

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE

PAR
FABRICE JOVIAN PAMEN MBEUTKEU

COMMANDÉ DE SYSTÈMES MULTI-PILE COMBUSTIBLES

NOVEMBRE 2018

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE (M. SC. A.)

Programme offert par l'Université du Québec à Trois-Rivières

COMMANDÉ DE SYSTÈMES MULTI-PILE COMBUSTIBLES

PAR

FABRICE JOVIAN PAMEN MBEUTKEU

Loïc BOULON, directeur de recherche

Université du Québec à Trois-Rivières

Naïmi BOUBEKEUR, évaluateur

Université du Québec à Trois-Rivières – C2T3

François NOUGAROU, évaluateur

Université du Québec à Trois-Rivières

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

Résumé

Ce travail se focalise sur la commande d'un système multi-pile à combustible avec système de stockage d'énergie pour des applications de transport (véhicule électrique à hydrogène). Il propose plusieurs stratégies de commande basées sur la recherche du point de fonctionnement optimal de la pile à combustible. L'objectif étant de faire fonctionner chacune des piles à sa puissance optimale. Dans la considération selon laquelle, la puissance demandée par la charge est supérieure à la puissance optimale, la pile fonctionnera à sa puissance optimale et le reste de la puissance sera fourni par la batterie. Dans une autre configuration, lorsque la puissance demandée est inférieure à la puissance optimale, la pile fonctionnera à sa puissance optimale tout en rechargeant la batterie.

Nous avons également proposé une stratégie combinant le point de fonctionnement du rendement optimal et de la puissance maximale. Enfin, notre travail nous a conduits à une réflexion visant la réduction de la consommation en hydrogène.

Ces différentes approches nous ont permis de définir une meilleure efficacité de la pile à combustible ainsi que l'état de charge de la batterie. Chacune de ces stratégies nous permettra d'observer l'évolution de la consommation en hydrogène du système. De cette observation, nous ressortirons la meilleure stratégie répondant à notre système à travers une étude comparative. Des algorithmes de gestion d'énergie ont été définis pour chacune de ces stratégies de commande.

L'outil de simulation pour ce travail fut l'environnement Matlab/Simulink.

Remerciements

Le sujet sur la commande d'un système multi-pile demeure une préoccupation importante dans les différents domaines ci-dessus énoncés. L'Université du Québec à Trois-Rivières à travers le département de génie électrique et informatique porte de plus en plus un intérêt sur cette problématique. Ce travail de recherche est devenu possible grâce à l'apport des enseignants de ce département. Je ne manquerais pas de citer en particulier mon directeur de recherche, le Professeur Loïc BOULON, mon codirecteur de recherche Andrès HERNANDÈZ et tous les enseignants du département de génie électrique et informatique et de manière particulière le Professeur Mamadou Lamine Doumbia.

Mes remerciements seront portés aussi à l'encontre de tous mes collègues, principalement à Mauricio HUIGUITA pour son aide sur la commande d'une pile et de Neigel MARX pour la mise à ma disposition des données pratique de la pile.

Enfin à mes parents :

Ma Maman Mme KANMOGNE Angélique Épouse PAMEN

Mon feu Père Mr Flaubert PAMEN

Pour la vie qu'ils m'ont donnée ainsi que leur prière quotidienne.

Enfin à mes frères et sœurs.

Table des matières

Résumé.....	iii
Remerciements.....	iv
Table des matières.....	v
Liste des tableaux.....	ix
Liste des figures	x
Liste des symboles	15
Chapitre 1 - Introduction.....	19
1.1 Contexte de l'étude.....	20
1.2 Problématique.....	21
1.3 Méthodologie	21
Chapitre 2 - État de l'art.....	25
2.1 Introduction	25
2.2 Présentation d'un système multi-pile à combustible	25
2.3 Commande d'un système multi-pile	30
2.4 Conclusion.....	39
Chapitre 3 - Modélisation et commande d'un système pile à combustible	40
3.1 Introduction	40
3.2 Choix technologique	40

3.3 Modélisation d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons.....	42
3.3.1 Modélisation d'une PàC SR-12 500W	43
3.3.2 Modélisation d'une PàC générique.....	58
3.4 Modélisation des systèmes auxiliaires	62
3.5 Modélisation du système de stockage : batterie	64
3.5.1 Modèle de décharge	64
3.5.2 Modèle de charge.....	66
3.6 Commande d'un système pile à combustibles	67
3.6.1 Modélisation du convertisseur DC/DC Boost	68
3.6.2 Commande du convertisseur DC/DC	73
3.7 Conclusion.....	77
Chapitre 4 - Dimensionnement et stratégie d'un système à une pile (unipile).....	78
4.1 Introduction	78
4.2 Dimensionnement du système à une pile	79
4.2.1 Dimensionnement de la charge : puissance requise par le véhicule	79
4.2.2 Modélisation dynamique d'un véhicule.....	80
4.2.3 Validation du modèle.....	82

4.2.4 Dimensionnement de la pile à combustible	85
4.2.5 Dimensionnement de la batterie	87
4.3 Système de gestion énergétique	90
4.3.1 Stratégie de contrôle basée sur la machine d'état	92
4.3.2 Stratégie de contrôle basée sur les règles de la logique floue	96
4.3.3 Stratégie basée sur le découplage fréquentiel et la logique floue	99
4.3.4 La stratégie basée sur la minimisation de la consommation équivalente	102
4.3.5 Stratégie de contrôle basée sur la commande optimale	106
4.3.6 Stratégie de contrôle MEPT & MPPT avec ou sans contrôle du SOC du stockage.....	125
4.4 Conclusion.....	129
Chapitre 5 - Dimensionnement et stratégie d'un système multi-pile à combustible.....	130
5.1 Introduction	130
5.2 Dimensionnement du profil de charge	131
5.3 Dimensionnement de la puissance aux piles et de l'élément de stockage.....	134

5.4 Choix des générateurs PàC.....	136
5.5 Stratégie de commande d'un système multi-piles.....	137
5.5.1 Stratégie de gestion de l'énergie basée sur les règles	138
5.5.2 Stratégie basée sur la commande optimale	143
5.5.3 Stratégie de contrôle par ECMS (Energy Consumption Minimization Strategy).....	154
5.5.4 Stratégie de gestion basée sur la logique floue et la répartition de puissance	158
5.6 Conclusion.....	165
Chapitre 6 - Conclusion	167
Références.....	169

Liste des tableaux

Tableau 3-1: Paramètre de la PàC à MEP.....	54
Tableau 3-2: Paramètres de modélisation des différentes PàC	62
Tableau 3-3: Paramètres de la batterie	67
Tableau 3-4: Paramètres du convertisseurs Boost	72
Tableau 4-1 : Golf car applications [45]	83
Tableau 4-2: Exigences pour le développement des stratégies de gestion de l'énergie	92
Tableau 4-3: Répartition de puissance entre les différentes sources du systèmes pour une stratégie de gestion basée sur la machine d'état.....	93
Tableau 4-4 : Règles de la logique floue assignée à la pile	97
Tableau 5-1: Paramètres véhicule Saturn SL1 1994.....	132
Tableau 5-2:Paramètres de performance du véhicule	133
Tableau 5-3: Récapitulatif des puissance de la PàC	137
Tableau 5-4: Règles pour le contrôleur en logique floue.....	161

Liste des figures

Figure 2-1: Système multi PàC (a) et système multi PàC par segments de stacks [5]	26
Figure 2-2: Architecture fluidique d'un système multi PàC [3].....	26
Figure 2-3: Architecture électrique d'un système multi PàC [3].....	27
Figure 2-4:Architecture électrique pour un système multi PàC basée sur le couplage magnétique à haute fréquence.....	29
Figure 2-5: Schéma de contrôle du système par machine d'états [8].....	32
Figure 2-6: Stratégie de contrôle basée sur les règles de gestion de bases [8]	32
Figure 2-7:Principe de distribution de puissance [9]	35
Figure 2-8: Principe de répartition de puissance par <i>daisy chain</i> [9]	36
Figure 3-1: Modèle équivalent du circuit de la PàC [20].....	52
Figure 3-2: Profil de courant en régime transitoire et permanent de la PàC... <td>55</td>	55
Figure 3-3:Réponse en tension de sortie du modèle de la pile	56
Figure 3-5: Courbe caractéristique V-I du modèle de PàC à MEP	56
Figure 3-6: Validation du modèle de la pile à MEP [33].....	57
Figure 3-7: Courbes de puissance de la PàC à MEP	57
Figure 3-7: Représentation d'un convertisseur DC/DC de type Boost	68
Figure 3-8: Représentation en signaux de petits modèles d'un convertisseur DC/DC de type Boost.....	68
Figure 3-10:Schéma de commande en courant boucle fermé du courant.....	73
Figure 3-11: Boucle de contrôle de courant du convertisseur Boost	76

Figure 4-1: Système pile à combustible pour une application transport	79
Figure 4-2: Cycle de conduite urbain (US06) à gauche et à droite cycle UDDS	80
Figure 4-3: Ensemble de forces dynamiques exercées sur et par un véhicules [44]	81
Figure 4-4: voiturette de golf [46]	84
Figure 4-5 : Cycle de conduite dédiée à la voiturette de golf	84
Figure 4-6: Puissance générée par le véhicule pour un cycle de conduite (US06 et UDDS)	85
Figure 4-7: Courbe de polarisation I-V, de puissance I-P et rendement de la PàC Ballard MARK V 5 kW	87
Figure 4-8: Courbe d'énergie de traction, d'énergie récupérée, de la puissance crête de traction et de la puissance instantanée en fonction du temps	88
Figure 4-9 : Contrôle hystérésis	94
Figure 4-10: Représentation de l'implémentation de la stratégie de gestion basée sur une machine d'État	94
Figure 4-11: Courbes de puissance, rendement état de charge et de consommation en hydrogène pour la stratégie de gestion basée sur une machine d'état	95
Figure 4-12: Stratégie de gestion de l'énergie basée sur la logique floue	96
Figure 4-13: Fonctions d'appartenance pour le SOC, la puissance demandée et la puissance de la pile	97
Figure 4-14: Surface de logique floue	98
Figure 4-15:Courbe de puissances, rendement, état de charge batterie et consommation en hydrogène pour une stratégie de gestion par logique floue	98
Figure 4-16:Schéma découplage + logique floue	99
Figure 4-17: Puissance demandée par découplage fréquentiel	100
Figure 4-18: Surface stratégie découplage fréquentiel et logique floue	101

Figure 4-19: Courbe de puissances, rendement, état de charge batterie et consommation en hydrogène pour une stratégie de gestion par découplage fréquentiel et logique floue	101
Figure 4-20: Stratégie de contrôle ECMS.....	103
Figure 4-21: Courbe de puissance, d'efficacité, du SOC batterie et de la consommation en hydrogène pour une stratégie ECMS	105
Figure 4-22: Évolution de l'état de charge de la batterie en fonction de la population prise en compte dans l'algorithme basé sur le PSO pour une stratégie basée sur le ECMS.....	105
Figure 4-23: Modèle approximatif de la PàC à une équation de 1er ordre ...	107
Figure 4-24:Modèle approximatif de la batterie à une équation de 1er ordre	109
Figure 4-25: Schéma d'implémentation de la stratégie de gestion de l'énergie par la méthode de multiplicateur de LaGrange	122
Figure 4-26:Schéma d'implémentation de la stratégie de gestion de l'énergie par la méthode de multiplicateur de LaGrange avec contrôle de l'état de charge.....	123
Figure 4-27: Courbe de puissances, de rendement, état de charge de batterie et consommation en hydrogène pour une stratégie de gestion de l'énergie basée sur la commande optimale :la méthode avec multiplicateur de LaGrange.....	124
Figure 4-28: Courbe de puissances, de rendement, état de charge de batterie et consommation en hydrogène pour une stratégie de gestion de l'énergie basée sur la commande optimale :la méthode avec multiplicateur de LaGrange et contrôle du SOC de la batterie.....	124
Figure 4-29: Principe de recherche des points de maximum d'efficacité par la méthode P&O	126
Figure 4-30: Schéma de recherche des points de maximum de puissance par la méthode (P&O)	127
Figure 4-31: Organigramme de fonctionnement MEPT & MPPT	128
Figure 5-1: système multi-pile	131
Figure 5-2: Profil de puissance pour un cycle US06, UDDS et HWFET.....	133

Figure 5-3: Graphiques de puissance et d'énergie pour les profils de conduite US06, urbaine (UDDS) et d'auto route (HWFET)	134
Figure 5-4: Courbes de polarisation en tension, puissance et efficacité de chacune des piles.....	137
Figure 5-5: Courbe de puissances des piles pour une stratégie de gestion de l'énergie basée sur les règles	140
Figure 5-6: Courbe du SOC et de la puissance de la batterie pour une stratégie de gestion de l'énergie basée sur les règles.....	140
Figure 5-7: Courbe de consommation en hydrogène des piles et consommation totale pour une stratégie de gestion de l'énergie basée sur les règles	141
Figure 5-8: Courbe d'efficacité des piles pour une stratégie de gestion de l'énergie basée sur les règles	142
Figure 5-9: Puissance demandée, puissance de la batterie et puissance optimale pour une stratégie de gestion basée sur la commande optimale par la méthode PMP	151
Figure 5-10: État de charge de la batterie obtenue pour une stratégie de gestion basée sur la commande optimale par la méthode PMP	151
Figure 5-11: Puissances des différentes piles obtenues pour une stratégie de gestion basée sur la commande optimale par la méthode PMP	152
Figure 5-12: Courbes de consommation en hydrogène de chaque pile pour une stratégie de gestion basée sur la commande optimale par la méthode PMP	152
Figure 5-13: Efficacité de chaque piles pour une stratégie de gestion basée sur la commande optimale par la méthode PMP.....	153
Figure 5-14: Courbes de puissances des piles pour une stratégie de contrôle basée sur ECMS	155
Figure 5-15: Puissance et état de charge de la batterie pour une stratégie de contrôle basée sur ECMS	155
Figure 5-16: Consommation au pas de temps de chaque pile pour une stratégie de contrôle basée sur ECMS.....	156

Figure 5-17: Consommation cumulative en hydrogène du système pour une stratégie de contrôle basée sur ECMS	156
Figure 5-18: Courbe d'efficacité des piles pour une stratégie de contrôle basée sur ECMS	157
Figure 5-19: Système de logique floue avec répartition de puissance	159
Figure 5-20: Surface de contrôle logique floue	160
Figure 5-21: Fonctions d'appartenances pour la stratégie basée sur la logique floue.....	160
Figure 5-22: Courbes de puissance, état de charge et consommation d'hydrogène pour une stratégie basée sur la logique floue....	162
Figure 5-23: Répartition de la puissance obtenue via la stratégie de logique à l'aide d'un algorithme d'optimisation (PSO).....	162
Figure 5-24:Courbe de consommation en hydrogène pour la stratégie basée sur la logique floue et de la répartition de puissance	163

Liste des symboles

$(m_X)_{net}$	Masse molaire partielle nette de l'élément X (<i>mol/s</i>)
$(m_X)_{in}$	Flux molaire d'entrée de l'élément X (<i>mol/s</i>)
$(m_X)_{net}$	Masse molaire nette de l'élément X (<i>mol/s</i>)
$(m_X)_{out}$	Flux molaire de sortie de l'élément X (<i>mol/s</i>)
I_{batt}^*	Courant filtré de la batterie
ϕ_a	Humidité à l'anode
ϕ_c	Humidité à la cathode
h_s	
ΔI_L	Ondulation courant entrée convertisseur (A)
ΔV_{OUT}	Ondulation tension de sortie (V)
A_S	Surface cellule de la pile
A_{aero}	Surface frontale du véhicule
$C_{OUT(min)}$	Capacité du convertisseur (F)
C_{aero}	Coefficient aérodynamique
C_{fc}	Capacité thermique de la pile
C_p	Capacité thermique de l'air
C_r	Coefficient de roulement
E_O	Tension en circuit ouverte de la batterie
E^{cell}	Tension en circuit ouvert de la pile (V)
F_S	Fréquence de commutation du convertisseur (kHz)
F_{acc}	Force d'accélération (N)
F_{aero}	Force de traînée aérodynamique (N)
F_g	Force gravitationnelle (N)
F_r	Force de roulement (N)
F_{tr}	Force de traction (N)
I_L	Courant limite de la pile (A)

$I_{LIM(min)}$	Courant d'entré minimal du convertisseur (A)
I_{MAXOUT}	Courant maximal admissible à la sortie du convertisseur (A)
$I_{SW(max)}$	Courant maximal de commutation du convertisseur (A)
I_{batt}	Courant de la pile
I_{fc}	Courant de la pile (A)
I_{ref}	Courant de référence (A)
K_I	(Ω/A)
K_T	(Ω/A)
L_{dc}	Inductance du convertisseur (H)
M_V	Masse du véhicule (kg)
M_{fc}	Masse de la pile (kg)
N_s	Nombre de cellule de la pile
P_{H_2}	Pression partielle d'hydrogène (atm)
P_{H_2O}	Pression partielle de l'eau (atm)
P_{O_2}	Pression partielle d'oxygène (atm)
$P_{fc_{net}}$	Puissance nette de la pile
P_{Fan}	Puissance du ventilateur
P_{batt}	Puissance de la batterie
P_{dem}	Puissance demandée (W)
P_{fc}	Puissance de la pile (W)
P_{req}	Puissance requise (W)
P_{sys}	Pression du système ((atm))
Q_E	Perte thermique électrique
Q_L	Perte thermique
Q_{batt}	Capacité de la batterie (Ah)
Q_c	Perte thermique chimique
R^0	Résistance ohmique (Ω)
R^{Act}	Résistance d'activation (ohm)
R^C	Résistance ohmique cathode(Ω)
R^{Conc}	Résistance de concentration (ohm)
R^M	Résistance ohmique de la membrane(Ω)

R_{batt}	résistance interne de la batterie (Ohm)
V^0	Tension pertes ohmiques (V)
V^{Act}	Tension perte d'activation (V)
V_C	Tension charge double (V)
V^{Conc}	Tension pertes de concentration (V)
$V_{IN(max)}$	Tension d'entrée maximale convertisseur (V)
$V_{IN(min)}$	Tension d'entrée minimale convertisseur (V)
V_{IN}	Tension d'entrée nominale (V)
V_{OUT}	Tension de sortie du convertisseur (V)
V_a	Volume anode (m^3)
V_{batt}	Tension de la batterie (V)
V_c	Volume cathode (m^3)
V_{cm}	Tension compresseur (V)
V_{cm_ref}	Tension de référence du compresseur (V)
V_{dc}	Tension du bus DC
V_{fc}	Tension aux bornes de la pile (V)
V_v	Vitesse véhicules (m/s)
W_{air}	Débit massique de l'air
u_{T_R}	Pression partielle du système
u_{PA}	Pression partielle à l'anode
u_{PC}	Pression partielle à la cathode
η_{fc}	Efficacité de la pile
η_s	Efficacité du compresseur
λ_A	(s)
λ_C	(s)
ρ_{air}	Densité volumique de l'air (kg/m ³)
ΔG	Variation de l'enthalpie libre de Gibbs
$^{\circ}C$	Degré Celsius
$^{\circ}K$	Degré Kelvin
A	amplitude de la zone exponentielle (V)
atm	Atmosphère

<i>B</i>	constante inverse de temps de la zone exponentielle (1/(Ah))
<i>D</i>	Rapport cyclique convertisseur
<i>DC</i>	Direct current
<i>EOC</i>	End of Charge
<i>ESC</i>	Extremum Seeking Control
<i>F</i>	Constante de Faraday (C/mol)
<i>g</i>	Accélération de la gravité (m ² /s)
<i>Kg</i>	Kilogramme
<i>MEP</i>	Membrane à échange e protons
<i>MEPT</i>	Maximum Efficiency Point Tracking
<i>MJ/kg</i>	Méga Joule par kilogramme
<i>MK</i>	Méga Joule
<i>MPPT</i>	Maximum Power Point Tracking
<i>NiCd</i>	Nickel Cadmium
<i>NiMH</i>	nickel-metal hydride
<i>P&O</i>	Perturb and Observe
<i>PàC</i>	Pile à combustible
<i>PI</i>	Proportional Integral
<i>R</i>	Nombre de Reynolds ($J/(molK)$)
<i>Sat</i>	Saturation
<i>Sc</i>	Super condensateur
<i>SOC</i>	State of charge
<i>T ou T_{fc}</i>	Température de la pile(°C ou °K)
<i>ESR</i>	Résistance équivalente en série
<i>HHV</i>	High Heat Value of hydrogen
<i>K</i>	Constante de polarisation (V/(Ah)) ou la résistance de polarisation (ohm)
<i>LHV</i>	Low Heat Value of hydrogen
<i>Pamb</i>	Pression ambiante (atm)
<i>it</i>	Courant actuel de charge de la batterie
α	Angle de route (°)

Chapitre 1 - Introduction

La découverte de l'effet à combustible en 1839 par l'allemand Christian Schönbein fut le début d'une grande avancée dans le domaine de la production de l'électricité. En effet, une pile à combustible (PàC) est une source de puissance au sein de laquelle l'électricité est produite par réaction chimique, au cours de laquelle se produisent une oxydation à l'anode et une réduction à la cathode [1]. Elle constitue une bonne source de stockage d'énergie.

