Number of Cells	6	6

**TEMPERATURE**

Operating Temperature (Cell Case Temperature)		
Minimum	-40°C	-40°C
Maximum	65°C	65°C
Storage Temperature (Stored Uncharged)		
Minimum	-40°C	-40°C
Maximum	70°C	70°C

\*Results may vary. Additional terms and conditions, including the limited warranty, apply at the time of purchase. See the warranty details for applicable operating and use requirements.

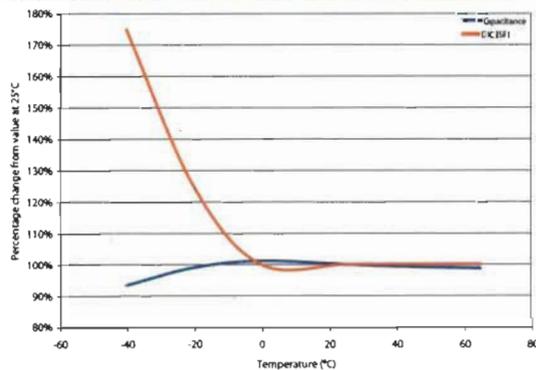
## PRODUCT SPECIFICATIONS (Cont'd)

PHYSICAL	BMOD0500 P016 B01	BMOD0500 P016 B02
Mass, typical	5.5 kg	5.5 kg
Power Terminals	M8/M10	M8/M10
Recommended Torque - Terminal	20/30 Nm	20/30 Nm
Vibration Specification	SAE J2380	SAE J2380
Shock Specification	SAE J2464	SAE J2464
Environmental Protection	IP65	IP65
Cooling	Natural Convection	Natural Convection
MONITORING / CELL VOLTAGE MANAGEMENT		
Internal Temperature Sensor	NTC Thermistor	NTC Thermistor
Temperature Interface	Analog	Analog
Cell Voltage Monitoring	Overvoltage Alarm	N/A
Connector	Deutsch DTM	Deutsch DTM
Cell Voltage Management	VMS 2.0	Passive
POWER & ENERGY		
Usable Specific Power, $P_d^4$	2,700 W/kg	2,700 W/kg
Impedance Match Specific Power, $P_{max}^5$	5,500 W/kg	5,500 W/kg
Specific Energy, $E_{max}^6$	3.2 Wh/kg	3.2 Wh/kg
Stored Energy, $E_{stored}^7$	18 Wh	18 Wh
SAFETY		
Short Circuit Current, typical (Current possible with short circuit from rated voltage. Do not use as an operating current.)	7,600 A	7,600 A
Certifications	RoHS, UL810a (150 V)	RoHS, UL810a (150 V)
High-Pot Capability <sup>12</sup>	2,500 VDC	2,500 VDC

TYPICAL CHARACTERISTICS

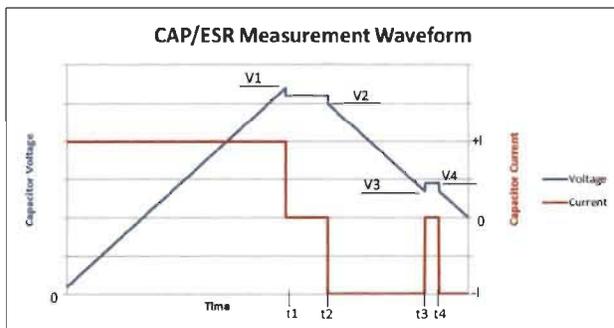
THERMAL CHARACTERISTICS	BMOD0500 P016 B01	BMOD0500 P016 B02
Thermal Resistance ( $R_{ca}$ , All Cell Cases to Ambient), typical <sup>a</sup>	0.70°C/W	0.70°C/W
Thermal Capacitance ( $C_{in}$ ), typical	4,300 J/°C	4,300 J/°C
Maximum Continuous Current ( $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ ) <sup>b</sup>	100 A <sub>RMS</sub>	100 A <sub>RMS</sub>
Maximum Continuous Current ( $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ ) <sup>b</sup>	160 A <sub>RMS</sub>	160 A <sub>RMS</sub>
LIFE		
DC Life at High Temperature <sup>1</sup> (held continuously at Rated Voltage & Maximum Operating Temperature)	1,500 hours	1,500 hours
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	20%	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	100%	100%
Projected DC Life at 25°C <sup>1</sup> (held continuously at Rated Voltage)	10 years	10 years
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	20%	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	100%	100%
Projected Cycle Life at 25°C <sup>1,9,10</sup>	1,000,000 cycles	1,000,000 cycles
Capacitance Change (% decrease from minimum initial value)	20%	20%
ESR Change (% increase from maximum initial value)	100%	100%
Test Current	100 A	100 A
Shelf Life (Stored uncharged at 25°C)	4 years	4 years

ESR AND CAPACITANCE VS TEMPERATURE

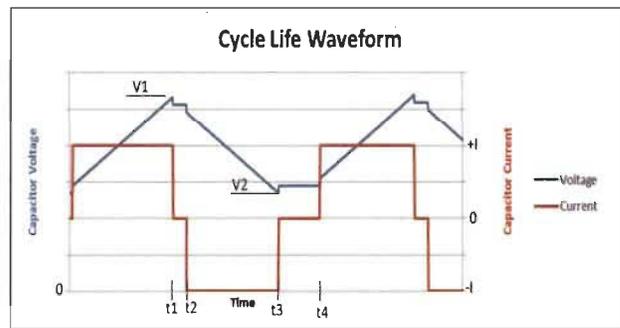


NOTES

1. Capacitance and  $ESR_{DC}$  measured at 25°C using specified test current per waveform below.
2. Absolute maximum voltage, non-repeated. Not to exceed 1 second.
3. After 72 hours at rated voltage. Initial leakage current can be higher.
4. Per IEC 62391-2,  $P_d = \frac{0.12V^2}{ESR_{DC} \times \text{mass}}$
5.  $P_{max} = \frac{V^2}{4 \times ESR_{DC} \times \text{mass}}$
6.  $E_{max} = \frac{1/2 CV^2}{3,600 \times \text{mass}}$
7.  $E_{stored} = \frac{1/2 CV^2}{3,600}$
8.  $\Delta T = I_{RMS}^2 \times ESR \times R_{ca}$
9. Cycle using specified test current per waveform below.
10. Cycle life varies depending upon application-specific characteristics. Actual results will vary.
11. Per United Nations material classification UN3499, all Maxwell ultracapacitors have less than 10 Wh capacity to meet the requirements of Special Provisions 361. Both individual ultracapacitors and modules composed of those ultracapacitors shipped by Maxwell can be transported without being treated as dangerous goods (hazardous materials) under transportation regulations.
12. Duration = 60 seconds. Not intended as an operating parameter.



$V1 = V_{rated}$        $t2 - t1 = 15 \text{ seconds}$        $Capacitance = I \times (t3 - t2) / (V2 - V3)$   
 $V3 = 0.5 \times V_{rated}$        $t4 - t3 = 5 \text{ seconds}$        $ESR = (V4 - V3) / I$



$V1 = V_{rated}$        $t2 - t1 = 5 \text{ seconds (I=0)}$   
 $V2 = 0.5 \times V_{rated}$        $t4 - t3 = 15 \text{ seconds (I=0)}$

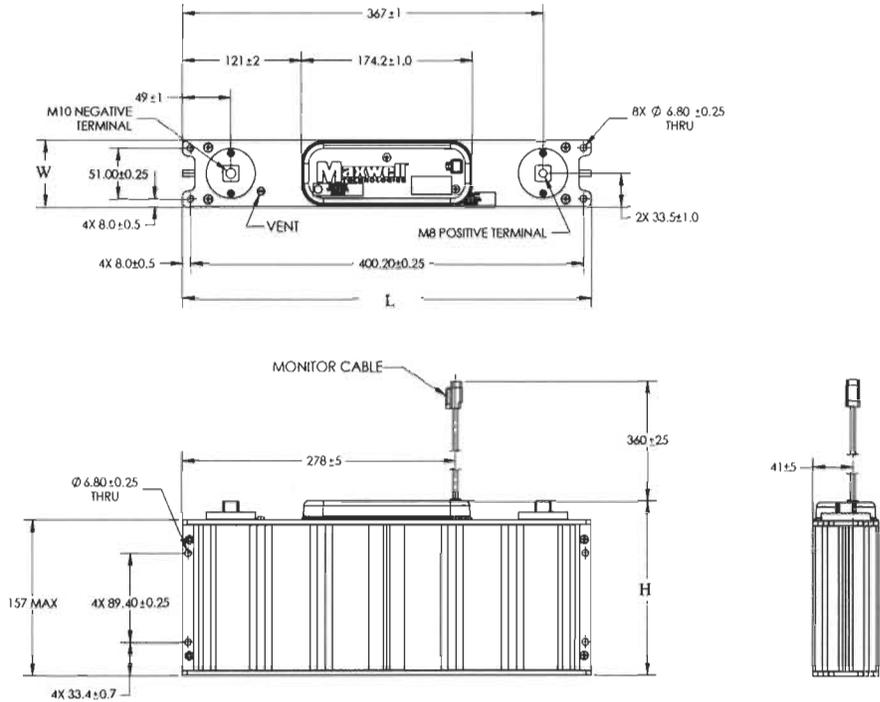
MOUNTING RECOMMENDATIONS

Please refer to the user manual for installation recommendations.

MARKINGS

Products are marked with the following information: Rated capacitance, rated voltage, product number, name of manufacturer, positive and negative terminal, warning marking, serial number.

**BMOD0500 P016 B0X**



Part Description	Dimensions (mm)			Package Quantity
	L (max)	W (max)	H (max)	
BMOD0500 P016 B01/B02	418	68	179	3

Product dimensions are for reference only unless otherwise identified. Product dimensions and specifications may change without notice. Please contact Maxwell Technologies directly for any technical specifications critical to application. All products featured on this datasheet are covered by the following U.S. patents and their respective foreign counterparts: 6643119, 7295423, 7342770, 7352558, 7384433, 7440258, 7492571, 7508651, 7580243, 7791860, 7791861, 7816891, 7859826, 7883553, 7935155, 8072734, 8098481, 8279580, and patents pending.



**Maxwell Technologies, Inc.**  
**Global Headquarters**  
 3888 Calle Fortunada  
 San Diego, CA 92123  
 USA  
 Tel: +1 858 503 3300  
 Fax: +1 858 503 3301



**Maxwell Technologies SA**  
 Route de Montena 65  
 CH-1728 Rossens  
 Switzerland  
 Tel: +41 (0)26 411 85 00  
 Fax: +41 (0)26 411 85 05



**Maxwell Technologies, GmbH**  
 Leopoldstrasse 244  
 80807 München  
 Germany  
 Tel: +49 (0)89 / 4161403 0  
 Fax: +49 (0)89 / 4161403 99



**Maxwell Technologies, Inc.**  
**Shanghai Trading Co. Ltd.**  
 Unit A2.C 12th Floor  
 Huarun Times Square  
 500 Zhangyang Road,  
 Pudong New Area  
 Shanghai 200122,  
 P.R. China  
 Phone: +86 21 3852 4000  
 Fax: +86 21 3852 4099



**Maxwell Technologies Korea Co., Ltd.**  
 Room 1524, D-Cube City  
 Office Tower, 15F #662  
 Gyeongin-Ro, Guro-Gu,  
 Seoul, 152-706  
 South Korea  
 Phone: +82 10 4518 9829

MAXWELL TECHNOLOGIES, MAXWELL, MAXWELL CERTIFIED INTEGRATOR, ENABLING ENERGY'S FUTURE, BOOSTCAP, C CELL, D CELL and their respective designs and/or logos are either trademarks or registered trademarks of Maxwell Technologies, Inc. and may not be copied, limited or used, in whole or in part, without the prior written permission Maxwell Technologies, Inc. All contents copyright © 2014 Maxwell Technologies, Inc. All rights reserved. No portion of these materials may be reproduced in any form, or by any means, without prior written permission from Maxwell Technologies, Inc.



## ANNEXE F

**MODÉLISATION DE LA MACHINE SYNCHRONNE À AIMANTS  
PERMANENTS**

Une machine synchrone à aimants permanents possède trois enroulements statoriques fixes, a, b, et c. Les aimants au rotor imposent un flux à vide constant.

### F.1 Modèle abc de la machine synchrone

#### F.1.1 Flux statorique et rotorique

Les flux statoriques dans le repère  $(a, b, c)$ , sont représentés en fonction des courants statoriques dans les équations F.1 [106].

$$\Psi(\theta) = \Psi_0(\theta) + L(\theta)I \quad (\text{F.1})$$

avec  $\theta$  est la position mécanique du rotor.  $L$  est les inductances propres et mutuelles des enroulements statoriques.

$\Psi = \begin{pmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{pmatrix}$  est les flux induits dans les enroulements statoriques par les aimants.

$I = \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix}$  est les courants dans les enroulements statoriques.

$\Psi_0 = \begin{pmatrix} \psi_{a0} \\ \psi_{b0} \\ \psi_{c0} \end{pmatrix}$  est les flux induits dans les enroulements statoriques par les aimants à l'origine du rotor.