Plusieurs recherches sont menées pour accroître les performances, le coût et la productivité des PàCs. En 2010, des chercheurs américains et des chercheurs allemands ont proposé des résultats pouvant réduire de 80 % le prix des PàCs. Avec les différentes technologies existantes à savoir la technologie de la PàC à hydrogène, au méthanol, etc., de nombreuses applications font de plus en plus usage à des PàCs principalement dans le domaine du transport, de la production intégrée de l'énergie électrique... etc. [1]. Cette croissance de l'intérêt porté sur les PàCs constitue un enjeu important visant à augmenter les sources de satisfaction des besoins énergétiques tout en respectant l'environnement. L'Université du Québec à Trois-Rivières s'est investie dans le domaine de l'accumulation de l'énergie par le biais de son Institut de Recherche sur l'hydrogène. Cet institut s'intéresse entre autres aux problématiques de la PàCs. Il en ressort dans de multiples expertises et insertions scientifiques que la commande et l'amélioration de système PàC

restent délicat à cause du nombre important de critères physiques mis en jeu. Parmi ces critères, on peut en citer le profil de courant imposé par la charge, la température du générateur PàC, les températures environnantes, les pressions, le taux d'hydratation du combustible et du comburant. Toutes ces grandeurs influencent fortement le fonctionnement et la performance du système. Ce qui rend difficile leur estimation de manière claire. En effet, les grandeurs sont liées par des relations fortement non linéaires, souvent difficiles à modéliser, et très dépendantes des choix technologiques retenus pour les organes auxiliaires entourant la pile (humidificateur, compresseur...). L'identification des plages de variation des différents paramètres physiques permettant de caractériser, puis d'optimiser le fonctionnement du stack (*mot anglais pour empilement*) et du système, sont alors généralement effectués en recourant à un grand nombre d'essais expérimentaux, qui nécessitent à la fois du temps (du fait par exemple des constantes de temps importantes liées aux phénomènes thermiques et à leur contrôle) et des moyens financiers conséquents pour un laboratoire (coût des gaz réactifs notamment) [2].

Dans ce contexte, notre sujet de recherche dont le thème choisi est '*la commande d'un système multi-pile*' abordera ces aspects de travail tout en mettant l'accent sur le rendement des PàCs, avec une spécificité autour d'un système composé de plusieurs générateurs PàCs montés en série, série-parallèle ou parallèle.

1.1 Contexte de l'étude

Les récentes avancées dans le développement de véhicules électriques ont vu apparaître de nouveaux modèles utilisant une nouvelle source d'énergie renouvelable. Cette nouvelle source d'énergie renouvelable est l'hydrogène qui alimente des générateurs PàCs. De cette source, il est aujourd'hui possible de se substituer des bornes de recharges électriques

conventionnelles et procéder à de nombreuses économies. En quête de forte puissance pour la traction, ces générateurs PàCs présentent plusieurs complexités au niveau de la puissance et surtout du rendement ainsi que la gestion. Contrairement aux autres sources, les meilleurs rendements sont obtenus à leurs puissances maximales, mais dans le cas des générateurs PàC, le meilleur rendement est obtenu à la puissance optimale. D'où cette nécessité de mettre en place un système de plusieurs piles afin d'atteindre les résultats escomptés qui est la recherche de meilleur rendement et la satisfaction en puissance.

1.2 Problématique

La présence des piles à combustible dans la production de l'énergie électrique dans les véhicules soulève des préoccupations liées à la performance de la PàC. Les commutations ON/OFF fréquentes de la PàC est la cause principale de la dégradation de sa durée de vie. Et également, affecte les performances du système. De même, lorsque la PàC fonctionne à son rendement maximal, la dégradation est minimisée et la consommation d'hydrogène diminue. Pour pallier à ces défis, il est judicieux de développer un système de commande et gestion de la PàC.

1.3 Méthodologie

Pour atteindre les objectifs fixés ci-dessus, nous avons établi un plan de travail adéquat. La méthodologie à suivre se basera sur la recherche de points de rendements maximaux de chaque pile et le maintien de l'état de charge de l'élément de stockage. Les différentes étapes à suivre sont les suivantes :

- Identification d'un modèle dynamique de PàC

Cette étape permet d'avoir une représentation mathématique de la PàC sur laquelle le contrôle sera effectué. Alors il faudra au préalable définir les variables à mesurer, la structure du modèle et les différents paramètres à identifier. Le modèle à identifier doit tenir compte des différentes variables telles que les pressions, la température, le débit et le courant qui peuvent affecter le rendement de la PàC.

- Identification d'un modèle de convertisseur

Cette étape consiste à faire la modélisation dynamique du convertisseur de puissance de type « Boost » à l'aide de ses équations mathématiques et ses modes de fonctionnement. Cette modélisation permettra de prélever le courant de la pile d'une part et d'autre part d'elever la tension du système.

- Identification d'un modèle de batterie

Étant donné qu'on se donnera pour charge la puissance délivrée par un véhicule, cette étape consiste à la mise en œuvre d'un modèle dynamique de batterie à l'aide de ses équations mathématiques, et sa technologie.

- Réalisation des stratégies de recherche de rendement maximal

Ces stratégies ont pour but d'optimiser le fonctionnement des PàCs afin de déterminer la zone ou les paramètres qui permettent d'avoir un meilleur rendement

- Évaluation de la consommation en hydrogène

Vu que le rendement de la PàC dépend également de la consommation en hydrogène, cette évaluation va permettre de déterminer la stratégie de commande la plus adéquate au système. Donc la stratégie de commande qui demande une faible consommation.

- Développement du système de gestion d'énergie

Le système de gestion d'énergie a pour but de repartir de manière optimale la puissance entre les différentes PàC et la batterie en fonction de la puissance demandée. Ce système prendra en considération les résultats de chacune des stratégies de commandes affectées au système.

- Implémentation

Cette étape consiste à intégrer l'ensemble des éléments précédemment énoncés sous un environnement de simulation tel que Matlab/Simulink.

1. Organisation du mémoire

Pour répondre à la problématique posée dans ce mémoire de maîtrise, le travail sera réparti sur six (6) chapitres.

Le premier chapitre qui est l'introduction, présente le contexte de la recherche, la problématique et les objectifs.

Le second chapitre résume sur l'état de l'art des travaux réalisés sur la commande de systèmes multi-pile et les travaux en cours.

Le troisième chapitre présente sur la modélisation dynamique d'un générateur PàC, la modélisation du convertisseur, la modélisation de la batterie et la modélisation de la commande d'un système PàC. Cette partie représente un tremplin pour le développement des deux chapitres suivants.

Le quatrième chapitre présente le dimensionnement et la stratégie de gestion d'un système à une PàC. Dans ce chapitre, les notions développées dans le chapitre 3 seront

vivement utilisées. Également les différentes stratégies de commande mise en œuvre et l'implémentation de celle-ci sous environnement logiciel. Cette section fera également place à des discussions autour des résultats obtenus.

Le cinquième chapitre présente le dimensionnement d'un système multi PàC et sa stratégie de gestion. Plusieurs stratégies seront développées et feront l'objet d'une étude comparative après différentes implémentations logicielles.

Le sixième chapitre conclura les principaux résultats et projettera les perspectives futures de ce travail de recherche

Chapitre 2 - État de l'art

2.1 Introduction

Afin de résoudre la problématique posée dans le chapitre précédent, il est nécessaire de mener une investigation. Celle-ci a pour but de faire le point sur les avancées ou les développements récents dans les systèmes multi PàC et les techniques utilisées pour la commande. Cela vise également à évaluer les avantages et les limites des différentes stratégies de commande et surtout celles autour du rendement. Cette analyse de l'état de l'art sera un tremplin pour les différentes approches proposées. Nous présenterons à cette suite les topologies de systèmes multi PàC et une revue sur les différentes commandes.

2.2 Présentation d'un système multi-pile à combustible

Comme son nom l'indique, un système multi-pile à combustible est une association de plusieurs piles [3] et leurs systèmes auxiliaires comme présentés en Figure 2-1 (a). Et sous un autre angle, un système de multi PàC peut être assimilé à une mise en commun de plusieurs segments de stacks [4] comme présentés en Figure 2-1 (b).

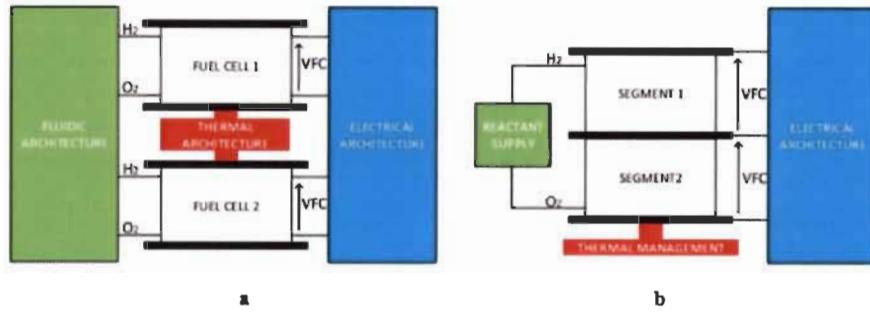


Figure 2-1: Système multi PàC (a) et système multi PàC par segments de stacks [5]

Les investigations menées sur les différentes topologies et configurations de systèmes de multi PàC seront présentées ci-dessous.

Dans les travaux menés dans [5], l'auteur dresse un état de l'art sur les systèmes multi PàC et les systèmes de PàC modulaires. Il porte un vif intérêt sur les domaines d'application et les activités de recherche en cours. Au cours de son analyse, il présente trois architectures de systèmes multi PàC, dotées chacune de plusieurs configurations. On y distingue une architecture électrique (Figure 2-3), une architecture fluidique (Figure 2-2) et une architecture thermique.

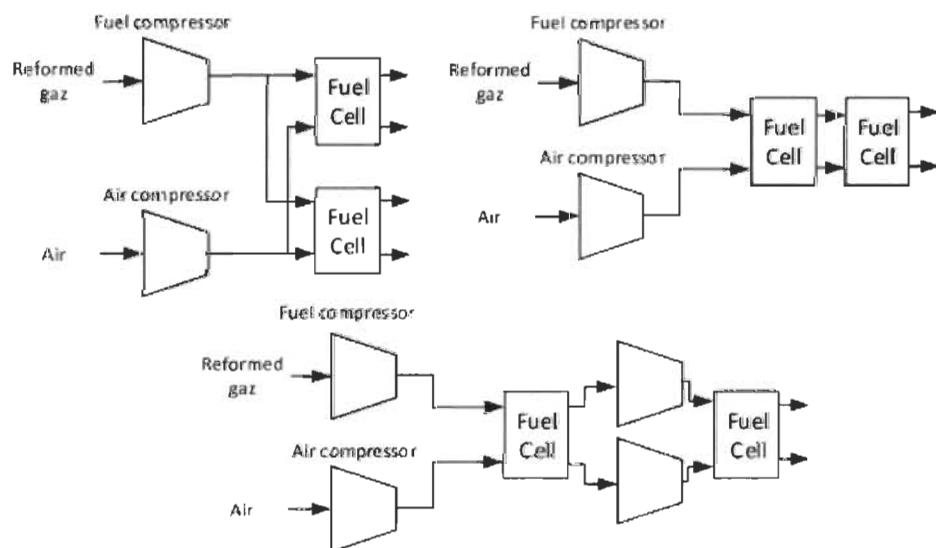


Figure 2-2: Architecture fluidique d'un système multi PàC [3]

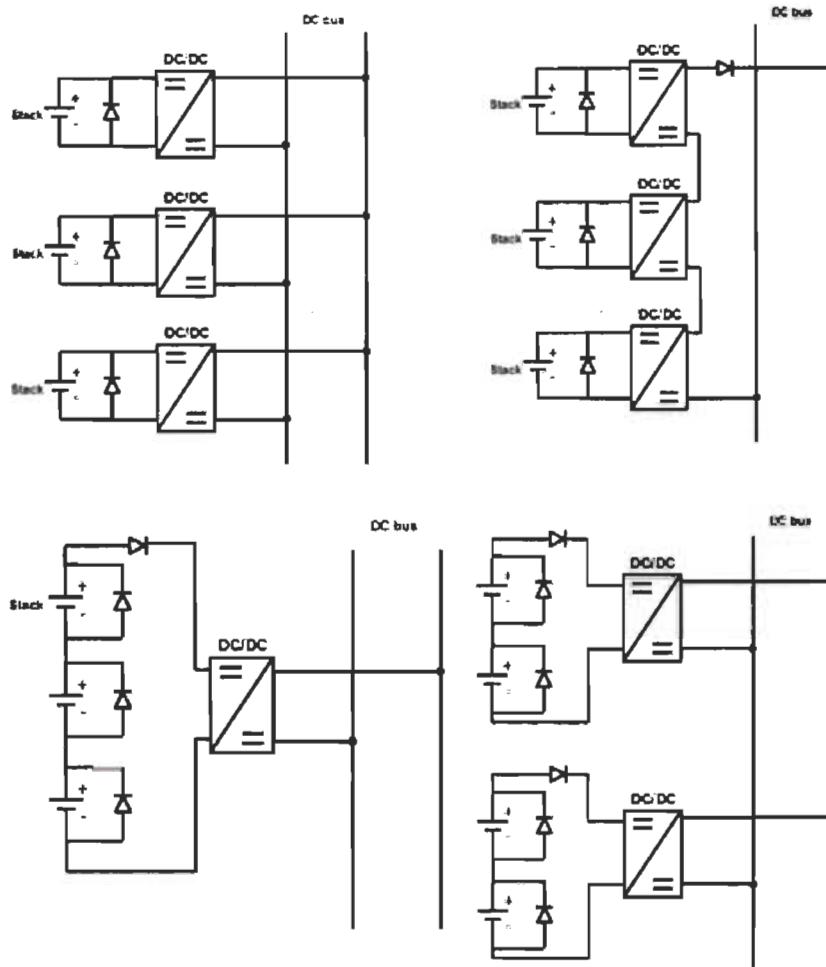


Figure 2-3: Architecture électrique d'un système multi PàC [3]

Mais au stade actuel, l'architecture thermique n'a pas encore fait objet d'étude. Alors l'accent sera mis sur l'architecture fluidique (surtout axée sur les systèmes auxiliaires) et l'architecture électrique. Le but principal n'est pas seulement de présenter des topologies, mais surtout de mettre l'accent sur l'impact de chaque architecture sur les performances du système afin de choisir celle qui correspond mieux au besoin. Également, il se focalise sur l'architecture des éléments de puissances comme les convertisseurs DC/DC afin d'évaluer

quelle configuration serait plus réaliste au niveau du contrôle. Selon [5], et dépendamment de l'architecture choisie, le système le plus performant sera obtenu à travers l'étude de dégradation des piles et de sa consommation en hydrogène. Sans rentrer en profondeur et étant dans le domaine électrique, notre choix se portera sur une architecture électrique d'un point de vue de faisabilité. On y distingue deux cas de figure : une architecture avec convertisseur DC/DC et, une sans convertisseurs et directement connecté au bus DC. Chacune des architectures électriques présente quatre configurations (série, parallèle, série-parallèle et cascade) qui après analyse seront un tremplin dans notre travail. Dans ce travail, seront détaillées uniquement celles qui présente de meilleures performances. D'après l'auteur dans [5], l'architecture électrique avec convertisseurs de puissance et une configuration parallèle présentent un très grand avantage du point de vue du contrôle, faisabilité et satisfaction niveau puissance. Ce type de configuration est très avantageux pour la gestion de l'énergie. Le seul inconvénient réside au niveau du surdimensionnement des inductances. Dans ce travail de maîtrise, plusieurs concepts développés en [5] ont été utilisés. D'autres concepts ont été étudiés dans la littérature dans l'architecture électrique et principalement au niveau de la configuration.

Afin d'augmenter les performances de son système, l'auteur dans ses travaux [6], présente une architecture électrique basée sur le couplage magnétique à haute fréquence avec deux différentes configurations comme présentée en Figure 2-4 (a) pour un assemblage en parallèle et Figure 2-4 (b) pour un assemblage série.

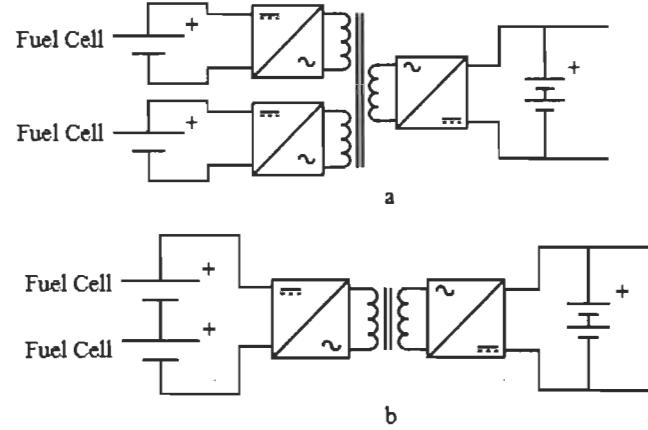


Figure 2-4: Architecture électrique pour un système multi PàC basée sur le couplage magnétique à haute fréquence

Contrairement au concept développé dans [5], niveau architecture électrique avec convertisseur et configuration parallèle, l'on a, à la place de convertisseur DC/DC, un convertisseur DC/AC, un transformateur et un convertisseur AC/DC. Cette étude est menée pour des unités d'alimentation à bord. Également, l'auteur y présente différentes topologies de configurations de convertisseurs de puissances avec les piles, ce qui lui permettra de faire une étude comparative. Dans le cadre de son travail, il utilise deux piles identiques pour conduire ses recherches et table sur une configuration parallèle. Et pour l'auteur, une telle structure, ayant une bonne efficacité, est bien adaptée pour tester et faire fonctionner des piles à combustible dans des modes de fonctionnement normaux et dégradés, qui correspondent à des contraintes réelles à bord d'un véhicule. D'un point de vue implémentation et faisabilité, cette forme de configuration nécessite pas mal de composants d'électronique de puissance, ce qui peut rendre la tâche un peu difficile. Mais dans un autre sens, elle assure une excellente sécurité.