### F.1.2 Équation des tensions statoriques et rotoriques

L'équation des tensions statoriques en fonction des courants et les flux est :

$$V = \begin{pmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{pmatrix} = RI + \frac{d\Psi}{dt} \quad (\text{F.2})$$

### F.1.3 Matrice des inductances

La matrice des inductances propres et mutuelles des enroulements statoriques  $L$  est en fonction de la position du rotor.

$$L = L_0 + L_2(\theta) \quad (\text{F.3})$$

avec :

$L_0$  : une matrice constante

$$L_0 = \begin{bmatrix} L_0 & M_0 & M_0 \\ M_0 & L_0 & M_0 \\ M_0 & M_0 & L_0 \end{bmatrix} \quad (\text{F.4})$$

$L_2(\theta)$  : est en fonction de  $2p_1\theta$ , avec  $\theta$  la position mécanique du rotor.

$$L_2(\theta) = L_{s2} \begin{bmatrix} \cos(2p_1\theta) & \cos(2p_1\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2p_1\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2p_1\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2p_1\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2p_1\theta) \\ \cos(2p_1\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2p_1\theta) & \cos(2p_1\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{F.5})$$

$L_0$ ,  $M_0$ , et  $L_{s2}$  sont des inductance mutuelles constantes.

## F.2 Transformation de Clarke

La transformation de Clarke est utilisée pour un passage d'un système triphasé à un système diphasé. Cette transformation est assurée par une la matrice de passage  $C_{32}$ , et l'inverse par la matrice  $C_{23}$ .

$$x_3 = C_{32}x_2 \quad (\text{F.6})$$

$$C_{32} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{F.7})$$

$$C_{23} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{F.8})$$

On passe du repère  $(a, b, c)$ , au repère  $(\alpha, \beta)$  par le transformation de Clarke.

$$V_{2s} = R_s I_{2s} + \frac{d}{dt} \Psi_{2s} \quad (\text{F.9})$$

$$\Psi_{2s} = L_{cs} I_{2s} + L_{22}(\theta) I_{2s} + \Psi_{2s0} \quad (\text{F.10})$$

avec

$$L_{cs} = L_{s0} - M_{s0} \quad (\text{F.11})$$

$$L_{22}(\theta) = \frac{3}{2}L_{s2} \begin{bmatrix} \cos 2p_1\theta & \sin 2p_1\theta \\ \sin 2p_1\theta & \cos 2p_1\theta \end{bmatrix} \quad (\text{F.12})$$

### F.3 Transformation de Park

La transformation de Park est utilisée pour le passage d'un repère fixe à un repère tournant (équation.F.15), par la matrice de passage  $P(\xi)$  (équation.F.13), et l'inverse par la matrice  $P(\xi)$  (équation.F.14)

$$P(\xi) = \begin{bmatrix} \cos \xi & -\sin \xi \\ \sin \xi & \cos \xi \end{bmatrix} \quad (\text{F.13})$$

La matrice inverse est

$$P(-\xi) = \begin{bmatrix} \cos \xi & \sin \xi \\ -\sin \xi & \cos \xi \end{bmatrix} \quad (\text{F.14})$$

$$x_2 = P(\xi)x_{dq} \quad (\text{F.15})$$

avec :  $\xi = p_1\theta$ .

Donc :

$$V_{dq} = R_s I_{dq} + \frac{d}{dt} \Psi_{dq} + p_1 \Omega \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \Psi_{dq} \quad (\text{F.16})$$

$$\Psi_{dq} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} I_{dq} + \Psi_{dq0} \quad (\text{F.17})$$

Les inductances statoriques  $L_d$  et  $L_q$  et le flux sont exprimés dans les équations suivantes :

$$\begin{cases} L_d = L_{s0} - M_{s0} + \frac{3}{2}L_{s2} \\ L_q = L_{s0} - M_{s0} - \frac{3}{2}L_{s2} \end{cases} \quad (\text{F.18})$$

$$\Psi_{dq0} = \sqrt{\frac{3}{2}}\psi_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{F.19})$$

Pour les moteurs synchrone à aimants permanent à pôles lisses  $L_q = L_d$ . On pose  $L = L_q = L_d$ .

#### F.4 Expression du couple électromagnétique

Dans le repère  $(d, q)$  de Park, le couple électromagnétique d'une machine synchrone à aimants permanents est représenté par l'équation F.20.

$$C_{em} = \frac{3}{2}p_1(\psi_{d0} - (L_q - L_d)i_d)i_q \quad (\text{F.20})$$

Dans le cas d'une machine à aimants permanents à pôles lisses, le couple s'écrit comme l'équation F.21).

$$C_{em} = \frac{3}{2}p_1\psi_{d0}i_q \quad (\text{F.21})$$

#### F.5 Équation mécanique

L'équation dynamique qui modélise le comportement mécanique de la machine synchrone est donnée par l'équation F.22.

$$J \frac{d}{dt} \Omega = C_{em} - C_r - f_v \Omega \quad (\text{F.22})$$

avec  $J$  est l'inertie de la machine ( $kg.m^2$ ),  $f_v$  est le coefficient de frottement de la machine ( $N$ ) et  $C_r$  le couple résistant ( $N.m$ )

Rapport-Gratuit.com

## ANNEXE G

## RÉSUMÉ DES RÉFÉRENCES CHOISIES

## G.1 Référence 1

## G.1.1 Présentation de l'article 1

La référence [28] propose la modélisation et une stratégie de gestion d'énergie pour un véhicule à supercondensateur connecté à un moteur électrique de 40 kW et un moteur thermique de 160 kW. La figure G.1 donne la configuration du véhicule hybrid avec un supercondensateur.

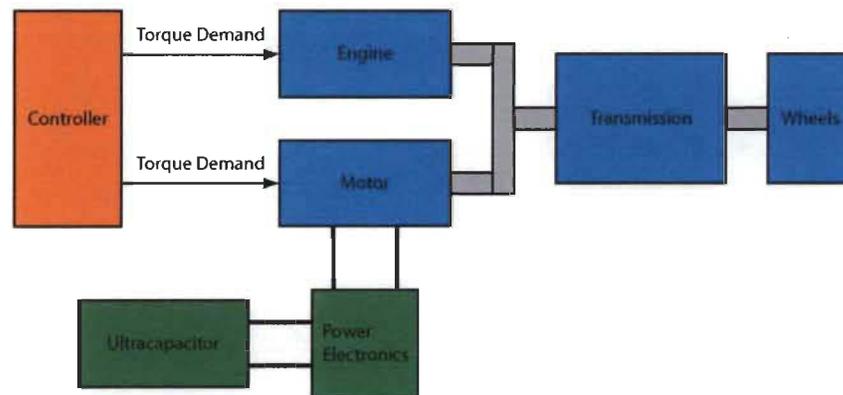


Figure G.1 Configuration du véhicule hybrid avec un supercondensateur [28]

Le moteur électrique connecté au supercondensateur épaulé le moteur à induction lors de forte demande de puissance. Le supercondensateur peut être rechargé pendant les freinages du véhicule et par le moteur à induction lors de faibles demandes d'énergie. Deux modèles ont été proposés pour la gestion d'énergie et l'évaluation de la consommation du

carburant : un modèle d'ordre réduit et un modèle de simulation détaillé du groupe motopropulseur. Un contrôleur à base de règles heuristiques est utilisé pour tester l'impact de différentes combinaisons de composants sur l'économie de carburant. Une combinaison appropriée du moteur et des supercondensateurs ont été déterminés. Une stratégie de commande prédictive a été élaborée pour la gestion d'énergie qui permet d'obtenir une meilleure économie de carburant par rapport à l'approche à base de règles. Diverses stratégies de dimensionnement et de contrôle des composants testés régulièrement indiquent une amélioration potentielle de 5 % à 15 % dans la consommation du carburant en parcours urbain avec le groupe motopropulseur hybride proposé. Cette amélioration de l'économie de carburant a été confirmée par la programmation dynamique déterministe.