Enfin, dans [7], l'auteur effectue une revue sur les architectures des convertisseurs DC/DC pour des applications de PàC. Ici, l'étude se concentre sur une architecture multi-pile car elle offre une flexibilité, fiabilité et une très bonne efficacité. L'avantage de ce travail se focalise sur les composants systèmes tout en donnant un aperçu complet des interfaces de convertisseur de puissance potentiellement favorables pour les domaines de l'automobile, des chemins de fer, des aéronefs et des petites applications stationnaires. Pour ce faire, il opte pour un design modulaire tant au niveau des piles que des convertisseurs. Cette approche a pour but de déterminer les meilleures opportunités d'architecture par rapports aux exigences imposées. En dépit de tout, sur le plan électrique, nous nous retrouvons dans la même optique de conception qu'en [5] et [6] mais avec des différences au niveaux des convertisseurs.

Puisque le système nécessite d'être contrôlé, une revue sur les différentes stratégies de commande sera investiguée.

2.3 Commande d'un système multi-pile

Après avoir eu un aperçu sur les différentes topologies de systèmes de multi-piles à combustibles, il est maintenant nécessaire de voir en détails les études qui ont été menées sur la commande d'un système multi-pile. Plusieurs études sont orientées toujours dans le domaine du transport et surtout celui des véhicules électriques à hydrogène. La plupart d'entre elles sont axées sur l'hybridation, la dégradation des piles et l'économie en hydrogène. La commande d'un système multi-pile fait également appel aux études de systèmes de gestion d'énergie. Cette approche permettra de définir notre travail autour de la commande et du développement d'un système de gestion d'énergie.

Les récentes études portant sur la commande de systèmes multi-piles ont été sur l'hybridation, la répartition de puissance et le fonctionnement des piles à leur maximum d'efficacité. L'ensemble de ces études ont toujours eu pour applications le domaine du transport (véhicule électrique à hydrogène)

Dans l'étude [8], l'auteur propose le dimensionnement et la gestion énergétique d'un système hybride multi-pile à combustible à batterie pour des applications automobiles. Dans cette étude, il propose une architecture électrique à configuration parallèle avec convertisseur. Son choix se base sur la faisabilité de contrôle indépendant et de la flexibilité. Son système est constitué de quatre piles, d'une batterie et du cœur principal de la commande qui est la gestion énergétique. Ici il est question de répartir la puissance entre les différentes sources et maintenir le niveau de charge dans son état normal (40 – 60 %) pour éviter sa dégradation. En utilisant la redondance système, l'auteur estime que l'on peut réduire la dégradation du système et la consommation en hydrogène. La réduction de la consommation en hydrogène est réalisée en maximisant la durée de fonctionnement à un rendement maximal. De ces hypothèses, il divise le système de gestion en deux parties. Le but de la première partie est de décider s'il faut démarrer une pile à combustible supplémentaire pour augmenter la production d'énergie ou l'arrêter pour arrêter la production d'énergie. La deuxième partie définit le niveau de puissance auquel les piles à combustible fonctionnent. La première partie est accomplie à travers une machine d'état (méthode qui sera utilisée durant l'ensemble de ce travail) comme présenté en Figure 2-5

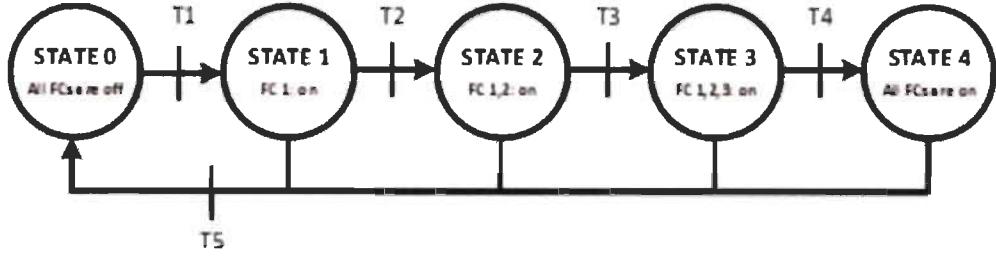


Figure 2-5: Schéma de contrôle du système par machine d'états [8]

Et les transitions entre les différentes étapes

T1: $SoC < 0.550$ ou $P_{load} > P_{BAT,MAX}$

T2: $SoC < 0.500$ ou $P_{load} > P_{BAT,MAX} + P_{1,max}$

T3: $SoC < 0.475$ ou $P_{load} > P_{BAT,MAX} + P_{1,max} + P_{2,max}$

T4: $SoC < 0.450$ ou $P_{load} > P_{BAT,MAX} + P_{1,max} + P_{2,max} + P_{3,max}$

T5: $SoC > 0.600$ et $P_{load} < P_{BAT,MAX}$

En analysant cette stratégie, la batterie est maintenue dans une plage de fonctionnement normal. La deuxième partie de la stratégie de gestion de l'énergie est une stratégie déterministe basée sur des règles. Les niveaux de puissance sont donnés par les règles de l'algorithme 1.

Algorithm 1: Rule based energy management
Let m be the number of operating fuel cells
if $P_{load} > P_{BAT,MAX} + \sum_{i=1}^m P_{i,eff,max}$ then
$P_i = P_{i,eff,max} + \frac{1}{m}(P_{load} - P_{BAT,MAX} - \sum_{i=1}^m P_{i,eff,max})$
else if $SoC > 0.550$ then
$P_i = P_{i,eff,max} + \frac{SoC - 0.550}{0.6 - 0.550}(P_{i,min} - P_{i,eff,max})$
else if $SoC < 0.425$ then
$P_i = P_{i,max}$
else
$P_i = P_{i,eff,max}$
end

Figure 2-6: Stratégie de contrôle basée sur les règles de gestion de bases [8]

En suivant cette logique, les piles devront fonctionner à leur maximum d'efficacité. De cela, le système présente un avantage significatif dans la consommation en hydrogène avec un fort taux d'hybridation. Mais la contrainte réside dans le fait que les piles doivent fonctionner près de leur point de meilleur rendement à défaut de quoi cette stratégie reste caduque. A long terme, cette méthode présentera un défaut car le point de meilleur rendement se déplacera généralement à cause de l'environnement de fonctionnement ou de la dégradation de la pile. Également si cette méthode devrait toujours rester à l'étude, de nouvelles dispositions devraient être en considération comme la mise en place de tests continuels hors ligne pour repérer le meilleur rendement. De cette façon, elle devient très onéreuse et peu ergonomique. C'est l'une des raisons pour laquelle il serait important de développer une stratégie de gestion qui traque en temps réel le point de meilleur rendement.

Plusieurs autres approches de contrôles ont été développées mais toutes ne visent pas le fonctionnement des piles au meilleur rendement mais peuvent servir de levier dans ce travail.

C'est ainsi que Garcia dans [9], propose une stratégie de répartition de puissance dans l'optique d'optimiser le rendement d'un système multi PàC. Contrairement à [8], où l'optimisation du rendement est local, l'auteur en [9] se focalise sur une recherche de rendement global et opte pour une architecture électrique parallèle avec convertisseur. Cette méthodologie de recherche de rendement global a pour but de réduire le risque de défaillance générale c'est-à-dire les périodes de fonctionnement ON/OFF des piles. Son étude se base sur les données expérimentales de la puissance vs la courbe de rendement et également de d'autres données comme le débit d'hydrogène, la tension de la pile et son courant. A partir de ses données, il utilisera les techniques d'approximations polynomiales

pour développer de modèles simplifiés. De ce fait, le rendement sera exprimé en fonction de la puissance, la tension de la pile en fonction du courant et le débit en hydrogène en fonction du courant. Une fois chaque fonction définie, l'auteur propose trois algorithmes de répartition de puissance :

- Équi-distribution de puissance : chaque pile du système fournit la même puissance.
- Algorithme *daisy chain*. La pile numéro n s'active lorsque la pile $n-1$ atteint sa puissance maximale
- Algorithme de répartition de la puissance optimale

Le résultat de chaque algorithme peut être formulé sous forme de distribution équivalente selon le critère k_d , qui représente un vecteur de dimension équivalent au nombre de piles dans le système (2-1). Travaillant avec cinq piles identiques, il établit que la puissance de chaque pile est définie par l'équation (2-2) et le schéma de distribution est présenté en Figure 2-7

$$k_d = \begin{bmatrix} k_{d1} \\ k_{d2} \\ k_{d3} \\ k_{d4} \\ k_{d5} \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad \sum_{n=1}^5 k_{dn} = 1 \quad (2-1)$$

$$P_n = k_{dn} P_{tot}, n = 1..5, P_n \text{ puissance pile } n, P_{tot} \text{ puissance totale} \quad (2-2)$$

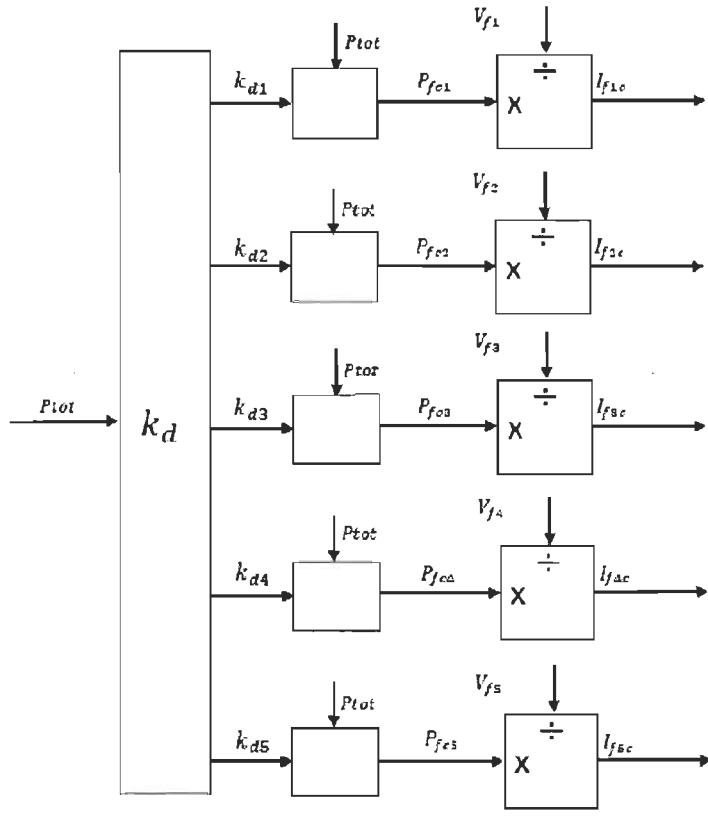


Figure 2-7:Principe de distribution de puissance [9]

Pour mieux travailler, l'auteur part d'une hypothèse selon laquelle toutes les piles possèdent la même puissance et la même efficacité. De ce fait, on aura pour un algorithme d'équi-distribution $k_{d1..5} = 1/5$, et pour un algorithme de *daisy chain*, la structure représentée en Figure 2-8. Chaque pile entrera en opération lorsque celle qui la précède atteindra sa puissance maximale.

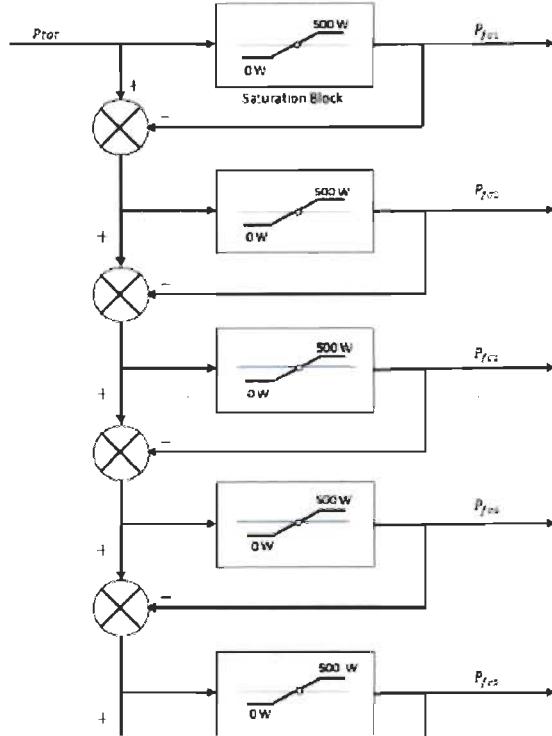


Figure 2-8: Principe de répartition de puissance par *daisy chain* [9]

Pour notre travail, cette méthode pourrait utiliser la puissance optimale dans les phases d'activation.

En ce qui concerne la réparation optimale de puissance, l'auteur se pose deux hypothèses

- Les cinq piles sont identiques (dans son cas 500W)
- Les conditions de fonctionnement des piles sont statiques.

Le but de cet algorithme sera de déterminer la valeur des coefficients $k_{d1..5}$ qui maximisent l'efficacité pour une puissance de charge demandée. Pour chaque

puissance demandée, on maximise l'efficacité en agissant sur les coefficients $k_{d1..5}$.

Pour ce faire, l'auteur se fixe deux contraintes :

- La somme des puissances de sorties de chaque pile devrait être égale à la puissance demandée
- Chaque pile ne pourra fournir plus de sa puissance maximale qui est de 500 W dans son étude.

Une fois les contraintes définies, l'auteur formule le problème d'optimisation par :

$$F = \max_{k_{d1}, k_{d2}, k_{d3}, k_{d4}, k_{d5}} Efficiency(P_{tot}) \quad (2-3)$$

$$0 \leq k_{d1}, k_{d2}, k_{d3}, k_{d4}, k_{d5} \leq \frac{500}{P_{tot}} \quad (2-4)$$

$$k_{d1} + k_{d2} + k_{d3} + k_{d4} + k_{d5} = 1 \quad (2-5)$$

$$\text{Avec } Efficiency(P_{tot}) = \frac{P_{tot}}{LHV \times Flow_{H2}(k_{d1}, k_{d2}, k_{d3}, k_{d4}, k_{d5})} \quad (2-6)$$

L'approche ci-dessus présente de meilleurs résultats et nous permettra dans le cadre de notre travail de recherche de réaliser une optimisation locale multi-objective avec différentes piles.

Dans [10] et [11], les auteurs s'intéressent aux véhicules électriques alimentés par un système multi PàC. En [10], l'auteur utilise les mêmes principes développés précédemment, mais fait intervenir la gestion de la batterie dans l'optimisation du système. C'est le niveau de charge des batteries qui fixe le fonctionnement des piles et l'objectif principal est de montrer les bienfaits de l'utilisation d'un système multi PàC dans les

applications transports. En [11], dans le cadre de ses travaux de thèse, l'auteur présente un système multi PàC à deux piles alimentant un véhicule. Contrairement aux autres travaux, ici on étudie les deux architectures électriques (série et parallèle) et le contrôle est réalisé en utilisant les règles de bases en gestion énergétique. Les règles de bases sont définies dans les deux cas de figure pour maintenir l'état de charge des batteries dans leurs plages de fonctionnement et de faire fonctionner les piles du système autour de leurs puissances optimales et maximales. Cette étude met également en évidence l'importance de l'hybridation dans les systèmes multi PàC et de ce fait propose un vaste éventail d'algorithmes qui empêchent nécessairement les piles de se désactiver durant les phases de récupération d'énergie comme on le remarque ailleurs. Ici, les piles fonctionnent à une puissance minimale représentant environ 10 % de puissance optimale ou maximale.

En dépit de tous ces développements, il serait plus aisé de pouvoir mettre en œuvre un système qui généralise la commande de systèmes de multi-source afin de faire fonctionner chacune d'elles à leur meilleur point de rendement.

C'est ainsi que l'auteur dans ses travaux en [12], propose une approche générale de recherche de points de maximum d'efficacité pour un système contenant plusieurs sources en utilisant la méthode des multiplicateurs de Lagrange. À partir de ses travaux réalisés en [13], sur le fonctionnement au maximum de puissance de chacune des sources d'un système multi source, il transplante cette stratégie au niveau de la recherche des points de maximum d'efficacité avec une spécificité sur les convertisseurs. Cette approche permettra de faire fonctionner chaque source et chacun de leur convertisseur dans les meilleures conditions de rendement. Cette technique sera plus avantageuse dans des applications décentralisées qui ne nécessitent pas de stockage d'énergie.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, une revue littérature a été présentée sur les travaux concernant les systèmes de multi PàC. Il a été question de présenter les différentes topologies de systèmes multi PàC et également les différentes stratégies de commande qui ont été développées au stade actuel. L'ensemble des travaux présentés permettra de définir les différentes bases et approches dans la réalisation de ce travail de maîtrise. Ayant pu desceller les avantages et inconvénients dans les travaux précédemment effectués, nous nous attèlerons sur les configurations ou architectures présentant de meilleures performances.

Chapitre 3 - Modélisation et commande d'un système pile à combustible

3.1 Introduction

Ce chapitre portera sur la modélisation et la commande des PàCs. Étant donné que notre travail porte sur des systèmes de multi PàC, nous ferons la modélisation de plusieurs PàCs, tout comme leur commande. En ce qui concerne la modélisation, nous partirons d'un modèle de pile pour en modéliser les autres ou nous pourrions modéliser plusieurs différents modèles à partir de données de différents constructeurs. De ce fait, il existe plusieurs choix ; mais nous nous focaliserons sur une modélisation par représentation mathématique de la pile à l'aide de ses différentes équations dynamiques. Au niveau de la commande, elle sera développée autour de la recherche du meilleur point de rendement de la pile. Dans ce chapitre, nous présenterons les différentes technologies de PàC et notre choix, la modélisation des différentes piles et les différentes commandes qui s'offrent à nous.

3.2 Choix technologique

Les différents types de PàC sont généralement répertoriés et classés soit en fonction de la nature de l'électrolyte utilisé dans les empilements, soit en fonction de la température de fonctionnement [2]. Au niveau température, on distingue les piles à basse température

(température pouvant atteindre les 90 °C), les piles à moyenne température (température pouvant atteindre les 200 °C) et les piles à haute température (température pouvant atteindre les 600 °C et 800 °C). Les piles à basse température sont des piles alcalines (AFC: Alkaline Fuel Cell), les piles à membranes échangeuses de protons (PEMFC : Proton Exchange Membrane Fuel Cell ou PEFC: Polymer Electrolyte Fuel Cell) et les piles directement alimentées en méthanol (DMFC : Direct Methanol Fuel Cell). Dans la catégorie moyenne température, on a les piles à acide phosphorique (PAFC : Phosphoric Acid Fuel Cell). Quant aux piles à haute température de fonctionnement, on a les piles à carbonates fondus (MCFC : Molten Carbonate Fuel Cell) et les piles à oxyde solide (SOFC : Solid Oxide Fuel Cell) [14].