## **G.1.2 Résultats obtenus dans la référence 1**

### **7.1.2.1 Stratégie à base de règles**

L'algorithme de la stratégie de gestion à base de règles reçoit la demande totale d'énergie au niveau des roues comme une entrée et détermine la répartition de la puissance entre le moteur thermique, le moteur électrique et les freins à friction. L'état de charge du supercondensateur est maintenu borné entre 50% et 90%.

La figure G.2 donne la puissance du moteur thermique et du moteur électrique pour un parcours urbain. La figure G.3 montre la vitesse du véhicule et l'état de charge du supercondensateur pour ce même parcours.

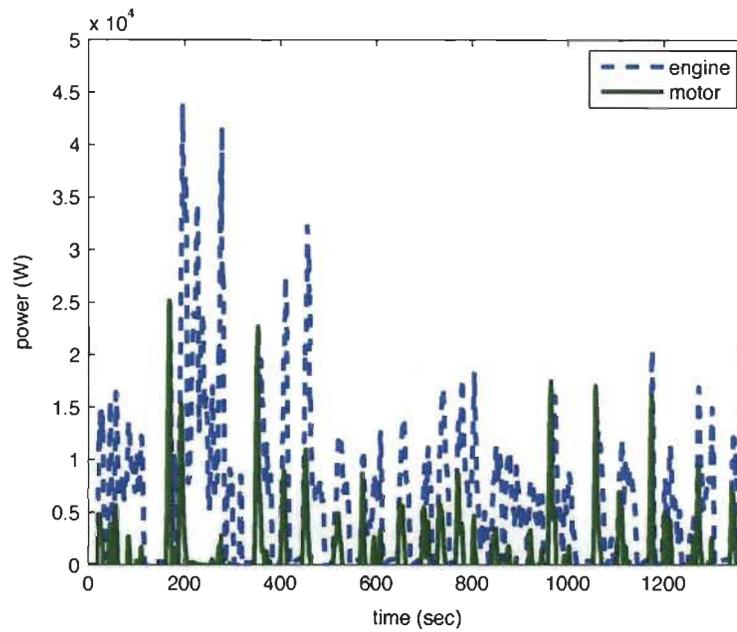


Figure G.2 Puissance du moteur thermique et du moteur électrique pour un parcours urbain avec la stratégie à base de règles [28]

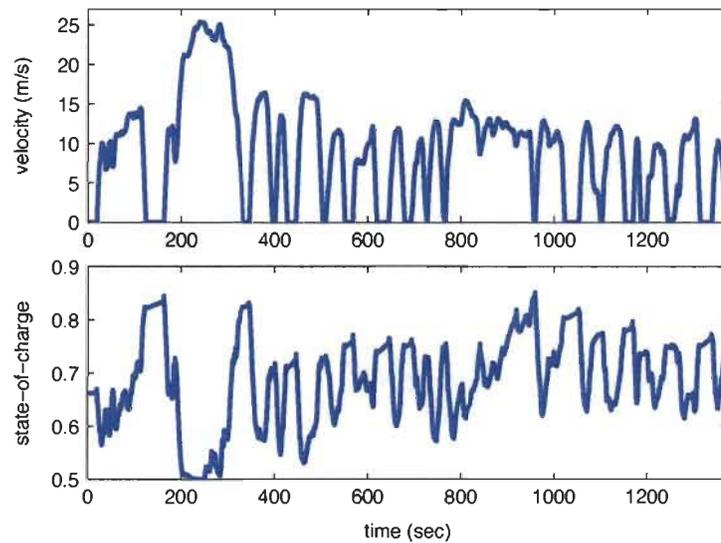


Figure G.3 Vitesse du véhicule et l'état de charge du supercondensateur pour un parcours urbain avec la stratégie à base de règles [28]

Le supercondensateur épaulé le moteur thermique durant le parcours urbain. La puis-

sance du moteur électrique enregistrée a atteint une puissance maximale de  $25 \text{ kW}$  et l'état de charge du supercondensateur a atteint lui aussi  $50 \%$  qui représente l'état minimal. Durant le parcours urbain, le supercondensateur dont son état de charge est maintenu borné continue à épauler le moteur thermique tant qu'il est chargé.

### 7.1.2.2 Programmation dynamique

La programmation dynamique déterministe est appliquée sur le modèle réduit d'un véhicule à un moteur électrique de  $40 \text{ kW}$  et un moteur thermique de  $160 \text{ kW}$ . La figure G.4 montre l'état de charge du supercondensateur pour un parcours urbain.

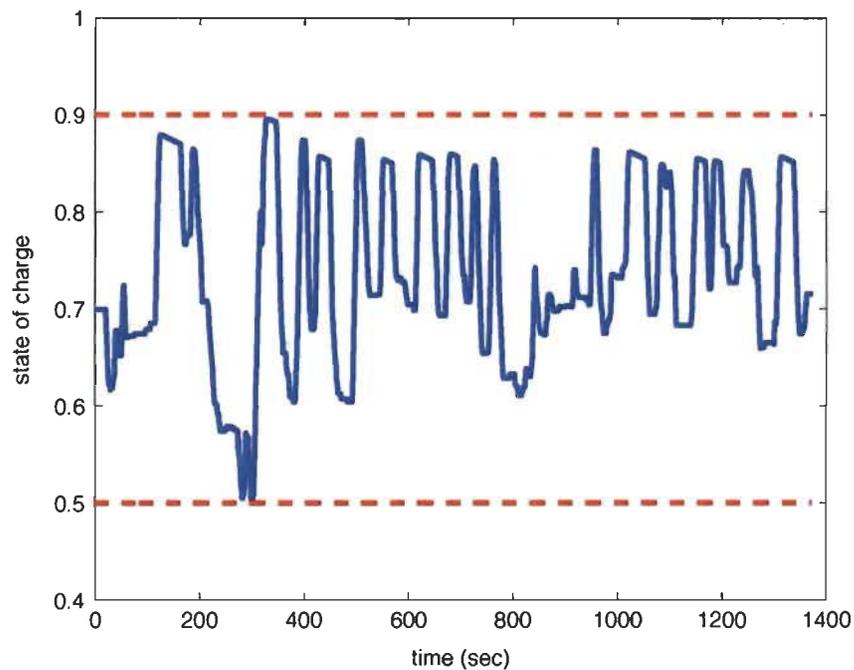


Figure G.4 État de charge du supercondensateur pour un parcours urbain avec la programmation dynamique [28]

On constate que l'état de charge est maintenu borné durant le parcours. En comparant les résultats de consommation de la stratégie à base de règles et la stratégie à base

de la programmation dynamique, on constate une amélioration de la consommation du carburant pour la programmation dynamique.