Pour des raisons essentiellement liées à la fiabilité et à des contraintes d'industrialisation en grande série, le concept d'électrolyte solide est le plus attractif : c'est la raison pour laquelle se dessine aujourd'hui un consensus large pour privilégier deux filières, celle des PàC à acide polymère (PEMFC) et celle des piles à oxyde solide (SOFC).

Dans ce travail, nous nous intéresserons qu'aux piles PEM. Ayant pour accent le transport dans ce travail, cette technologie apparaît actuellement comme la meilleure alternative dans ce domaine, et ce pour deux avantages majeurs. Le premier provient de l'utilisation d'une membrane solide qui contrairement aux électrolytes liquides doit garder une meilleure stabilité de fonctionnement lorsque le stack est soumis à diverses vibrations mécaniques. Le second point fort de la technologie PEM provient de sa basse température de fonctionnement. Celle-ci permet une mise en température relativement rapide et donc, dans le cas d'une application transport, des temps de démarrage réduits [15]. En explorant les diverses avancées dans les applications avec des PàC ; de plus en plus de centres de

recherche et développement à travers le monde concentrent actuellement de grands efforts sur la technologie PEM. C'est ainsi qu'en 2014, l'industriel français Areva, l'ADEME (agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) et la société SMART Energies ont lancé conjointement la création d'une coentreprise Areva H2-Gen. Ce projet de coentreprise a pour objectif la fabrication et la commercialisation d'électrolyseurs à membrane à échange de protons (PEM) [16]. Également, le département de l'énergie des USA (DOE) présente dans son rapport annuel sur le marché de la technologie des PàC de 2014 les différents apports investir dans le développement de la technologie PEM. Investissement qui se chiffre à hauteur de 120 millions de dollars[17]. D'un point de vue général, les recherches visent essentiellement à augmenter les performances globales du système PàC (en termes de rendement, de durée de vie, de fiabilité, de compacité, de masse) et à diminuer les coûts. Selon les récentes informations du DOE datant de 2017, aujourd'hui un système PàC coûte environ 53 \$/kW pour véhicules légers et prévoit horizon 2020 de ramener ce prix à 40 \$/kW. Ce qui démontre une incitation réelle pour le développement de la technologie PEM pour les futures applications [18]. Au vu des différents intérêts pour la technologie PEM, nous utiliserons cette technologie pour la suite de notre travail et donc la modélisation sera présentée dans la section suivante.

3.3 Modélisation d'une pile à combustible à membrane échangeuse de protons

Comme présenté en introduction, une PàC PEM est un générateur qui transforme directement et de façon continue l'énergie chimique en énergie électrique via un procédé électrochimique. Ainsi, nous modéliserons quatre piles qui pourront être identiques ou non (pour un système de multi PàC) ; mais dans le cadre de notre travail, toutes les piles seront

de puissances différentes. De ce fait, une question se pose : *pourquoi choisir des piles de différentes puissances ?*

Le choix des piles de différentes puissances permet de mieux observer la caractéristique rendement en fonction de la puissance et d'évaluer les performances du système surtout que ces dernières ne présentent pas les mêmes points de rendement. Un autre avantage réside dans l'apport en puissance et également le nombre de piles que l'on pourrait avoir dans le système. Alors deux approches de modélisation peuvent être évoquées : se servir de la modélisation d'une PàC pour en modéliser les autres à puissances variables ou procéder à quatre modélisations. Dans ce travail, nous partirons sur l'approche de modélisation de quatre piles, toutes de puissances différentes. Ces quatre PàC à modéliser sont : la PàC SR-12 500W d'une puissance de 500W du constructeur Avista Labs, la BCS 500 W Stack d'une puissance de 500W du constructeur BCS Technologies, la PàC Nixa 1200W d'une puissance de 1200W du constructeur Ballard et enfin d'une PàC générique d'une puissance de 700 W.

3.3.1 Modélisation d'une PàC SR-12 500W

La modélisation de cette PàC passera par la modélisation de sa tension en circuit ouvert, des pertes irréversibles en tension, des pressions partielles en hydrogène et oxygène, et de la température.

3.3.1.1 Tension en circuit ouvert de la PàC à échange de protons

La PàC à membrane échange de protons consiste à une membrane d'échange de protons placée entre deux électrodes qui sont recouvertes de catalyseurs en platine [19]. Utilisant un système Hydrogène/Air, l'hydrogène est fourni à l'anode et l'air, sous forme d'oxygène

est fourni à la cathode. A l'anode, l'hydrogène, en présence de catalyseur de Platinum, est ionisé en charges positives d'hydrogène et charges négatives d'électron. L'ensemble de réactions chimiques en découlant sont exprimées comme suit :

- Réaction d'oxydation à l'anode [20]



- Réaction de réduction à la cathode [20]



En combinant les équations (3-1) et (3-2), on obtient l'équation suivante :



Le potentiel électrique de transformation d'une cellule peut être calculé à partir des changements au sein de l'énergie libre de Gibbs [20],[21] :

$$E^{cell} = -\frac{\Delta G}{2F} \quad (3-4)$$

La variation au de l'énergie libre de Gibbs est donnée par :

$$\Delta G = \Delta G^0 - RT_{fc} \ln \left[\frac{P_{H_2} \cdot (P_{O_2})^{0.5}}{P_{H_2O}} \right] \quad (3-5)$$

En remplaçant (3-5) dans (3-4), nous obtenons

$$E^{cell} = \left(-\frac{\Delta G^0}{2F} \right) + \frac{RT_{fc}}{2F} \ln \left[\frac{P_{H_2} \cdot (P_{O_2})^{0.5}}{P_{H_2O}} \right] \text{ et en posant } E_0^{cell} = -\frac{\Delta G^0}{2F}, \text{ on obtient}$$

$$E^{cell} = E_0^{cell} + \frac{RT_{fc}}{2F} \ln \left[\frac{P_{H_2} \cdot (P_{O_2})^{0.5}}{P_{H_2O}} \right] \quad (3-6)$$

La tension en circuit ouvert d'une cellule de la PàC est symbolisée par E^{cell} . On peut considérer que ce paramètre d'une cellule individuelle permettra d'obtenir la tension totale

en circuit ouvert de la PàC [20]. Par conséquent, la tension en circuit ouverte de la PàC peut être exprimée comme :

$$V_{0,FC} = N_s E^{cell}$$

$$V_{0,FC} = N_s E_0^{cell} + N_s \frac{RT_{fc}}{2F} \ln \left[\frac{P_{H_2} \cdot (P_{O_2})^{0.5}}{P_{H_2O}} \right] \quad (3-7)$$

Cette tension représente également la tension maximale qu'une PàC peut produire, et cette tension sera toujours plus petite que ce maximum à cause des différentes pertes dans le système. Ces différentes pertes sont généralement les pertes irréversibles de tensions dans la PàC.

3.3.1.2 Pertes de tensions irréversibles dans une PàC

La tension de sortie actuelle de la PàC dans les conditions de fonctionnement normal est déterminée par les pertes de tension irréversibles, également connues sous le nom de polarisation, qui a lieu au sein de la PàC [20]. Ainsi, on distingue trois (3) types de pertes de tension : pertes d'activation, pertes ohmiques, pertes de concentration.

3.3.1.2.1 Les pertes d'activation

Ces pertes sont causées par la lenteur des réactions qui se produisent à la surface des électrodes de la PàC [20]. Ces pertes sont dominantes durant de faible densité de courant (ex : au début de la courbe caractéristique V-I de la PàC) [22]. Les pertes d'activation pour une seule cellule de PàC peuvent être modélisées selon le modèle basé sur les équations de Tafel, et les équations empiriques de la tension de perte d'activation comme ci-dessous [23], [24], [20]:

$$V^{Act} = \frac{RT_{fc}}{2F} \ln\left(\frac{I_{fc}}{I_d}\right) = a_0 + T_{fc} \cdot [a + b \ln(I_{fc})] \quad (3-8)$$

Le terme $(a_0 + aT_{fc})$ représente la tension de perte dépendant de la température et le terme $T_{fc} \cdot b \ln(I_{fc})$ représente la perte de tension due à l'activation; basée sur le courant et la température.

La résistance équivalente d'activation R^{Act} correspondant aux pertes de tension due à l'activation peut être approximée en divisant le terme $T_{fc} \cdot b \ln(I_{fc})$ dans l'équation (3-8) par I_{fc} [22].

3.3.1.2.2 Pertes ohmiques

Les pertes ohmiques sont dues à la résistance de la PàC qui inclue la résistance de l'anode et de la cathode due à l'imperfection de la conception de l'électrode et la résistance de la membrane en polymère due aux mouvements des ions [25]. La résistance ohmique de la PàC peut s'exprimer comme

$$R^0 = R_C^0 + R^C + R^M \quad (3-9)$$

La tension de pertes ohmiques pour une unique PàC peut s'exprimer comme [24]

$$V^0 = I \cdot R^0 = V_A^0 + V_C^0 + V_M^0 \quad (3-10)$$

Les résistances des électrodes dépendent du courant et la température de la PàC, et par conséquent la résistance ohmique de la PàC peut également être calculée selon l'expression suivante :

$$R^0 = R_C^0 + K_I \cdot I_{fc} + K_T \cdot T_{fc} \quad (3-11)$$

3.3.1.2.3 Pertes de concentration

Les pertes de concentration existent à cause de la formation de gradients de concentration des réactants à la surface des électrodes [25]. Le surplus de consommation en hydrogène réduise les concentrations d'hydrogène et d'oxygène à différents points dans les canaux de gaz de la PàC [22]. Les pertes de concentration pour une cellule de la PàC peuvent être donnée par :

$$V^{Conc} = -\frac{RT_{fc}}{eF} \ln \left(1 - \frac{I_{fc}}{I_L} \right) \quad (3-12)$$

La résistance équivalente de concentration R^{Conc} correspondant aux pertes de tension due à la concentration peut être approximée en divisant l'équation (3-12) par I_{fc} [22]. Également le courant limite de la PàC est déterminé par le taux de consommation du combustible et du taux de fourniture du combustible. Par conséquent, les pertes de concentration augmentent de façon significative avec de forts courants, quand le combustible est consommé à de très hauts taux.

Par conséquent, la tension de sortie actuelle de la PàC dans les conditions normales de fonctionnement est donnée en soustrayant les tensions de pertes à la tension en circuit ouvert d'une cellule de PàC comme suit :

$$V_{FC} = V_{0,FC} + N_S \cdot (V^{Act} + V^0 + V^{Conc}) \quad (3-13)$$

3.3.1.3 Humidification de la PàC

Dans la PàC, la conduction des ions hydrogène à travers la membrane de polymère dépend de l'humidité de la membrane. La résistance ohmique de la membrane (R^M)

augmente au fur à mesure que la membrane s'assèche [20]. Par conséquent, il est important que la membrane reste humidifiée pour un fonctionnement efficace de la PàC. De ce fait, l'hydrogène et l'air sont envoyés à travers l'humidificateur avant d'atteindre les électrodes. L'humidité relative à l'anode et la cathode de la PàC peut être exprimée comme suit [26]:

$$\phi_a = \frac{(P_{H_2O})_{in}^a}{P_{H_2O}^{sat}}, \quad \phi_c = \frac{(P_{H_2O})_{in}^c}{P_{H_2O}^{sat}}$$

Le transfère total de vapeur à travers la membrane de polymère est donné par [27]:

$$(m_V)_M = M_V \cdot A_S \cdot N_S \left(\frac{n_d I_d}{F} - \frac{\phi_a - \phi_c}{t_m} \right) \quad (3-14)$$

3.3.1.4 Conservation de masse et conservation d'énergie thermodynamique dans la PàC

Le débit molaire net d'oxygène à la cathode est la différence entre débit molaire d'oxygène venant à l'intérieur d'une cellule et le débit molaire d'oxygène sortant de la cellule. Le flux d'oxygène et d'hydrogène dans la PàC ne peuvent suivre les changements de charge de façon instantanée, et il existe un temps de latence entre la variation du courant de la charge, et le flux d'oxygène et d'hydrogène [20].

Le flux molaire net de l'oxygène à la cathode est donnée par [24], [20]:

$$\begin{aligned} \frac{d(m_{O_2})_{net}}{dt} &= \frac{1}{\lambda_C} \left[\frac{I_{fc}}{4F} - (m_{O_2})_{net} \right] \\ (m_{O_2})_{net} &= \left(-\frac{1}{\lambda_C} \right) (m_{O_2})_{net} + \left(\frac{1}{4\lambda_C F} \right) I_{fc} \end{aligned} \quad (3-15)$$

De façon similaire, Le flux molaire net de l'hydrogène à l'anode est donnée par [24], [20]:

$$\frac{d(m_{H_2})_{net}}{dt} = \frac{1}{\lambda_A} \left[\frac{I_{fc}}{2F} - (m_{H_2})_{net} \right]$$

$$(m_{H_2})_{net} = \left(-\frac{1}{\lambda_A} \right) (m_{H_2})_{net} + \left(\frac{1}{2\lambda_A F} \right) I_{fc} \quad (3-16)$$

La conservation de masse de l'eau est donnée en soustrayant le flux molaire net de la vapeur d'eau à travers une cellule du flux d'eau générée dans la cellule [28], [20]

$$\frac{d(m_{H_2O})_{net}}{dt} = \frac{1}{\lambda_C} \left[\frac{I_{fc}}{2F} - (m_{H_2O})_{net} \right]$$

$$(m_{H_2O})_{net} = \left(-\frac{1}{\lambda_C} \right) (m_{H_2O})_{net} + \left(\frac{1}{2\lambda_C F} \right) I_{fc} \quad (3-17)$$

Les équations dynamiques de la pression partielle d'hydrogène peuvent être écrites sur la base de la loi des gaz parfait $P \cdot V = nRT$ comme [24], [28], [29]

$$\frac{dP_{H_2}}{dt} = \left(\frac{RT_{fc}}{V_a} \right) \cdot (m_{H_2})_{in} - \left(\frac{RT_{fc}}{V_a} \right) \cdot (m_{H_2})_{out} - \left(\frac{RT}{V_a} \right) \frac{I_{fc}}{2F} \quad (3-18)$$

$(m_{H_2})_{in}$ et $(m_{H_2})_{out}$ peuvent être exprimées en terme de pression d'entrée du canal d'hydrogène comme [24], [28], [29] :

$$(m_{H_2})_{in} = \frac{(m_{H_2O})_{in}^a}{(P_{H_2O})_{in}^a} \cdot \mu_{p_A}, (m_{H_2})_{out} = \frac{(P_{H_2} - \mu_{p_A})}{\mu_{p_A}} \quad (3-19)$$

$$(m_{H_2})_{in} \cdot \frac{(P_{H_2} - \mu_{p_A})}{\mu_{p_A}}$$

En remplaçant l'équation (3-19) dans l'équation (3-18) et en résolvant, on obtient alors

$$\dot{P}_{H_2} = 2 \cdot \left[\frac{R \cdot (m_{H_2 O})_{in}^a \cdot T_{fc}}{V_a \cdot (P_{H_2 O})_{in}^a} \right] \cdot \mu_{p_A} - 2 \cdot \left[\frac{R \cdot (m_{H_2 O})_{in}^a \cdot T_{fc}}{V_a \cdot (P_{H_2 O})_{in}^a} \right] \cdot P_{H_2} - \frac{RT}{2V_a F} \cdot I_{fc} \quad (3-20)$$

De façon similaire, l'équation dynamique de la pression partielle d'hydrogène est donnée par :

$$\dot{P}_{O_2} = 2 \cdot \left[\frac{R \cdot (m_{H_2 O})_{in}^c \cdot T_{fc}}{V_c \cdot (P_{H_2 O})_{in}^c} \right] \cdot \mu_{p_C} - 2 \cdot \left[\frac{R \cdot (m_{H_2 O})_{in}^c \cdot T_{fc}}{V_c \cdot (P_{H_2 O})_{in}^c} \right] \cdot P_{O_2} - \frac{RT}{4V_c F} \cdot I_{fc} \quad (3-21)$$

Le taux de changement de la pression partielle de l'eau dépend du flux molaire net de l'eau à travers la cellule et le flux d'eau générée durant la réaction à la cathode [24],[28],[29]. Il est donné par l'équation suivante :

$$\dot{P}_{H_2 O} = 2 \cdot \left[\frac{R \cdot (m_{H_2 O})_{in}^c \cdot (P_{H_2 O}^{in} - P_{H_2 O})}{V_c \cdot (P_{H_2 O})_{in}^c} \right] + 2 \cdot \left(\frac{RT_{fc}}{4V_c F} \right) \cdot I_{fc} \quad (3-22)$$

3.3.1.5 Génération de la chaleur

Une réaction électrochimique se produit dans la PàC, la température de PàC assemblée augmente [30]. L'augmentation nette de la température de la PàC assemblée est donnée par l'équation (3-23) comme suit [30] :

$$\frac{dT_{fc}}{dt} = \frac{1}{M_{fc} C_{fc}} \left(\frac{dQ_c}{dt} - \frac{dQ_E}{dt} - \frac{dQ_L}{dt} \right) \quad (3-23)$$

La génération de chaleur lors d'une réaction électrochimique est une fonction de la variation de l'énergie libre de Gibbs, et la vitesse de consommation de la masse molaire de l'hydrogène au cours de la réaction [30].

$$\frac{dQ_c}{dt} = \Delta G \cdot \left(\frac{N_s I_{fc}}{2F} \right)$$

$$\Rightarrow \frac{dQ_c}{dt} = \frac{N_s \Delta G^0}{2F} - \frac{N_s \cdot R \cdot T_{fc}}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} \cdot (P_{O_2})^{0.5}}{P_{H_2O}} \right) \quad (3-24)$$

La génération de chaleur due à une puissance de sortie électrique de la pile à combustible MEP est fonction du courant de tension de sortie et d'empilement de la pile à combustible MEP [30] :

$$\frac{dQ_E}{dt} = V_{fc} \cdot I_{fc}$$

$$\Rightarrow \frac{dQ_E}{dt} = N_s \cdot [E_0^{Cell} + \frac{RT_{fc}}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} \cdot (P_{O_2})^{0.5}}{P_{H_2O}} \right)] - V^{Act} - V^0 - V^{Conc} \quad (3-25)$$

La perte de chaleur due à la convection de l'air peut être donnée par l'équation (3-26) en tant que [30] :

$$\frac{dQ_L}{dt} = (T_{fc} - u_{T_R}) \cdot h_s \cdot N_s \cdot A_s$$

$$\Rightarrow \frac{dQ_L}{dt} = (h_s \cdot N_s \cdot A_s) \cdot T_{fc} - (h_s \cdot N_s \cdot A_s) \cdot u_{T_R} \quad (3-26)$$

En substituant les équations (3-24), (3-25) et (3-26) dans l'équation (3-23), nous pouvons écrire :

$$\frac{dT_{fc}}{dt} = \left[-\frac{h_s \cdot N_s \cdot A_s}{M_{fc} C_{fc}} \right] \cdot T_{fc} - N_s \cdot [E_0^{Cell} + \frac{RT_{fc}}{2F} \ln \left(\frac{P_{H_2} \cdot (P_{O_2})^{0.5}}{P_{H_2O}} \right)] - V^{Act} - V^0 - V^{Conc} + \left[-\frac{h_s \cdot N_s \cdot A_s}{M_{fc} C_{fc}} \right] \cdot u_{T_R} \quad (3-27)$$

3.3.1.6 Formation d'une double couche de charge dans la cellule

Dans la pile à combustible MEP, en raison de la présence d'une membrane polymère, des électrons s'écoulent de l'anode vers la cathode par l'intermédiaire d'un circuit externe, tandis que les ions positifs d'hydrogène peuvent atteindre la cathode à travers la membrane polymère. Par conséquent, les deux couches chargées de polarités opposées sont formées au niveau de la cathode. Cette double couche de charge peut stocker une charge électrique, et se comporte comme un condensateur [20].

Par conséquent, la tension formée en raison de cette double couche de charge prendra un certain temps pour répondre à des changements soudains de courant. De ce fait, dans la pile à combustible MEP, lorsque le courant augmente par l'augmentation soudaine de la charge, la tension de sortie baisse immédiatement à cause de la baisse à travers la résistance R^0 de la pile. Alors la tension atteint sa nouvelle valeur d'une manière exponentielle, en raison de la capacité de la double couche de charge [24], [20].

La charge électrique formée au niveau de la cathode peut être modélisé par le condensateur tel que représenté sur la figure ci-dessous Figure 3-1 [20].

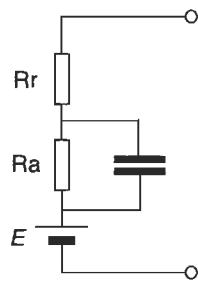


Figure 3-1: Modèle équivalent du circuit de la PàC [20]

La capacité due à l'effet de la double couche de charge est une fonction de la surface de la cathode A_s , la distance entre les deux couches chargées dl , et la valeur de permittivité ϵ . La valeur électrique de la capacité est donnée par [20]

$$C = \epsilon \left(\frac{A_s}{dl} \right) \quad (3-28)$$

La tension aux bornes du condensateur est donnée à titre [20] par :

$$V_C = \left(I - C \frac{dV_C}{dt} \right) (R^{Act} + R^{Conc}) \Rightarrow \frac{dV_C}{dt} = \left[-\frac{1}{C(R^{Act} + R^{Conc})} \right] \cdot V_C + \left[\frac{1}{C} \right] I_{fc} \quad (3-29)$$

L'effet de la formation de la double couche de charge peut être incorporé dans la tension de sortie de la pile à combustible PEM. Alors, l'équation de la tension de sortie donnée par l'équation (3-12) peut être réécrite comme :

$$V_{fc} = N_S E_0^{Cell} + N_S \frac{RT_{fc}}{2F} \ln \left[\frac{P_{H_2} \cdot (P_{O_2})^{0.5}}{P_{H_2O}} \right] - N_S (a_0 + a \cdot T_{fc}) - N_S V_C - (N_S R^0) I_{fc} \quad (3-30)$$

Les paramètres du modèle de pile à combustible PEM utilisée dans la simulation sont indiqués dans Tableau 3-1 [23], [31], [32]

$A_s = 3,2 \cdot 10^{-2} m^2$	$M_{fc} = 44 kg$
$a = -3,08 \cdot 10^{-3} V/K$	$(m_{H_2O})_{in}^a = 8,614 \cdot 10^{-5} mol/s$
$a_0 = 1,3697 V$	$(m_{H_2O})_{in}^c = 8,614 \cdot 10^{-5} mol/s$
$b = 9,724 \cdot 10^{-5} V/K$	$n_s = 48$

$C_{fc} = 500 \text{ J}/(\text{molK})$	$R = 8,31 \text{ J}/(\text{molK})$
$E_0^{Cell} = 1,23 \text{ V}$	$R_c^0 = 0.28 \Omega$
$e = 2$	$V_a = 10^{-3} \text{ m}^3$
$F = 96487 \text{ C/mol}$	$V_c = 10^{-3} \text{ m}^3$
$\Delta G^0 = 237,2 \cdot 10^3 \text{ J/mol}$	$\lambda_A = 60 \text{ s}$
$h_s = 37,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	$\lambda_C = 60 \text{ s}$
$K_I = 1,87 \cdot 10^3 \Omega/A$	$(P_{H_2O})_{in}^a = 1 \text{ atm}$
$K_T = 1,87 \cdot 10^3 \Omega/A$	$(P_{H_2O})_{in}^c = 1 \text{ atm}$

Tableau 3-1: Paramètre de la PàC à MEP

3.3.1.7 Simulation de notre modèle de PàC

Pour tester le fonctionnement de la pile, on utilisera deux profils de courant de charge en situation réelle. Ces tests se feront en régime permanent et régime transitoire. Le profil de courant de charge en régime permanent et transitoire de la pile sont présentés à la Figure 3-2

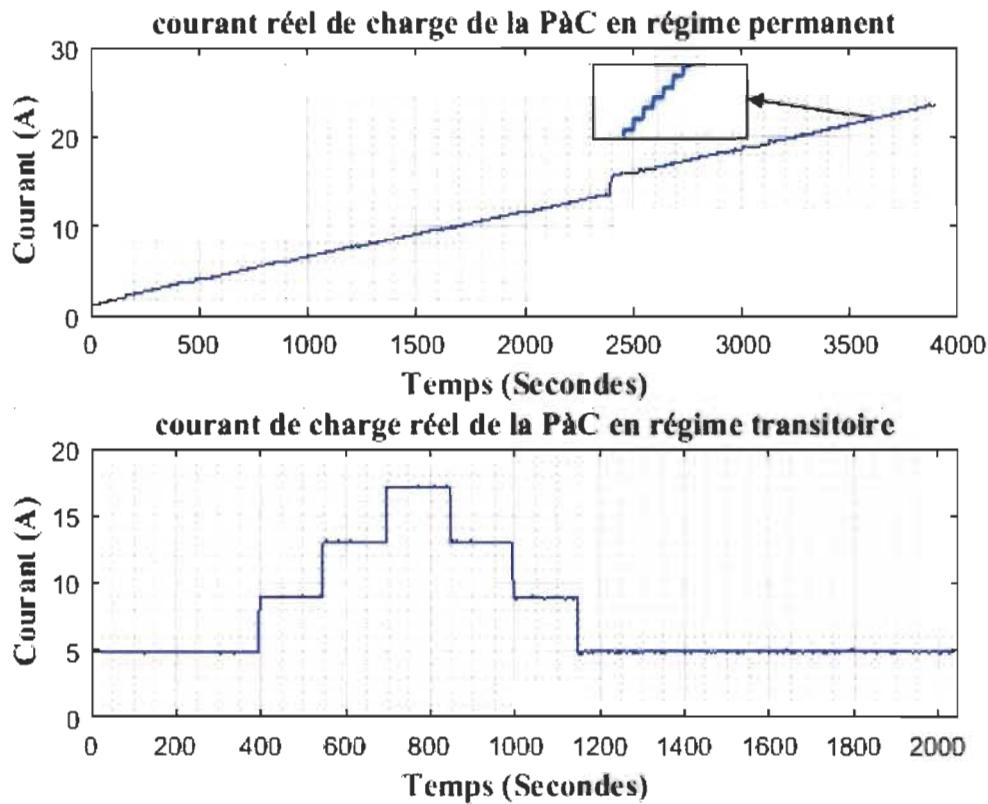


Figure 3-2: Profil de courant en régime transitoire et permanent de la PàC

Ces valeurs de courant ont été prélevé par le constructeur de la PàC toutes les 40 secondes afin de vérifier le modèle développé en simulation.

3.3.1.7.1 Courbe caractéristiques V-I du modèle de la PàC

Pour obtenir la courbe caractéristique V-I de la PEMFC, on effectuera des simulations de ce modèle pendant 3900 secondes selon les données d'entrées suivantes $u_{PA} = 1 \text{ atm}$, $u_{PC} = 1 \text{ atm}$, $u_{TR} = 308 \text{ K}$. Le profil de courant utilisé pour obtenir la courbe caractéristique V-I sera celui en régime permanent. La réponse en tension de sortie du modèle de PàC est présentée à la Figure 3-3. Cette réponse est obtenue en faisant varier le courant de la pile de 1A à 25 A toutes les 40 secondes, et ce tout au long d'une durée de 3900 secondes.

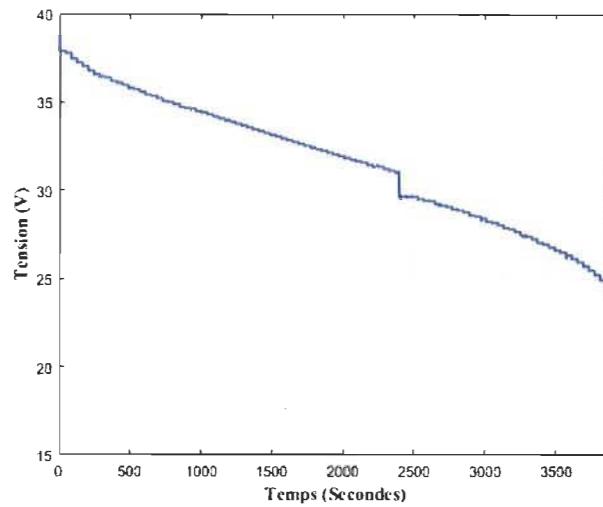


Figure 3-3: Réponse en tension de sortie du modèle de la pile
La courbe caractéristique V-I obtenu par simulation est présentée à la figure ci-dessous

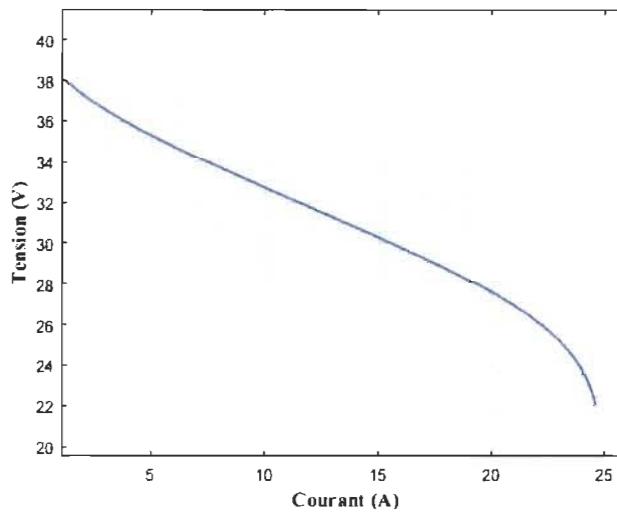


Figure 3-4: Courbe caractéristique V-I du modèle de PaC à MEP

Les résultats de simulation obtenus dans la Figure 3-4 ont été validées avec les résultats expérimentaux de la pile Avista Labs SR-12 (500 W) donnés dans [33]. La Figure 3-5 présente le modèle de validation, et les résultats de validation correspondent parfaitement.

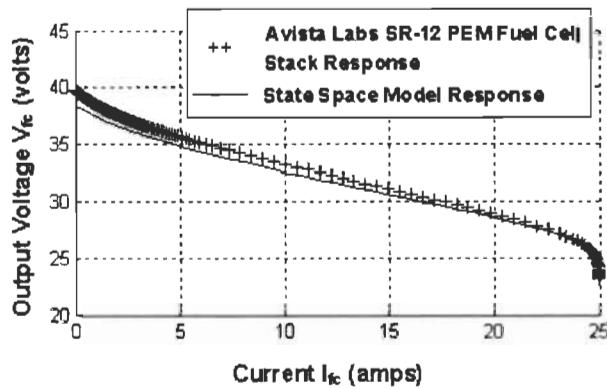


Figure 3-5: Validation du modèle de la pile à MEP [33]

La courbe caractéristique P-I du modèle de la pile est présentée à Figure 3-6. La puissance de sortie maximale est obtenue à un point proche du courant nominal de la PàC (25A), mais pas exactement au courant nominal.

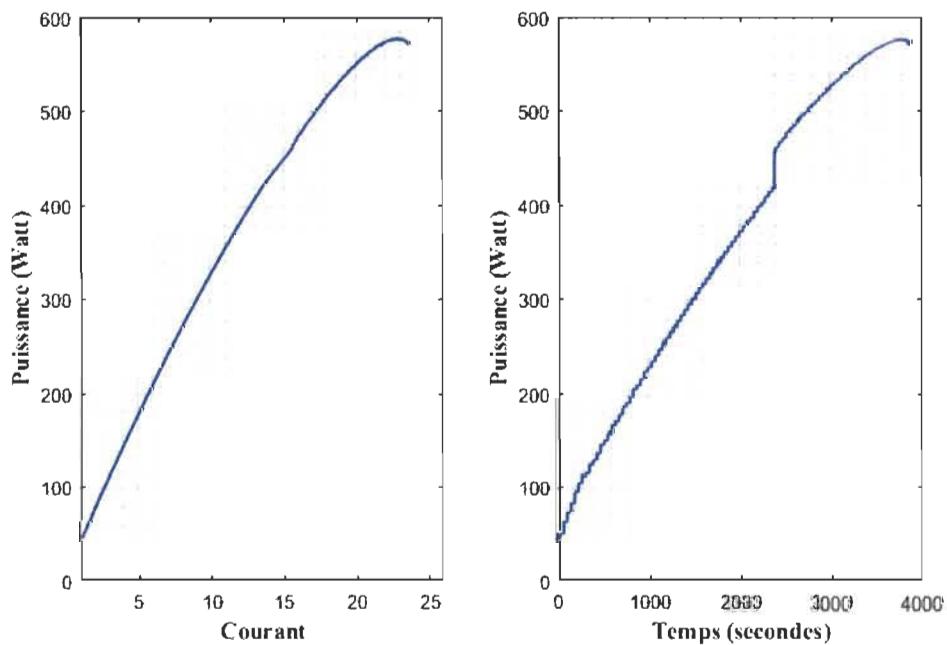


Figure 3-6: Courbes de puissance de la PàC à MEP

3.3.2 Modélisation d'une PàC générique

La modélisation d'une PàC générique est un modèle de PàC à partir duquel l'on peut développer d'autre pile. Dans cette section, nous présenterons un modèle générique de PàC à partir des approches développées dans la littérature. Cette modélisation générique est développée autour de l'identification des paramètres physiques d'une pile réelle.

3.3.2.1 Formulation du modèle

La tension de sortie d'une seule cellule de PàC peut être définie comme le résultat de l'expression suivante [34], [35], [14]:

$$V_{fc} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{con} \quad (3-31)$$

Dans l'équation ci-dessus, les différents termes V_{act} , V_{ohmic} et V_{con} ont été présentés dans la section précédente sur la modélisation de la PàC SR-12 500W. E_{Nernst} est le potentiel thermodynamique de la cellule de la PàC et représente sa tension réversible.

- *Tension réversible de la PàC*

Dans ce modèle, E_{Nernst} , est calculée à partir d'une version modifiée de l'équation de Nernst, avec un terme supplémentaire pour prendre en compte les changements de température par rapport à la température de référence standard, 25 °C [34]. Elle est donnée par :

$$E_{Nernst} = \frac{\Delta G}{2F} + \frac{\Delta S}{2F}(T_{fc} - T_{ref}) + \frac{RT_{fc}}{2F} \left(\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right) \quad (3-32)$$

Où ΔG est le change dans l'énergie libre de Gibbs (J/mol); F est la constante de Faraday; ΔS est l'entropie (J/mol); R est la constante de gaz parfait; tandis que P_{H_2} et P_{O_2}

sont respectivement les pressions partielles d'hydrogène et d'oxygène La variable T_{fc} dénote la température de fonctionnement (K) et T_{ref} la température de référence. En utilisant les conditions standards de température et de pression, les valeurs de ΔG , ΔS et T_{ref} , l'équation (3-32) peut être simplifiée à (3-33):

$$E_{Nernst} = 1,229 - 0,85 \cdot 10^{-3}(T_{fc} - 298,15) + 4,31 \cdot 10^{-5}T_{fc} \cdot \left(\ln(P_{H_2}) + \frac{1}{2} \ln(P_{O_2}) \right) \quad (3-33)$$

- *Pertes de tension d'Activation*

Comme présenté en (1), la tension due aux pertes d'activation peut être calculée par :

$$V_{act} = -[\xi_1 + \xi_2 + \xi_3 \cdot T_{fc} \cdot \ln(C_{O_2}) + \xi_4 \cdot T_{fc} \cdot \ln(I_{fc})] \quad (3-34)$$

Avec I_{fc} est le courant de fonctionnement, ξ représente les coefficients paramétriques pour chaque modèle de pile, dont les valeurs sont définies à partir d'équations théoriques à base cinétique, thermodynamique et électrochimique (1). Le terme C_{O_2} est la concentration d'oxygène dans l'interface catalytique de la cathode (mol/cm^3) et est donné par :

$$C_{O_2} = \frac{P_{O_2}}{5,08 \cdot 10^6 \cdot e^{\frac{-498}{T_{fc}}}} \quad (3-35)$$

- *Pertes de tension ohmiques*

La chute de tension ohmique résulte de la résistance de transfert d'électrons à travers les plaques collectrices et les électrodes de carbone, et la résistance de transfert de protons à travers la membrane solide. Dans ce modèle, une expression générale de la résistance est définie en incluant tous les paramètres importants de la membrane. La résistance équivalente de la membrane est donnée par :

$$R_M = \frac{\rho_M \cdot l}{A} \quad (3-36)$$

Où ρ_M est la résistivité spécifique de la membrane (Ohm.m), A est la surface active de la cellule (cm^2) et l est l'épaisseur de la membrane (cm).

La résistivité spécifique de la membrane ρ_M est donnée par :

$$\rho_M = \frac{181,6 \left[1 + 0,03 \left(\frac{l_{fc}}{A} \right) + 0,062 \left(\frac{T_{fc}}{303} \right)^2 \left(\frac{l_{fc}}{A} \right)^{2,5} \right]}{\left[\psi - 0,634 - 3 \left(\frac{l_{fc}}{A} \right) \right] \exp \left[4,18 \left(\frac{T_{fc} - 303}{T_{fc}} \right) \right]} \quad (3-37)$$

Ainsi la chute de tension est donnée par l'expression :

$$V_{ohmic} = I_{fc} (R_M + R_C) \quad (3-38)$$

Où R_C représente la résistance de transfert des protons à travers la membrane, généralement considérée constante.

- *Perte de tension par concentration*

Ces pertes sont dues à la réduction de la densité des matériaux de réaction, communément appelée perte de transport de masse et est peut-être calculée par :

$$V_{con} = -B \cdot \ln \left(1 - \frac{J}{J_{max}} \right) \quad (3-39)$$

où B est un coefficient paramétrique qui dépend de la pile et son état de fonctionnement

J représente la densité de courant de la pile (Acm^2) et J_{max} la densité maximale.