### 7.1.2.3 Commande prédictive

La commande prédictive basée sur l'optimisation a été proposée à cause de sa causalité au contraire de la programmation dynamique. La figure G.5 présente la puissance du moteur thermique et le moteur électrique. La puissance du moteur électrique avec la commande optimale ne présente pas de pics importants observés dans la figure G.2. La puissance du moteur électrique a enregistré un maximum de  $15 \text{ kW}$ . La figure G.6 montre la vitesse du véhicule et l'état de charge du supercondensateur. Avec la commande prédictive, le supercondensateur dissipe plus de puissance emmagasinée lors des freinages comparés à celui avec la stratégie à base de règles. Par ailleurs, l'état de charge est maintenu borné durant le parcours routier.

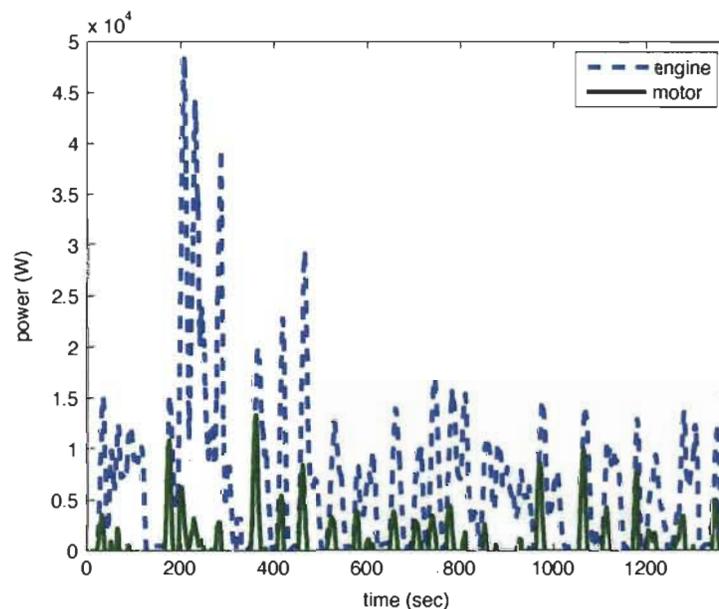


Figure G.5 Puissances du moteur thermique et du moteur électrique pour un parcours urbain avec la commande prédictive [28]

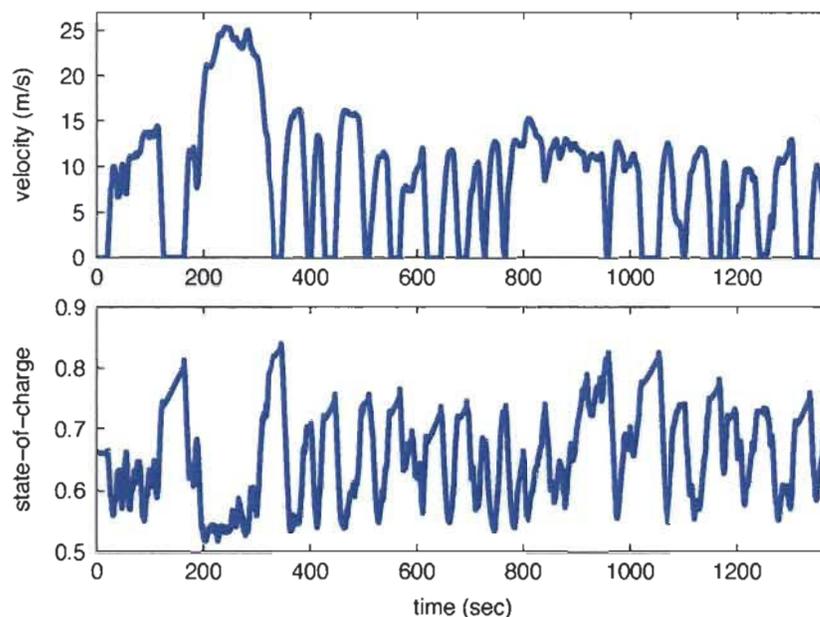


Figure G.6 Vitesse du véhicule et l'état de charge du supercondensateur pour un parcours urbain avec la commande prédictive [28]

## G.2 Référence 2

### G.2.1 Présentation de l'article 2

La référence [29] présente une comparaison des résultats expérimentales et analytiques des méthodes de gestion de puissance pour une véhicule hybride à pile à combustible. La figure G.7 présente la configuration de ce véhicule.

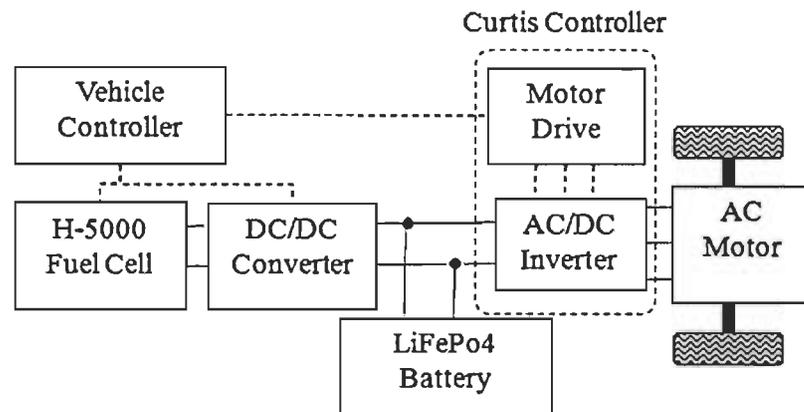


Figure G.7 Configuration du véhicule à pile à combustible et à batterie [29]

Trois stratégies ont été élaborées et comparées. La première stratégie est l'approche de l'optimisation instantanée. La fonction objectif est la consommation équivalente de l'hydrogène des deux sources (pile à combustible et batterie). La deuxième stratégie est la logique floue. Le contrôleur a deux entrées : l'état de charge de la batterie et la position de la pédale d'accélérateur. Le contrôleur est constitué de deux sorties : le degré d'hybridation et le courant de référence de la pile à combustible pour pouvoir maintenir borné l'état de charge de la batterie à une valeur proche de la valeur optimale.

La troisième stratégie est un contrôleur PI. Son intérêt est de maintenir l'état de charge de la batterie à valeur nominale à 60 %.