Alors la tension et la puissance globale pour chaque pile seront données par les équations ci-dessous :

$$P_{fc} = V_{fc} * I_{fc} * N_{fc} \quad (3-40)$$

De ces différentes équations, il est possible d'obtenir le modèle caractéristique de chaque pile. Le tableau ci-dessous présente les différents coefficients paramétriques de chaque pile :

	BCS 500W (BCS Technology's)	Ballard Mark V 5kW	SR12 700W (Avista Labs)
N_{fc}	32	35	46
$T_{fc} (K)$	333	343	323
$A (cm^2)$	64	50.6	62.5
$l (\mu m)$	176	178	25
$P_{H_2} (atm)$	1	1	1.47628
$P_{O_2} (atm)$	0.2095	1	0.2095
$B (V)$	0.016	0.0156	0.15
$R_C (\Omega)$	0.0003	1.6872×10^{-4}	0.0003
ψ	23	22.3209	23
$J_{max} (mA/cm^2)$	469	1500	672
ξ_1	-0.948	-0.8922	-0.948

ξ_2	0.00312	2.9497×10^{-3}	0.00286
ξ_3	7.6×10^{-5}	-1.9077×10^{-4}	7.22×10^{-5}
ξ_4	-1.93×10^{-4}	8.2096×10^{-5}	-1.0615×10^{-4}
$I_{max} (A)$	30	75.9	36

Tableau 3-2: Paramètres de modélisation des différentes PàC

Comme on peut le remarquer dans ce chapitre, on assiste à deux modélisations de PàC qui peuvent prêter à confusion. Ces deux modélisations présentent un modèle générique à partir duquel il est possible de développer plusieurs modèles de PàC de puissances différentes et d'un autre côté une modélisation propre à une PàC spécifique.

3.4 Modélisation des systèmes auxiliaires

Les systèmes auxiliaires sont des composants permettant de fournir à la pile de l'hydrogène, de l'air et effectuer la récupération d'eau. Ce sont également ces systèmes qui s'occupent du refroidissement de la pile. En général, un système pile à combustible est composé d'un compresseur, d'un humidificateur et d'un régulateur thermique. Dépendamment du constructeur de la pile, ces systèmes peuvent varier et dans notre cas de figure, la pile est équipée de son propre système interne de fourniture en air. Ce système n'est autre qu'un ventilateur ou un souffleur qui est entraîné par un moteur électrique. Ce système peut nécessiter une alimentation de la PàC ou d'une source extérieure. L'un des ventilateurs les plus couramment utilisé est le ventilateur axial à cause de son efficacité

dans le déplacement de l'air sur les pièces et pour des systèmes opérants sous de faibles pressions [36].

D'après [36], la puissance actuelle du ventilateur est donnée par l'équation suivante :

$$P_{Fan} = C_p * \frac{T_{op}}{\eta_s} * \left(\left(\frac{P_{sys}}{P_{amb}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) * W_{air} \quad (3-41)$$

Le débit massique de l'air pour une pile est donné par l'équation suivante :

$$W_{air} = 3,57 \cdot 10^{-7} * \lambda * \frac{P_{fc}}{V_{cell}} \left(\frac{kg}{s} \right) \quad (3-42)$$

A partir de ces deux équations ci-dessus, l'on peut déterminer l'efficacité de pile à partir de l'équation suivante :

$$\eta_{fc} = \frac{P_{fc_net}}{P_{fc}} \quad (3-43)$$

La puissance chimique consommée dans la pile est liée au courant de la PàC [37] et est donnée par l'expression suivante :

$$P_{fc} = \frac{HHV * N_{cells}}{2F} * I_{fc} \quad (3-44)$$

Où HHV est la grande valeur calorifique de l'hydrogène, F est la constante de Faraday.

La puissance nette de la pile est définie comme la puissance produite par la PàC à partir de laquelle la puissance consommée par le ventilateur (+ les différentes autres puissances auxiliaires) et dont l'expression est donnée par l'équation suivante :

$$P_{fc_{net}} = P_{fc} - P_{Fan} \quad (3-45)$$

Dans ce travail, la puissance des auxiliaires sera considérée constante afin de réduire la dynamique lors des phases de simulations.

Ayant pour domaines d'application le transport, la section suivante s'articulera autour de la modélisation du système de stockage.

3.5 Modélisation du système de stockage : batterie

Les batteries considérées pour cette étude sont de type Li-ion car elles se sont avérées présenter une haute densité d'énergie et d'efficacité par rapport aux autres types de batteries (comme batteries à plomb liquide, NiCd ou NiMH) [38].

Dans [39] plusieurs modèles dynamiques de batteries ont été développés pour des applications en transport ou pour véhicules électriques. Pour modéliser la batterie, on se basera sur le modèle de charge et le modèle de décharge. Cette étude présente le modèle de charge et décharge d'une batterie basée sur le modèle approximatif modifié de SHEPARD [40].

3.5.1 Modèle de décharge

Le modèle de décharge proposé est similaire au modèle approximé de SHEPHARD mais peut représenter avec précision la dynamique de tension quand le courant varie et prend en compte la tension de circuit ouvert (OCV) en fonction de SOC [39]. Un terme concernant la tension de polarisation est ajouté pour mieux représenter le comportement OCV et le terme concernant la résistance à la polarisation [40] est légèrement modifié.

Pour une batterie de type Li-Ion, la tension de la batterie est exprimée [39] par l'équation suivante :

$$V_{batt} = E_O - K \frac{Q}{Q-it} \cdot it - R_{batt} \cdot I_{batt} + A \exp(-B \cdot it) - K \frac{Q}{Q-it} \cdot I_{batt}^* \quad (3-46)$$

où

V_{batt} est la tension aux bornes de la batterie (V)

E_O la tension de la batterie en circuit ouvert (V)

K est la constante de polarisation (V/(Ah)) ou la résistance de polarisation (Ohm)

A est l'amplitude de la zone exponentielle (V)

B est la constante inverse de temps de la zone exponentielle (1/(Ah))

R_{batt} est la résistance interne de la batterie (Ohm)

I_{batt} est le courant de la batterie (A)

$it = \int I_{batt} dt$ est le courant actuel de charge de la batterie (A)

Q_{batt} est la capacité de la batterie (Ah)

I_{batt}^* est le courant filtré de (A)

Le terme $K \frac{Q_{batt}}{Q_{batt}-it} \cdot it$ de l'équation (3-36) représente la tension de polarisation tandis

que le terme $K \frac{Q_{batt}}{Q_{batt}-it}$ représente la résistance de polarisation.

3.5.2 Modèle de charge

Le comportement de charge, en particulier la caractéristique de fin de charge (EOC), est différent et dépend du type de batterie. Pour des batteries de type Li-Ion, contrairement à la résistance de polarisation du modèle de décharge donnée en équation (3-36), la résistance de la polarisation est maintenant donnée par $K \frac{Q_{batt}}{it - 0.1Q_{batt}}$

$$V_{batt} = E_O - K \frac{Q_{batt}}{it - 0.1Q_{batt}} \cdot I_{batt}^* - R_{batt} I_{batt} + A \exp(-B \cdot it) - K \frac{Q_{batt}}{Q_{batt} - it} \cdot it \quad (3-47)$$

Le SOC est défini comme le ratio de la charge emmagasinée dans la batterie sur la capacité de charge maximale Q_{batt} :

$$\frac{dSOC}{dt} = - \frac{I_{batt}}{Q_{batt}} \quad (3-48)$$

Afin d'exprimer I_{batt} , il est à noter que la puissance instantanée délivrée par la batterie à la charge est :

$$P_{batt} = V_{batt} * I_{batt} \quad (3-49)$$

L'état de charge de la batterie SOC) peut être exprimé selon l'équation ci-dessous

$$\frac{dSOC}{dt} = - \frac{V_{OC} - \sqrt{V_{OC}^2 - 4 * R_{batt} P_{batt}}}{2 R_{batt} Q_{batt}} \quad (3-50)$$

La détermination de la capacité de la batterie sera basée sur les données du bus DC et du pic de puissance de la charge

$$Q_{batt} = \frac{P_{req} * (\frac{\text{distance parcourue}}{\text{vitesse maximale}})}{V_{OC}} \quad (3-51)$$

L'ensemble des différentes équations développées ci-dessus seront implémentées sous Matlab. En ce qui concerne les paramètres de ce modèle, ils sont obtenus à partir du constructeur et représenté dans le Tableau 3-3

Paramètres	Valeurs
$E_0 (V)$	12*6
$R(\Omega)$	0.01
$K(\Omega \text{ ou } \frac{V}{Ah})$	0.0076
$A (V)$	0.26422
$B (Ah)^{-1}$	26.5487

Tableau 3-3: Paramètres de la batterie

Les paramètres présents dans le Tableau 3-3 ci-dessous correspondent à un système uni-pile. Dans un système multi-pile, les changements seront opérés au niveau de la capacité de la batterie.

3.6 Commande d'un système pile à combustibles

La commande d'un système pile à combustible repose principalement sur la commande des auxiliaires et des systèmes de puissances. Ces systèmes de puissances peuvent être des convertisseurs DC/DC (élévateurs ou abaisseurs de tension), des convertisseurs DC/AC ou les deux à la fois. L'utilisation de chaque convertisseur ou des deux, dépend fortement du

type de charge. Dans le cadre de ce travail de maîtrise, nous travaillons sous un profil de charge purement continue.

De ce fait, nous nous consacrerons à la modélisation et la commande d'un convertisseur DC/DC de type élévateurs. L'objectif de la commande est de pouvoir en tout temps suivre les courants de références fournis par le système de gestion en énergie à l'aide de différents contrôleurs.

3.6.1 Modélisation du convertisseur DC/DC Boost

Le convertisseur DC/DC Boost est modélisé selon la topologie d'un convertisseur DC/DC Boost non idéal. Son circuit est illustré à la Figure 3-7 ainsi que son modèle équivalent en commutation de valeur moyenne illustré à la Figure 3-8

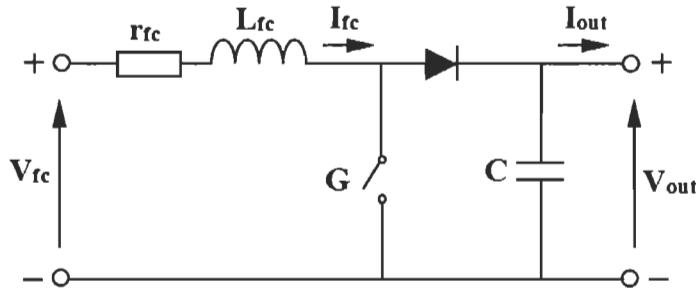


Figure 3-7: Représentation d'un convertisseur DC/DC de type Boost

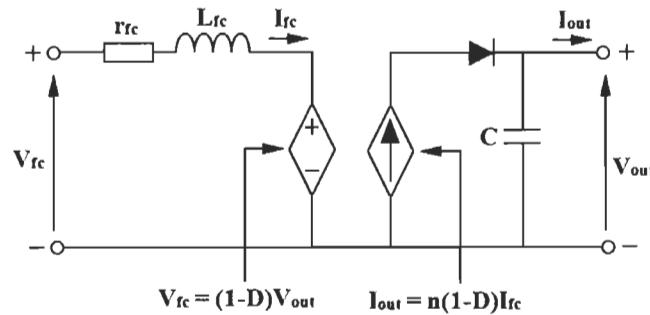


Figure 3-8: Représentation en signaux de petits modèles d'un convertisseur DC/DC de type Boost

La modélisation de ce convertisseur passe par la détermination ou le dimensionnement de l'ensemble des éléments qui le composent : la résistance de l'inductance d'entrée, l'inductance d'entrée, le condensateur et sa résistance de sortie. L'ensemble de ses éléments sont sujets au cahier de charge du convertisseur (voir Tableau 3-4) et dépendent également des paramètres suivants :

- La gamme d'entrée de la tension $V_{IN(min)}$ et $V_{IN(max)}$ qui représente la plage de tension de la pile à combustible (Vfc)
- La tension nominale de sortie : V_{out}
- Le courant maximal de sortie : $I_{OUT(max)}$

3.6.1.1 Dimensionnement des différentes composantes

La première étape est de déterminer le rapport cyclique pour une tension d'entrée minimale. On utilise une tension d'entrée minimale parce que cette dernière correspond au courant maximal de commutation. L'équation (3-52) représente le rapport cyclique du convertisseur en fonction de la tension d'entrée :

$$D = 1 - \frac{V_{IN(min)} \times \eta}{V_{out}} \quad (3-52)$$

η est l'efficacité du convertisseur et dans notre cas de figure on le prendra pour 90 %.

Désirant avoir en sortie une tension de 72 volts pour une tension en entrée de 20 à 38 volts représentant la plage de tension de la pile, et afin de mieux dimensionner le système, on prendra la tension minimale qui correspond à la tension à laquelle la pile produit son courant maximal. Après application de l'équation (3-52), on obtient un rapport cyclique de 0.75.

Le rendement η est introduite afin de modéliser les différentes pertes au sein du convertisseur et cela donne un dimensionnement meilleur et réel.

Une fois le rapport cyclique déterminé, la prochaine étape consiste à déterminer le taux d'ondulation du courant de l'inductance (courant de la PàC) qui est nécessaire à la détermination du courant de commutation maximale. Le taux d'ondulation du courant d'entrée est donné par l'équation ci-dessous :

$$\Delta I_L = \frac{V_{IN(min)} \times D}{f_s \times L} \quad (3-53)$$

Avec F_S qui est la fréquence minimale de commutation de notre convertisseur.

- Courant maximal de commutation

De cette équation, il est possible de déterminer le courant maximal de sortie défini par l'équation suivante :

$$I_{MAXOUT} = \left(I_{LIM(min)} - \frac{\Delta I_L}{2} \right) \times (1 - D) \quad (3-54)$$

En se fixant un courant de sortie maximal, le courant maximal de commutation est redéfini par l'équation ci-dessous :

$$I_{SW(max)} = \frac{I_{OUT(max)}}{1-D} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (3-55)$$

Ce courant représente le courant maximal dont l'inductance, le module de commutation et les diodes peuvent supporter en commutation. A partir des données ci-dessus, l'on peut effectuer le calcul de l'inductance comme suit :

- Sélection de l'inductance

Selon [41], la valeur de l'inductance est donnée par l'équation suivante :

$$L_{dc} = \frac{V_{IN} x (V_{OUT} - V_{IN})}{\Delta I_L x f_s x V_{OUT}} \quad (3-56)$$

À partir de l'équation (3-56), il est impossible de calculer le taux d'ondulation du courant parce que l'inductance nous est inconnue. Une bonne estimation du taux d'ondulation est d'environ 20 % à 40 % du courant de sortie :

$$\Delta I_L = 0.3 x I_{OUT(max)} x \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} \quad (3-57)$$

Mais pour des conditions de fonctionnement données en régime permanent, on peut montrer que la valeur de l'inductance critique L qui détermine la frontière entre le mode conduction continue (CCM) et le mode de conduction discontinu (DCM) est donnée par l'équation suivante :

$$L_{dc} = \frac{(1-D)^2 x D x R_{charge}}{2f_s} \quad (3-58)$$

- Sélection du condensateur de sortie

Selon [41], la valeur du condensateur de sortie est donnée par l'équation :

$$C_{OUT(min)} = \frac{I_{OUT(max)} x D}{f_s * \Delta V_{OUT}} \quad (3-59)$$

ΔV_{OUT} est le taux d'ondulation de la tension de sortie

Ce taux dépend de la résistance équivalente en série qui ajoute des perturbations, il est donné par l'équation suivante :

$$\Delta V_{OUT(ESR)} = ESR x \left(\frac{I_{OUT(max)}}{1-D} + \frac{\Delta I_L}{2} \right) \quad (3-60)$$

L'application de l'ensemble des équations ci-dessous nous donne les paramètres suivants :

Paramètres	Valeurs
Plage de tension d'entrée	$V_{in} = 25 - 39 \text{ Vdc}$
Tension de sortie	$V_{OUT} = 72 \text{ Vdc}$
Courant d'entrée maximale	$IL_{max} = 25 \text{ A}$
Taux d'ondulation du courant d'entrée	30 %
Inductance	$I_L = 22\mu\text{H}$
Condensateur	$C_{OUT(min)} = 100\mu\text{F}$
Fréquence de commutation	$F_s = 20 \text{ kHz}$

Tableau 3-4: Paramètres du convertisseurs Boost

Ces différentes valeurs sont valables pour un système uni-pile et donc la valeur de puissance de la PàC est de 500W. Pour un système multi-pile, nous nous servirons de la méthodologie présentée dans cette section pour dimensionner chacun des convertisseurs des autres piles.

Après la modélisation du convertisseur, nous développerons la commande de ce dernier et cela fera à l'aide d'un contrôleur PI

3.6.2 Commande du convertisseur DC/DC

La commande de convertisseur sera une commande en courant de la pile en fonction d'un courant de référence obtenu via le système de gestion d'énergie. Pour ce faire, nous utiliserons les différentes représentations mathématiques et la modélisation en signaux de petits modèles du convertisseur. La Figure 4-2 ci-dessous représente le bloc de commande du convertisseur en courant.

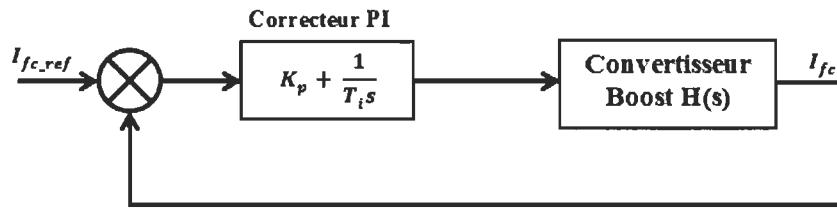


Figure 3-9: Schéma de commande en courant boucle fermé du courant

A partir des Figure 3-7 et Figure 3-8 présentées ci-dessus, on peut définir les différentes équations d'états du système selon leur mode de fonctionnement comme suit :

- Mode de fonctionnement 1 : (le Switch S est à ON)

$$L \frac{di_L}{dt} = v_{in} - r_L \cdot i_L \quad (3-61)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = -\frac{v_c}{R+R_c} \quad (3-62)$$

$$v_o = R \cdot \frac{v_c}{R+R_c} \quad (3-63)$$

- Mode de fonctionnement : (le Switch S est à OFF)

$$L \frac{di_L}{dt} = v_{in} - R_L \cdot i_L - v_o \quad (3-64)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = \frac{R}{R+R_c} i_L - \frac{v_c}{R+R_c} \quad (3-65)$$

$$v_o = \frac{RR_c}{R+R_c} i_L + \frac{Rv_c}{R+R_c} \quad (3-66)$$

Les équations d'états moyennes à travers un cycle de commutation sont données par les données suivantes :

$$L \frac{di_L}{dt} = v_{in} - R_L \cdot i_L - (1-d)v_o \quad (3-67)$$

$$C \frac{dv_c}{dt} = \frac{(1-d)R}{R+R_c} i_L - \frac{v_c}{R+R_c} \quad (3-68)$$

$$v_o = \frac{(1-d)RR_c}{R+R_c} i_L + \frac{Rv_c}{R+R_c} \quad (3-69)$$

Avec i_L (courant d'inductance) et v_c (tension de sortie) comme les variables d'états, d (le rapport cyclique) comme l'entrée de commande et v_o (tension de sortie) comme les variable de sortie du convertisseur boost. Le système étant non linéaire pour pouvoir être contrôlé, on obtiendra un modèle linéaire par la représentation de signaux de petits modèles qui se traduit par l'introduction de petites perturbations selon les équations (3-70) à (3-73) autour des points de fonctionnement en régime permanent des variables et les substituer dans les équations (3-67) à (3-69)

$$i_L = I_L + \hat{i}_L \quad (3-70)$$

$$v_{in} = V_{in} + \hat{v}_{in} \quad (3-71)$$

$$v_o = V_o + \hat{v}_o \quad (3-72)$$

$$d = D + \hat{d} \quad (3-73)$$

En réalisant la substitution, nous obtenions les nouvelles équations suivantes :

$$L \frac{d(I_L + \hat{I}_L)}{dt} = (V_{in} + \widehat{v_{in}}) - R_L(I_L + \hat{I}_L) - (1 - D - \hat{d})(V_O + \widehat{v_O}) \quad (3-74)$$

$$C \frac{d(V_c + \widehat{v_c})}{dt} = \frac{(1 - D - \hat{d})R}{R + R_c}(I_L + \hat{I}_L) - \frac{V_c + \widehat{v_c}}{R + R_c} \quad (3-75)$$

$$V_O + \widehat{v_O} = \frac{(1 - D - \hat{d})RR_c}{R + R_c}(I_L + \hat{I}_L) + \frac{R(V_c + \widehat{v_c})}{R + R_c} \quad (3-76)$$

En égalisant les termes continus et variables, nous gardons les équations modulables :

$$L \frac{d\hat{I}_L}{dt} = \widehat{v_{in}} - R_L \hat{I}_L - (1 - D) \cdot \widehat{v_O} + V_O \cdot \hat{d} \quad (3-77)$$

$$C \frac{d\widehat{v_c}}{dt} = \frac{(1 - D)R}{R + R_c} \hat{I}_L - \frac{R}{R + R_c} I_L \hat{d} - \frac{\widehat{v_c}}{R + R_c} \quad (3-78)$$

$$\widehat{v_O} = \frac{(1 - D)RR_c}{R + R_c} \hat{I}_L - \frac{RR_c I_L}{R + R_c} \hat{d} + R \frac{\widehat{v_c}}{R + R_c} \quad (3-79)$$

Dans le domaine de la Laplace, on obtient :

$$sL\hat{I}_L(s) = \widehat{v_{in}}(s) - R_L \hat{I}_L(s) - (1 - D) \cdot \widehat{v_O}(s) + V_O \cdot \hat{d}(s) \quad (3-80)$$

$$sC\widehat{v_c}(s) = \frac{(1 - D)R}{R + R_c} \hat{I}_L(s) - \frac{R}{R + R_c} I_L \hat{d}(s) - \frac{\widehat{v_c}(s)}{R + R_c} \quad (3-81)$$

$$\widehat{v_O}(s) = \frac{(1 - D)RR_c}{R + R_c} \hat{I}_L(s) - \frac{RR_c I_L}{R + R_c} \hat{d}(s) + R \frac{\widehat{v_c}}{R + R_c}(s) \quad (3-82)$$

En arrangeant les différentes équations, nous pouvons obtenir la fonction de transfert du rapport cyclique au courant de la pile dans le domaine de Laplace et représentée en (3-79)

$$H_{id}(s) = \frac{V_{out} * (R + 2 * R_C)}{L * (R + R_C)} \frac{s + \frac{1}{C(R/2 + R_C)}}{s^2 + s \frac{C[R_L(R + R_C) + (1 - D)^2 R R_C] + L}{LC(R + R_C)} + \frac{(1 - D)^2 R + R_L}{LC(R + R_C)}} \quad (3-83)$$

Désirant contrôler le courant d'entrée du convertisseur autour d'un courant de référence, le diagramme de contrôle en courant du convertisseur Boost est donné à la Figure 3-10 . Ce diagramme utilise un correcteur PI pour traquer la référence du courant de la pile.

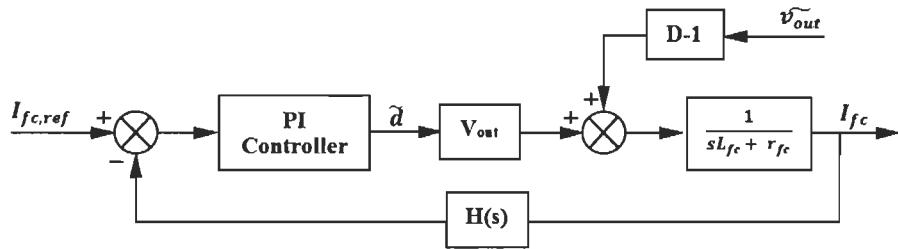


Figure 3-10: Boucle de contrôle de courant du convertisseur Boost

Pour calculer les coefficients du correcteur PI, on réduira le système à un système de premier ordre. La fonction en boucle ouverte en courant du système est donnée par l'équation suivante :

$$H_i(s) = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \cdot \frac{1}{sL_{fc} + r_{fc}} \quad (3-84)$$

En appliquant les différentes méthodes de calculs de coefficients ou à l'aide de l'outil « *pidtune* » de Matlab, nous obtenons les différents coefficients du correcteur.

Comme mentionné plus haut, le dimensionnement du convertisseur dépend également de la nature ou du profil de charge, qui sera développé dans les deux prochaines sections.

3.7 Conclusion

Dans cette section, il a été question de mettre en œuvre la modélisation et la commande d'un système pile à combustible. Ces différentes approches ont permis de modéliser et dimensionner un système multi-pile. Dans un premier temps, un modèle générique de pile a été développé, et cela nous a permis d'obtenir à notre guise différents autres modèles de piles. Également dans cette voie, certaines piles ont été développées à partir des données constructeurs et grâce à des outils d'approximation on a pu obtenir des modèles réalistes. Ayant eu pour objectifs de travailler dans le domaine du transport, il a été objectif de modéliser l'élément de stockage qui dans ce travail est une batterie. À partir de cette vision, il semble évident de modéliser le convertisseur de puissance et sa commande qui. Ces deux dernières modélisations permettront de conditionner les attentes nécessaires à la traction. Pour s'assurer du bon fonctionnement de l'ensemble, des stratégies de gestion devront être développées et également un dimensionnement adéquat du système. Ces deux dernières tâches seront développées dans la section suivante.

Chapitre 4 - Dimensionnement et stratégie d'un système à une pile (uni-pile)

4.1 Introduction

Ce chapitre expose les différentes étapes à suivre pour dimensionner un système à une pile pour une utilisation transport. Ce dimensionnement portera sur la construction d'un modèle de véhicule électrique, qui servira d'outils de test pour les différentes stratégies de gestion de l'énergie, développées dans ce chapitre. Dans un premier temps, les paramètres du véhicule à modéliser doivent être spécifiés ainsi que les paramètres de performances du véhicule, qui sont la vitesse maximale, le temps d'accélération et la pente maximale. Ces données vont nous permettre de déterminer la puissance électrique du moteur électrique nécessaire à la conduite du véhicule. Dans un second temps, il sera nécessaire de déterminer les caractéristiques des sources primaire et secondaire du véhicule. Cette détermination sera fonction de l'architecture électrique à prendre en considération et des tâches à effectuer pour chacune des sources lors des phases de conduite. Dans ce chapitre, l'architecture électrique, prise en considération est celle présentée en Figure 4-1, où l'élément de stockage est directement connecté au bus continu et la PàC via le convertisseur DC/DC, qui lui est connecté au même bus.

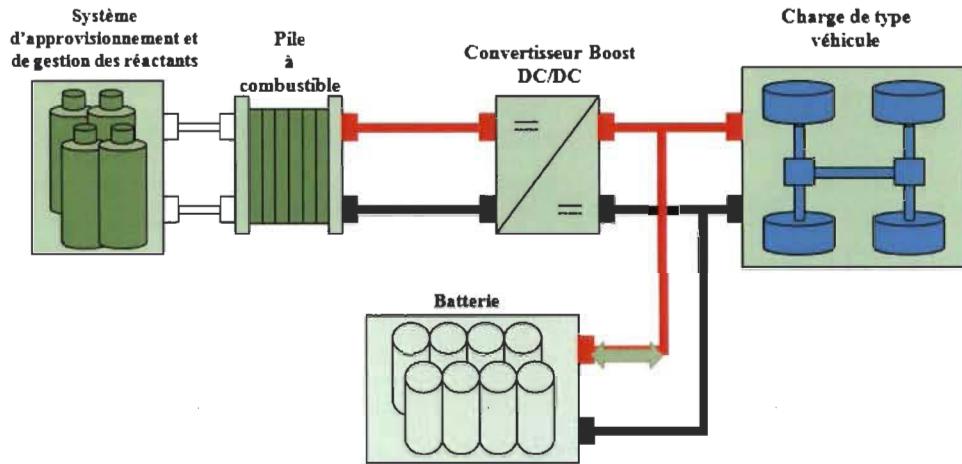


Figure 4-1: Système pile à combustible pour une application transport

4.2 Dimensionnement du système à une pile

Cette section se résumera au calcul de la puissance à allouer à la pile, à la batterie et la puissance requise par le véhicule. Dans la littérature il a été développé plusieurs méthodes d'allocation de puissance pour la pile et également celle de la batterie. Dans l'ensemble des situations, l'on utilise la puissance développée par le véhicule suivant un cycle de conduite et également en utilisant les performances de dernier.

4.2.1 Dimensionnement de la charge : puissance requise par le véhicule

La puissance requise par le véhicule est obtenue à l'aide des caractéristiques d'un véhicule et également du cycle de conduite. Plusieurs cycles de conduites ont été développés et chacun est lié à des conditions de circulation. Ces conditions de circulation sont des profils de route tels que : profil urbain, autoroute ou un profil rural. Dans ce travail de maitrise, nous nous concentrerons sur un profil urbain.

4.2.1.1 Cycle de conduite

Un cycle de conduite est un système permettant de produire la puissance électrique d'un véhicule en fonction des forces exercées sur ce dernier. Avec pour objectif de travailler avec un profil urbain, on utilisera un cycle de conduite UDDS ou un cycle US06, qui sont des comportements de conduite en milieu rural et urbain pour les USA. Les figures représentent deux cycles de conduite urbains sur terrain plat c.-à-d. l'angle entre le véhicule et la route est nul (=zéro)

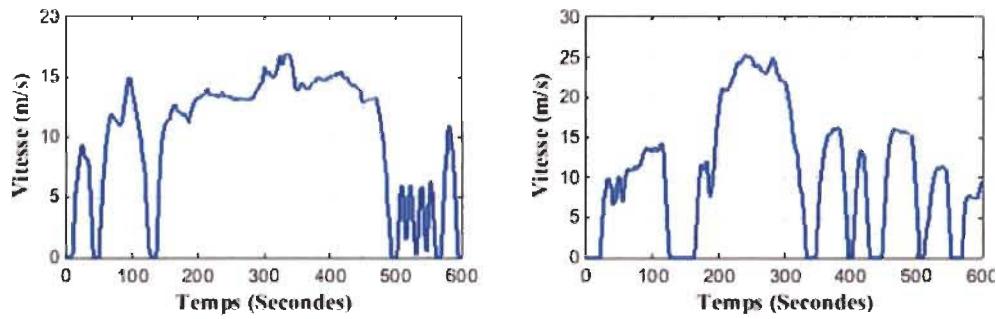


Figure 4-2: Cycle de conduite urbain (US06) à gauche et à droite cycle UDDS

4.2.2 Modélisation dynamique d'un véhicule

Cette modélisation a pour objectif de calculer la puissance électrique requise par le système en fonction du cycle de conduite. L'approche utilisée dans ce cas de figure est une combinaison de calcul en aller et retour similaire à celles utilisée dans ADVISOR [42]. Le trajet de calcul vers l'arrière prend la vitesse requise du véhicule et calcule la puissance requise sur le bus DC [43]. Cependant, si la puissance requise ne peut pas être satisfaite par la source d'énergie et/ou le moteur électrique, le chemin de calcul vers l'avant calcule la vitesse pouvant être atteinte [43].

Pour évaluer cette puissance requise, nous devrons calculer la force de traction du véhicule qui est la somme de quatre (4) forces : force d'accélération, force de traînée aérodynamique, force de roulement et la force gravitationnelle, comme le montre la figure ci-dessous :

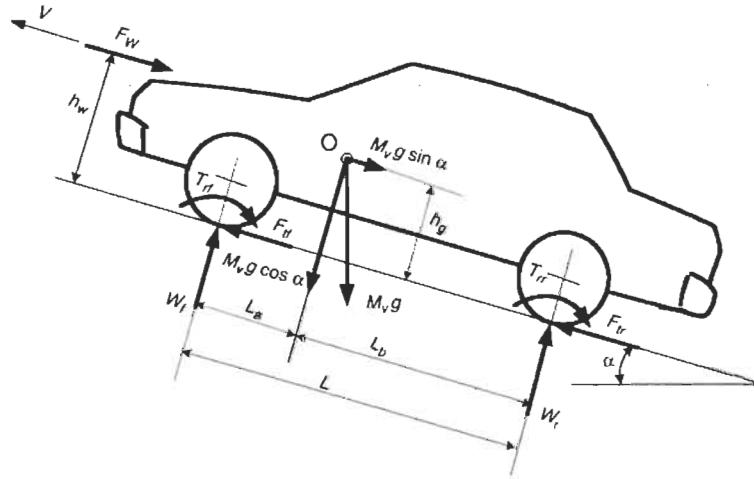


Figure 4-3: Ensemble de forces dynamiques exercées sur et par un véhicules [44]

- Force de roulement

$$F_r = M_V * g * C_r * \cos(\alpha) \quad (4-1)$$

- Force de traînée aérodynamique

$$F_{aero} = \frac{1}{2} * \rho_{air} * C_{aero} * A_{aero} * V_V^2 \quad (4-2)$$

- Force gravitationnelle

$$F_g = M_V * g * \sin(\alpha) \quad (4-3)$$

- Force d'accélération

$$F_{acc} = M_V * \frac{dV_V}{dt} \quad (4-4)$$

- Force de traction

$$F_{tr} = F_r + F_{aero} + F_g + F_{acc}$$

$$F_{tr} = M_V * g * C_r * \cos(\alpha) + \frac{1}{2} * \rho_{air} * C_{aero} * A_{aero} * V_V^2 + M_V * g * \sin(\alpha) + M_V * \frac{dV_v}{dt}$$
(4-5)

- Puissance électrique requise

$$P_{req} = F_{tr} * V_v$$
(4-6)

Où M_V est la masse totale du véhicule, V_v est la vitesse du véhicule, g est la constante de gravité, C_r est le coefficient de roulement, A_{aero} est la surface frontale du véhicule, C_{aero} est le coefficient de traîne aérodynamique et α est l'angle de la pente de la route.

Dans certains cas de figure, il peut y arriver que l'on ne possède pas les coefficients de force de roulement pour véhicule; ce qui reviendrait à les calculer en utilisant l'équation (4-7) ci-dessous

$$C_r = 0.005 + \left(\frac{1}{P_{tire}}\right) * (0.01 + 0.0095 * \left(\frac{V_v}{100}\right)^2)$$
(4-7)

Avec P_{tire} comme étant la pression des pneus (bar).

Ces différentes équations représentant la dynamique d'un véhicule seront validées sur un modèle de véhicule et qui sera la base de développement des différentes stratégies de gestion énergétique.

4.2.3 Validation du modèle

Pour valider notre puissance requise par le système, nous utiliserons un véhicule de golf 2012 *GEM eL Golf car* (Figure 4-4) provenant du constructeur ***POLARIS*** et donc les paramètres sont donnés dans le Tableau 4-1 ci-dessous.

Paramètres	Valeurs
Passagers	2
Puissance moteur	5hp (3.7285 kW) à vitesse constante et 12 hp (8,9484 kW) lors des accélérations et lors des pics de puissances de la charge
Autonomie	Jusqu'à 30 miles (48.3 km) de conduite
Chargeur embarqué	Système de batterie de 72 volts
Vitesse maximale	25 mph (40.234 km/h)
Poids à vide	1235 lbs (560.2 kg)
Poids brut du véhicule	2300 lbs (1043.3 kg)
Capacité de charge utile	1065 lbs (483.076 kg)
Capacité de chargement	700 lbs (317.515 kg)
Dimensions	L: 3.66 m – l: 1.4 m – H: 1.8 m
Pneus	13 inches
Surface frontale (m^2)	2.52 (calculée)
Coefficient aérodynamique (C_d)	0.9
Coefficient de roulement (C_r calculé)	0.0106
Pression des pneus	30 psi (2.07 bar)
Pente maximale	20% (11.31°)

Tableau 4-1 : Golf car applications [45]



Figure 4-4: voiturette de golf [46]

Cependant, la vitesse maximale du véhicule étant fixée à 25 mph, les nouveaux cycles de conduites sont présentés à la Figure 4-5

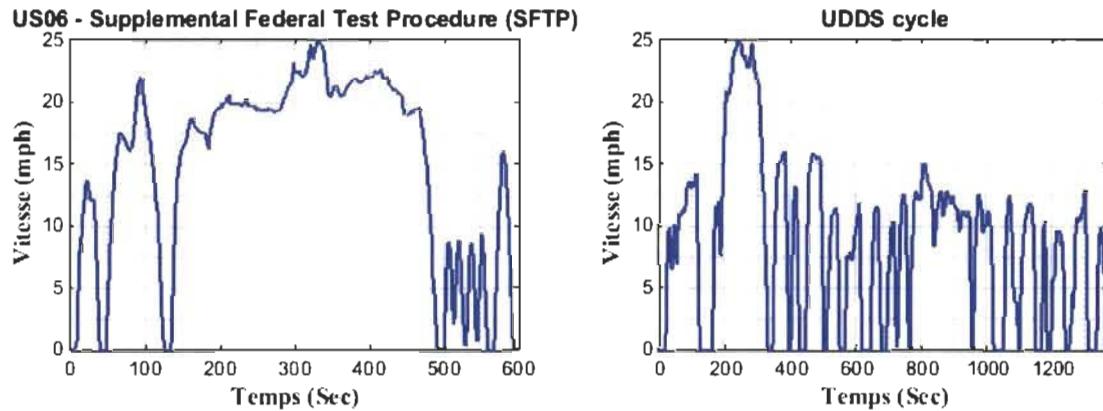


Figure 4-5 : Cycle de conduite dédiée à la voiturette de golf

En appliquant ces cycles de conduite (urbain et profil autoroute) au véhicule décrit ci-dessus et sur un terrain avec un angle d'inclinaison de 1.5° on obtient les différents profils de puissance présentés à la Figure 4-6.