## G.2.2 Résultats obtenus dans la référence 2

La figure G.8 montre les courbes de l'état de charge de la batterie des stratégies proposées. On constate qu'il y a quelques différences entre ces trois stratégies. La batterie dans le cas du contrôleur PID est moins déchargée et à la fin du cycle son état de charge est d'environ 60 %. On constate aussi qu'à l'instant 250 s qui correspond à une forte demande de puissance, l'état de charge atteint environ 58 %. Le profile de l'état de charge

avec le contrôleur à base de la logique floue ressemble à celui du contrôleur PID, mais la batterie se décharge à 75 % à l'instant 250 s. Entre les instants 0 s à 250 s, l'état de charge dans le cas de la logique floue et de la stratégie d'optimisation sont presque identiques, la batterie est déchargée jusqu'à 75 %, mais à partir de l'instant 250 s, l'état de charge avec la logique floue augmente et atteint 61 %, tandis que celui de la stratégie d'optimisation diminue et atteint environ 57 %.

Ces différences d'état de charge entre ces trois stratégies aura un impact sur la consommation d'hydrogène.

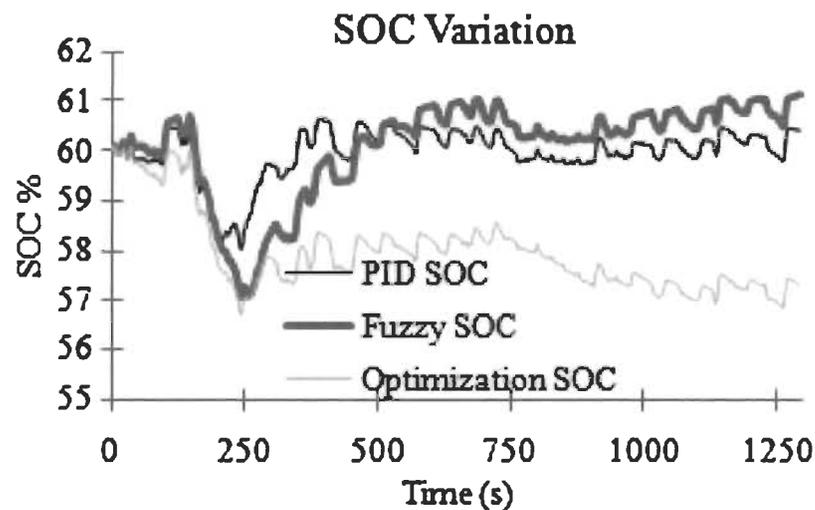


Figure G.8 Comparaison de résultats de l'état de charge de la batterie entre les stratégies proposées [29]

### G.3 Référence 3

#### G.3.1 Présentation de l'article 3

La référence [30] propose une stratégie de gestion d'énergie pour un véhicule hybride à pile à combustible et supercondensateur. La stratégie proposée combine les réseaux

neurones et la transformée en ondelettes.

### G.3.2 Résultats obtenus dans la référence 3

La figure G.9 montre les courbes des résultats de la puissance demandée, la puissance de la pile à combustible et la puissance du supercondensateur. Il a été souligné que la puissance demandée est répartie entre les deux sources. La figure G.10 montre la variation de l'état de charge du supercondensateur en fonction de la puissance demandée.

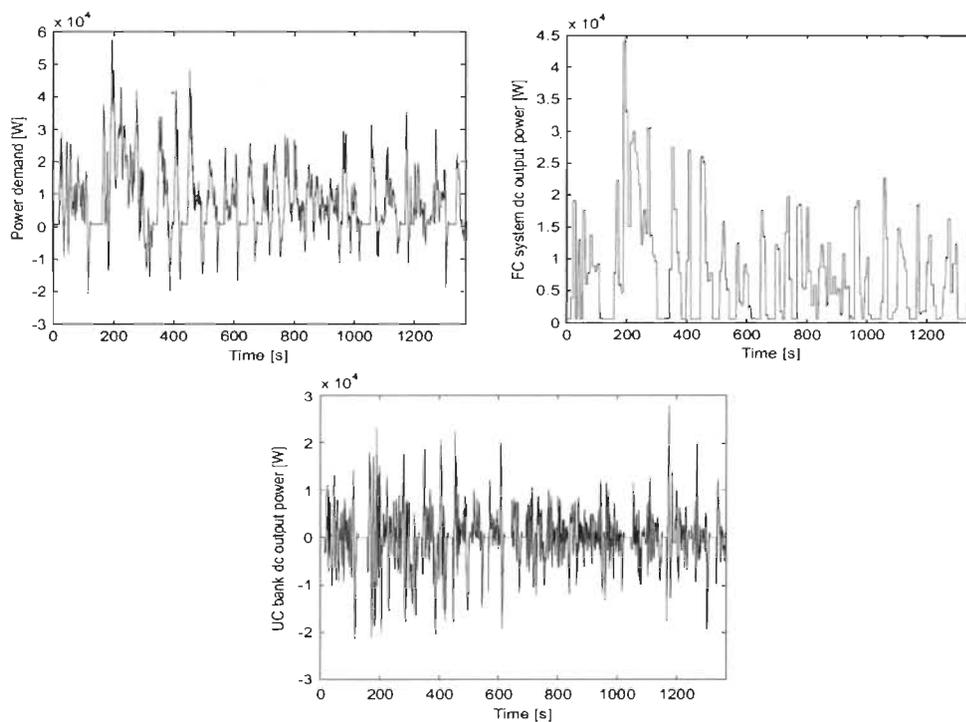


Figure G.9 Courbes de la puissance demandée, puissance de la pile à combustible et la puissance du supercondensateur [30]

La puissance demandée se situe entre  $60 \text{ kW}$  et  $-20 \text{ kW}$ . La puissance de la pile à combustible varie entre  $1 \text{ kW}$  et  $45 \text{ kW}$ . La puissance du supercondensateur varie entre  $30 \text{ kW}$  et  $-20 \text{ kW}$ . Il a été mentionné que le supercondensateur apporte un surplus de 25 % à la puissance demandée. Par contre, la pile à combustible fournit 75 % de la puissance

demandée. Le supercondensateur récupère la puissance de freinage comme le prouve son profil de la puissance et son état de charge.

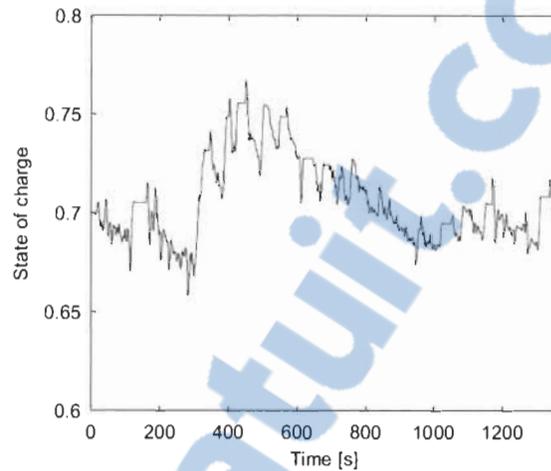


Figure G.10 Variation de l'état de charge du supercondensateur en fonction de la puissance demandée [30]

#### G.4 Référence 4

##### G.4.1 Présentation de l'article 4

La référence [31] compare les performances de deux stratégies d'optimisation qui sont le principe du minimum de Pontryagin et la programmation dynamique. Les deux stratégies visent une trajectoire optimale, mais elles se basent sur différents concepts. Dans cet article, la stratégie basée sur le principe du minimum de Ponryagin a prouvé sa supériorité par rapport à celle basée sur la programmation dynamique. La figure G.11 donne la configuration du véhicule à pile à combustible et batterie validée.

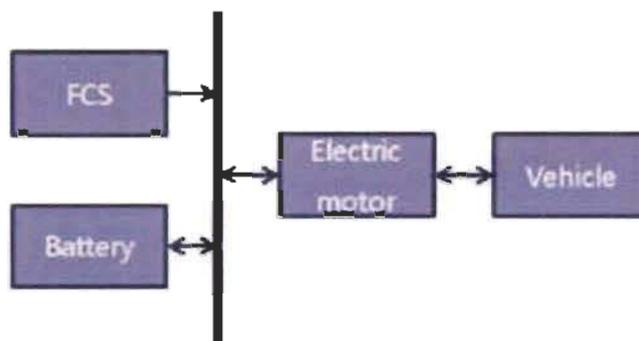


Figure G.11 Configuration du véhicule à pile à combustible et batterie [31]

#### G.4.2 Résultats obtenus dans la référence 4

La figure G.12 montre la puissance de la batterie, la puissance de la pile à combustible et l'état de charge de la batterie pour un parcours urbain.

Calculés avec le principe du minimum de Pontryagin et la programmation dynamique, les deux trajectoires de la puissance optimale de la batterie ne sont pas tout à fait identiques. La même remarque a été soulignée concernant les deux trajectoires de la puissance de la pile à combustible et l'état de charge du supercondensateur de la batterie.

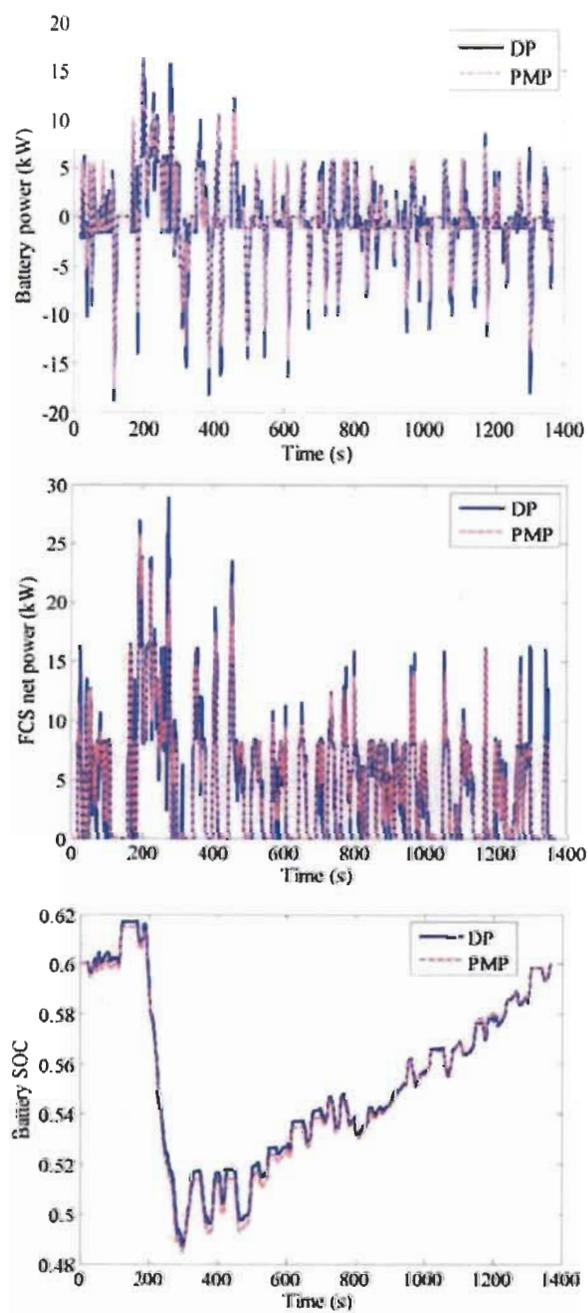


Figure G.12 Puissance de la batterie de la pile à combustible et l'État de charge de la batterie pour un parcours urbain [31]

## G.5 Référence 5

### G.5.1 Présentation de l'article 5

La référence [33] expose deux stratégies de gestion d'énergie appliquées à un véhicule hybride. Ce véhicule est constitué d'un moteur thermique, un moteur électrique et une batterie de stockage. La figure G.13 montre la configuration de ce véhicule.

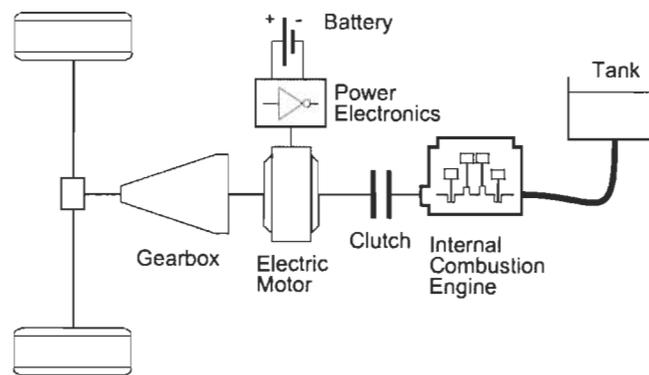


Figure G.13 Configuration d'un véhicule hybride avec batterie de stockage [33]

La méthode utilisée pour l'optimisation énergétique combine la programmation dynamique déterministe et l'optimisation convexe. C'est une méthode globale (ou hors ligne) et forcé, elle est supposée donner un résultat optimal en un temps moins long que celui de la programmation dynamique. L'état de charge de la batterie doit être maintenu borné durant le trajet.

### G.5.2 Résultats obtenus dans la référence 5

La figure G.14 montre la superposition de résultats de la programmation dynamique et la méthode proposée dans cette référence. Pour valider la stratégie proposée, le parcours

Urbain **FTP** qui dure 1900 s a été utilisé. On constate que l'état de charge de la batterie est maintenu borné et sa valeur finale est égale à sa valeur initiale.

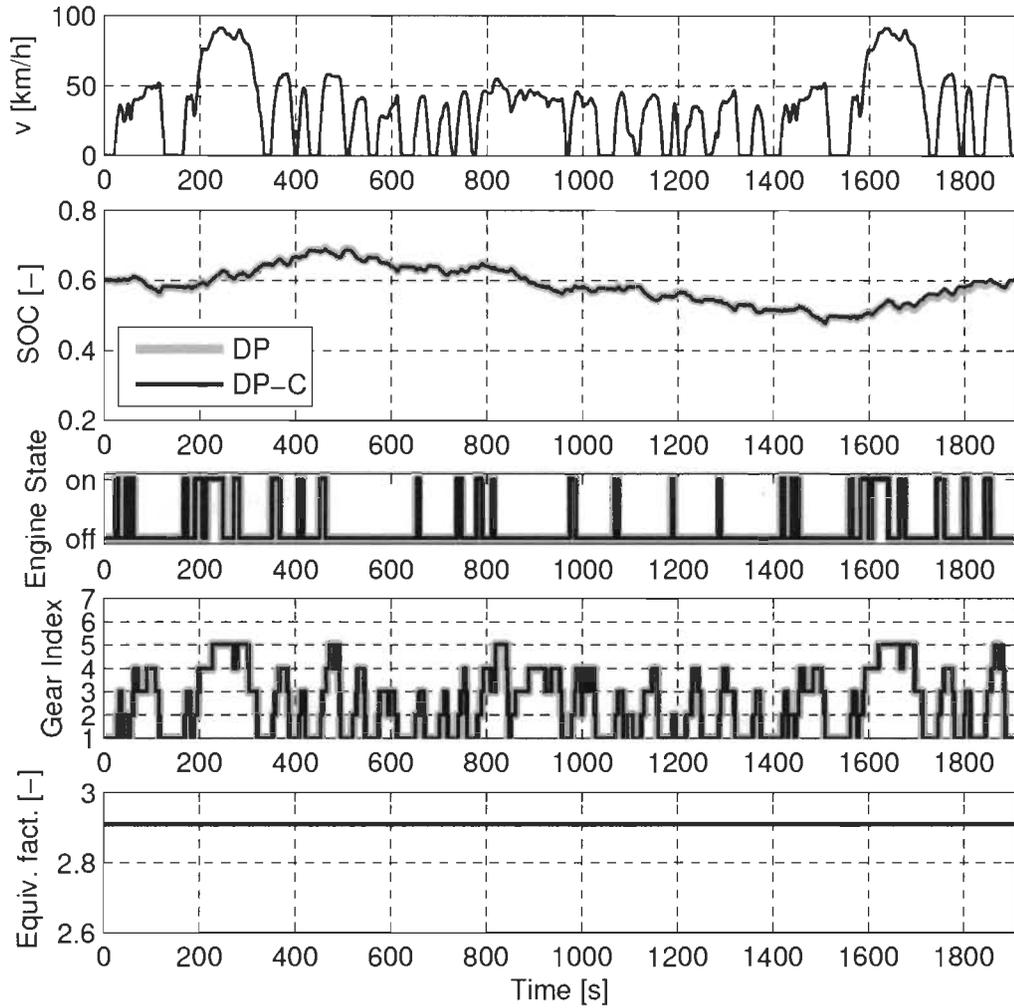


Figure G.14 Superposition de résultats obtenus par la programmation dynamique et la méthode proposée [33]

## ANNEXE H

## INFORMATIONS SUR LE MATÉRIEL UTILISÉ

Plus d'informations à propos de mon ordinateur [Imprimer cette page](#)

Composant	Détails	Sous-indice	Indice de base
Processeur	Intel(R) Core(TM) i7 CPU X 980 @ 3.33GHz	7,7	 <p>5,9</p> <p>Déterminé par le sous-indice le plus bas</p>
Mémoire vive	12,0 Go	7,7	
Graphiques	ATI Radeon HD 5700 Series	7,4	
Graphiques de jeu	6907 Mo total de mémoire vidéo disponible	7,4	
Disque dur principal	858GB libre (919GB au total)	5,9	

Windows 7 Entreprise

**Système**

Fabricant	Dell Inc.
Modèle	Studio XPS 9100
Quantité totale de mémoire système	Mémoire vive 12,0 Go
Type du système	Système d'exploitation 64 bits
Nombre de cœurs de processeur	6

**Stockage**

Taille totale des disques durs	919 Go
Partition de disque (C:)	858 Go libre (919 Go au total)
Lecteur multimédia (D:)	CD/DVD

**Carte graphique**

Afficher le type de carte	ATI Radeon HD 5700 Series
Mémoire graphique totale disponible	6907 Mo
Mémoire graphique dédiée	1024 Mo
Mémoire système dédiée	0 Mo
Mémoire système partagée	5883 Mo
Afficher la version du pilote de la carte	8.850.0.0
Résolution du moniteur principal	1920x1080
Version DirectX	DirectX 10

**Réseau**

Carte réseau	Realtek RTL8168D/8111D Family PCI-E Gigabit Ethernet NIC (NDIS 6.20)
--------------	--

**Remarques**

Les performances graphiques des jeux reposent sur la carte graphique principale. Si ce système utilise des cartes reliées ou en possède plusieurs, certaines applications peuvent bénéficier de meilleures performances.

Figure H.1 Informations à propos du matériel utilisé

## ANNEXE I

## LISTE DE PUBLICATIONS

1. H. Hemi, J. Ghouili, and A. Cheriti, *Modeling and simulation temperature and current effects of a lithium ion battery for electric vehicles*. In Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2015 IEEE 28th Canadian Conference on (pp. 970-975). IEEE.
2. H. Hemi, J. Ghouili, and A. Cheriti, *Combination of Markov chain and Optimal control solved by Pontryagin's Minimum Principle for a fuel cell/supercapacitor vehicle*, Energy Conversion and Management, 2015, vol. 91, p. 387-393.
3. H. Hemi, J. Ghouili, and A. Cheriti, *An optimal control solved by Pontryagin's minimum principle approach for a fuel cell/supercapacitor vehicle*. Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2014 IEEE. IEEE, 2014. p. 87-92.
4. H. Hemi, J. Ghouili, and A. Cheriti, *A real time fuzzy logic power management strategy for a fuel cell vehicle*, Energy Conversion and Management, 2014, 80, 63-70.
5. H. Hemi, J. Ghouili, and A. Cheriti, *A real time energy management for electrical vehicle using combination of rule-based and ECMS*, Electrical Power and Energy Conference (EPEC 2013), Halifax, Canada 2013.
6. H. Hemi, J. Ghouili, and A. Cheriti, *Online Power management Strategy for Hybrid Electric Vehicle*, The Power Electronics south America Conference 2012, Saõ

Paulo, Brazil 2012.

7. H. Hemi, J. Ghouili, and A. Cheriti, *Power management strategy for a fuel cell/battery hybrid electric vehicle*, Third International Joint Journal Conference in Computer, electronics and Electrical CEE, 2011.
8. H. Hemi, J. Ghouili, and A. Cheriti, *A real time power management strategy for a fuel cell/battery electrical vehicle*, GESTS International Transaction Computer Science and Engineering, Vol :65, No :1, 2011.

## **ANNEXE J**

### **PHOTOS UTILISÉES**

Les photos utilisées dans cette thèse pour illustrer le véhicule, la pile à combustible sont prises du site internet de Honda Fuel Cell Power FCX [1].

La photo qui illustre le supercondensateur est prise du site internet du constructeur Maxwell Technologies Products [45].