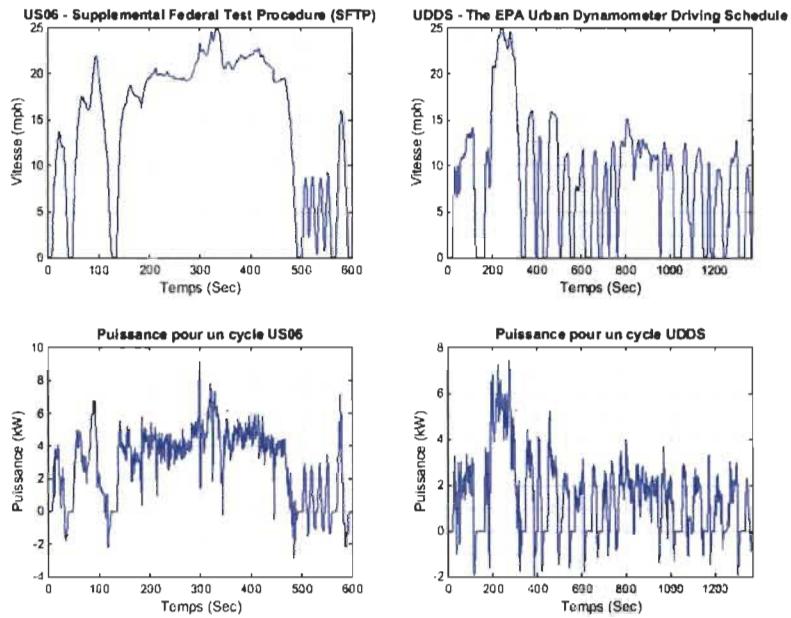


Figure 4-6: Puissance générée par le véhicule pour un cycle de conduite (US06 et UDDS)

À partir des données de puissance obtenues ci-dessus, il sera maintenant possible de dimensionner la puissance à allouer à la pile et celle à allouer à la batterie.

4.2.4 Dimensionnement de la pile à combustible

Dans [47], l'auteur définit deux hypothèses pour dimensionner la puissance de la pile en fonction des paramètres de performances du véhicule. Ainsi les deux hypothèses sont définies comme suit :

Hypothèse 1 : la pile à combustible sera capable de fournir la puissance demandée pour l'opération du véhicule à vitesse constante sur une route plate ou en pente, sans le soutien de l'élément de stockage.

Hypothèse 2 : l'élément de stockage soutiendra la pile à combustible avec la puissance nécessaire lors des accélérations et lors des pics de puissance de la charge.

En se référant Tableau 4-1, à vitesse constante, la puissance de traction du moteur est de 5hp soit 3.73kW.

Le rapport entre la puissance mécanique du moteur (P_m), la puissance de PàC (P_{fc}) et la puissance de l'élément de stockage (P_{batt}) est donnée par l'expression suivante :

$$P_{batt} = \frac{P_m}{\eta_m} - P_{fc} \quad (4-8)$$

Où η_m est le rendement du moteur (en supposant que les rendements du convertisseur de la PàC est de 100%)

Selon l'hypothèse 1, la PàC devra fournir la puissance demandée pour l'opération du véhicule à vitesse constante sur une route plate ou en pente, sans le soutien de l'élément de stockage. Sachant que $P_{batt}=0$, l'équation (4-8) devient :

$$P_{fc} = \frac{P_m}{\eta_m} = \frac{3.73kW}{0.9} = 4.14kW \quad (4-9)$$

Alors on choisira la puissance de PàC pour $P_{fc} = 5kW$

Dans la modélisation de nos différentes piles effectuées au chapitre 3, nous utiliserons la pile Ballard Mark V 5kW donc les courbes de puissance, rendement et tension sont données à la Figure 4-7

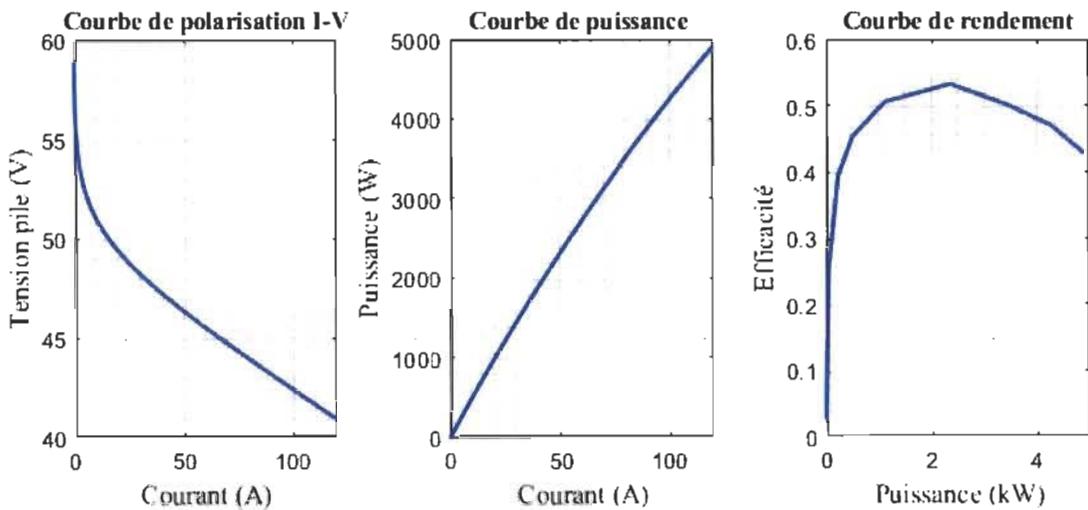


Figure 4-7: Courbe de polarisation I-V, de puissance I-P et rendement de la PàC Ballard MARK V 5 kW

4.2.5 Dimensionnement de la batterie

Pour dimensionner l'élément de stockage, l'auteur dans [47] attribue plusieurs fonctions que ce dernier devrait remplir :

- Fournir de la puissance de traction pendant le démarrage de la PAC. Au démarrage, la PAC ne peut pas fournir toute sa puissance et c'est la batterie ou le super condensateur qui doit la soutenir ;
- Fournir de la puissance pendant les cycles de conduite. Par exemple, l'élément de stockage peut soutenir la PAC lorsque la puissance de la charge dépasse la puissance maximale de cette dernière. Il peut aussi soutenir la PAC grâce à sa dynamique plus rapide (plus grande puissance spécifique) ;
- Fournir de la puissance afin que le véhicule puisse satisfaire les contraintes de pente maximale et d'accélération ;

- Capturer de l'énergie régénérative lors des phases de freinages ;
- Alimenter des accessoires électriques du véhicule.

Pour déterminer la puissance et la capacité de la batterie, on prendra en compte le profil de conduite à suivre. Les profils de conduite considérés sont les mêmes utilisés pour évaluer la puissance requise par le moteur et dont leurs courbes de puissance et d'énergie sont présentées à la Figure 4-8

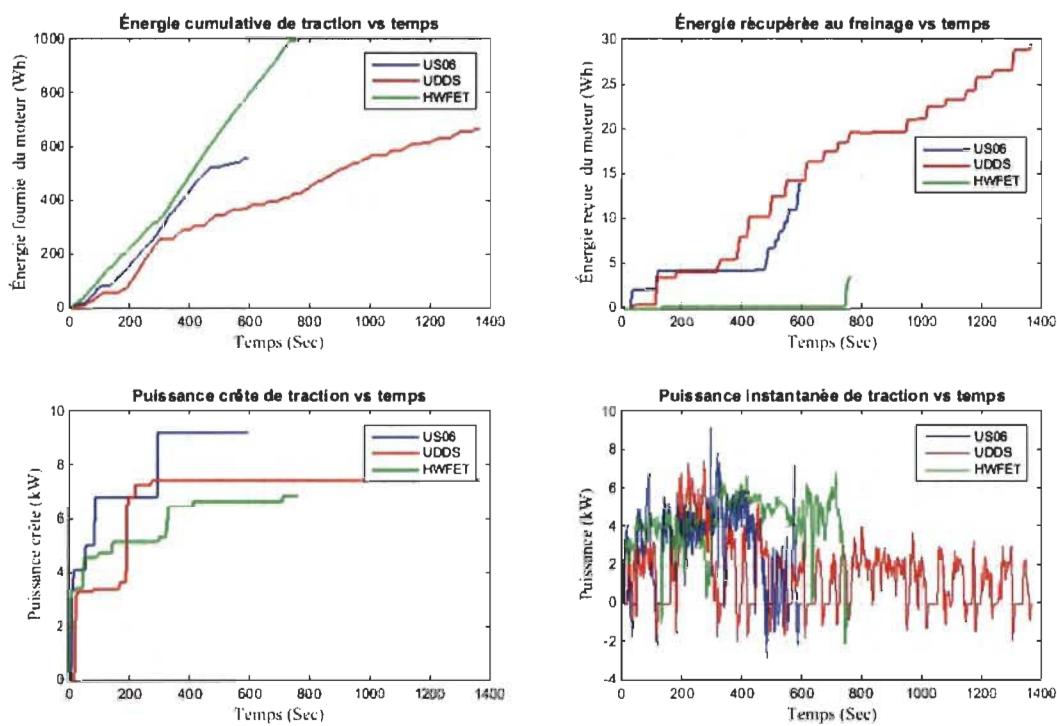


Figure 4-8: Courbe d'énergie de traction, d'énergie récupérée, de la puissance crête de traction et de la puissance instantanée en fonction du temps

De l'hypothèse 2, la batterie doit soutenir la PàC durant les phases d'accélérations et dans les pics de puissance de la charge. Et selon les paramètres du véhicule, cette puissance est de 12hp et elle correspond parfaitement à la puissance maximale développée par les

différents cycles de conduite. En utilisant l'équation (4-8) et avec la puissance de la PàC précédemment choisie, la puissance de la batterie est obtenue :

$$P_{batt} = \frac{9.4851kW}{0.9} - 5kw = 5.54kW \quad (4-10)$$

Nous choisirons une puissance de batterie $P_{batt} = 6kW$

Le cycle de conduite UDDS génère la plus grande récupération d'énergie lors des phases de freinages (34 Wh). Cette valeur est utile dans un premier dimensionnement de la capacité de l'élément de stockage. Sachant que la tension du bus continu (CC) est de 72 Vdc, on choisira la tension de la batterie égale à cette dernière. De plus, on considère que la batterie aura un SOC maximal (SOC max) égal à 85% et un SOC minimal (SOC min) égal à 35%.

Alors, nous avons un taux de décharge égale à :

$$DOD = 85\% - 35\% = 45\% \quad (4-11)$$

Afin que la batterie puisse récupérer toute l'énergie au freinage, son énergie totale doit être :

$$E_{tot_bat} = \frac{E_{utile_bat}}{\%DOD} = \frac{34Wh}{0.45} = 76Wh \quad (4-12)$$

En prenant la tension nominale d'un module de batterie pour 12 V. le nombre de batteries connectées en série est de :

$$N_{bat} = \frac{V_{bus}}{V_{nom_bat}} = \frac{72}{12} = 6 \quad (4-13)$$

A partir de ces données ci-dessus et la tension maximale de la batterie donnée, il est possible de déterminer la capacité minimale de la batterie

$$C_{\min_bat} = \frac{E_{tot_bat}}{V_{max_bat}} = \frac{76}{12 \times 6} = 1.06 \text{ Ah} \quad (4-14)$$

La durée du cycle de conduite étant de 600 secondes pour le cycle US06, de 1370 secondes pour celui du cycle UDDS et désirant utiliser des batteries de 12V, la capacité de la batterie est donnée par l'équation (4-15).

$$C_{Ah} = \frac{P_{batt}(W) * t_{cycle}(h)}{V_{nom}(V)} \quad (4-15)$$

En prenant une tension nominale de batterie à 12V et considérant le temps de cycle comme durée du cycle de conduite, on obtient une capacité de 40 Ah. Donc pour une tension du bus dc de 48V on aura 4 batteries 12V/40Ah et pour une tension du bus dc de 72V on aura 6 batteries de 12V/40Ah.

4.3 Système de gestion énergétique

Cette section traite du développement de stratégies de gestion énergétique dans l'optique d'améliorer ou d'optimiser l'efficacité de la pile dans certains cas d'une part et de la répartition de puissance entre les différentes sources d'autre part. Cela va permettre d'assurer le bon fonctionnement de la PàC et des batteries en fonction de leurs limites de contraintes respectives. Cette section se concentre sur la conception et la simulation de stratégies de gestion de l'énergie. Plusieurs stratégies de gestion seront présentées dans ce travail en se basant sur les études menées dans diverses littératures. Les performances de chacune des stratégies seront simulées avec les mêmes conditions initiales et les principaux

critères de comparaison qui sont : la consommation d'hydrogène, l'état de charge des batteries et l'efficacité globale du système [48] (en général, nous nous focaliserons sur l'efficacité de la pile).

Les principaux objectifs d'un système de gestion de l'énergie sont de garantir :

- Une faible consommation d'hydrogène ;
- Une meilleure efficacité globale élevée du système ;
- Améliorer l'état de charge (SOC) des batteries ;

Ceci est réalisé en contrôlant la réponse en puissance de chaque source d'énergie en fonction de la charge (puissance requise par le véhicule) à travers leurs convertisseurs associés, en utilisant une stratégie de gestion de l'énergie donnée [48].

Les systèmes de gestion de l'énergie abordés sont les techniques de gestion de l'énergie les plus courantes et les plus couramment utilisées dans les applications de transport à caractères hybrides et comprennent :

- la stratégie de contrôle par machines d'État [49],[50] ;
- la stratégie de logique floue basée sur les règles [51] ;
- la stratégie classique de contrôle par correcteur PI [52] ;
- la stratégie de découplage fréquentiel logique floue [53],[54], [55] ;
- la stratégie de minimisation de la consommation équivalente en carburant (hydrogène dans notre cas de figure) (ECMS) [56], [57], [58] ;
- Stratégie de contrôle par recherche de point de maximum d'efficacité (MEPT) & maximum de puissance (MPPT) avec contrôle de l'état de charge de l'élément de stockage (*Thermostatic Control*) ;

Pour une comparaison équitable, toutes les stratégies sont conçues sur la base des mêmes exigences (comme donnée dans le tableau ci-dessous). En ce qui concerne le Bus DC, ce dernier est déjà contrôlé via un correcteur PI comme présenté au chapitre 3.

EXIGENCES DE CONCEPTION	Valeurs
Puissance PàC [$Pfc_{min} - Pfc_{max}$] (W)	[150 – 5000]
Puissance batterie [$P_{batt,min} - P_{batt,max}$] (W)	[-3000 – 6000]
État de charge batterie [$SOC_{min} - SOC_{max}$] (%)	[60 – 90]
Tension bus DC [$Vdc_{min} - Vdc_{max}$] (V)	[60 – 72]

Tableau 4-2: Exigences pour le développement des stratégies de gestion de l'énergie

4.3.1 Stratégie de contrôle basée sur la machine d'état

Cette stratégie a été mis au point dans [59] pour répartir la puissance requise entre la pile à combustible et la batterie dans le but de maximiser l'efficacité du système. C'est une méthode déterministe basée sur des règles qui peuvent contenir de nombreux états de fonctionnement pour contrôler le flux d'énergie entre les différentes composantes d'un système hybride à pile à combustible (par exemple)[60]. Sa mise en œuvre se compose de huit (8) états comme présenté au tableau ci-dessous. Ces états sont issus en utilisant l'approche proposée dans [49] et sont basés sur les limites opérationnelles de la pile à combustible et la batterie dans le système, la puissance demandée par le véhicule et l'état de charge de la batterie.

SOC Batterie	État	Puissance demandée	Puissance de la PàC
<i>SOC Haut</i> <i>(SOC > SOC_{max})</i>	1	$P_{dem} < P_{fc,min}$	$P_{fc,ref} = P_{fc,min}$
	2	$P_{dem} \in [P_{fc,min}, P_{fc,max}]$	$P_{fc,ref} = P_{dem}$
	3	$P_{dem} \geq P_{fc,max}$	$P_{fc,ref} = P_{fc,max}$
<i>SOC Normal</i> <i>(SOC ∈ [65,85])</i>	4	$P_{dem} < P_{fc,opt}$	$P_{fc,ref} = P_{fc,opt}$
	5	$P_{dem} \in [P_{fc,opt}, P_{fc,max}]$	$P_{fc,ref} = P_{dem}$
	6	$P_{dem} \geq P_{fc,max}$	$P_{fc,ref} = P_{fc,max}$
<i>SOC Faible</i> <i>SOC < SOC_{min}</i>	7	$P_{dem} < P_{fc,max}$	$P_{fc,ref} = P_{dem} + P_{char}$
	8	$P_{dem} \geq P_{fc,max}$	$P_{fc,ref} = P_{fc,max}$
$P_{char} = -P_{batt,min} \quad P_{fc,opt} = P_{fc} _{max.efficacité}$			

Tableau 4-3: Répartition de puissance entre les différentes sources du systèmes pour une stratégie de gestion basée sur la machine d'état

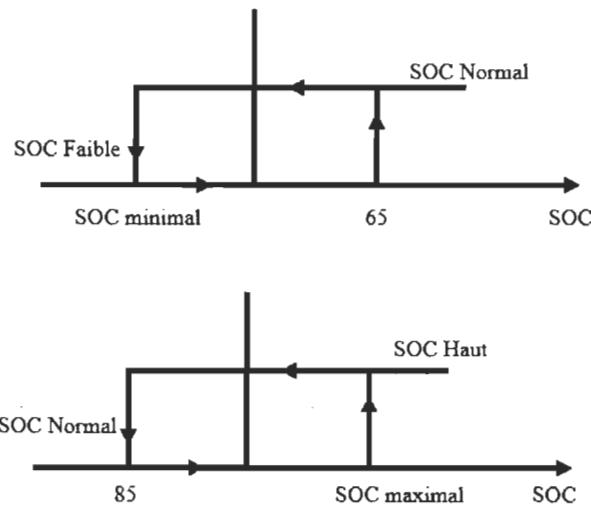


Figure 4-9 : Contrôle hystérésis

La puissance de la pile à combustible est déterminée en fonction de la plage SOC de la batterie et de la puissance de charge et donc le schéma d'implémentation est présenté à la Figure 4-10 ci-dessous

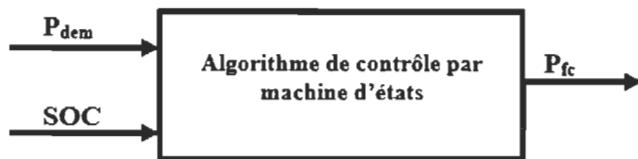


Figure 4-10: Représentation de l'implémentation de la stratégie de gestion basée sur une machine d'état

Un inconvénient à cette méthode est le fait qu'un contrôle d'hystérésis (Figure 4-9) est requis lors de la commutation des états, ce qui affecte la réponse du système de gestion d'énergie face aux changements de la puissance demandée. Comme représenté à la Figure 4-10, la sortie de l'algorithme est la puissance de référence de la pile à combustible, qui est obtenue par division de la puissance issue de l'algorithme par l'efficacité du convertisseur.

Avec la puissance de référence de la pile et à l'aide d'une lookup table qui est la représentation de la puissance de la PàC en fonction de son courant, on obtiendra le courant de référence qui servira de contrôle de référence pour le convertisseur DC/DC. En outre il est également possible d'obtenir le courant de référence de la pile à l'aide de sa tension.

En implémentant cette stratégie sous Matlab/Simulink, on obtiendra la puissance de la PàC, la puissance de la batterie et également son état de charge. À partir de toutes ces données, nous évaluerons la consommation en hydrogène du système et observerons la courbe d'efficacité de la PàC. Cette implémentation a pour but de vérifier les consignes fixées dans le développement de la stratégie. Les figures ci-dessous présentent les objectifs.

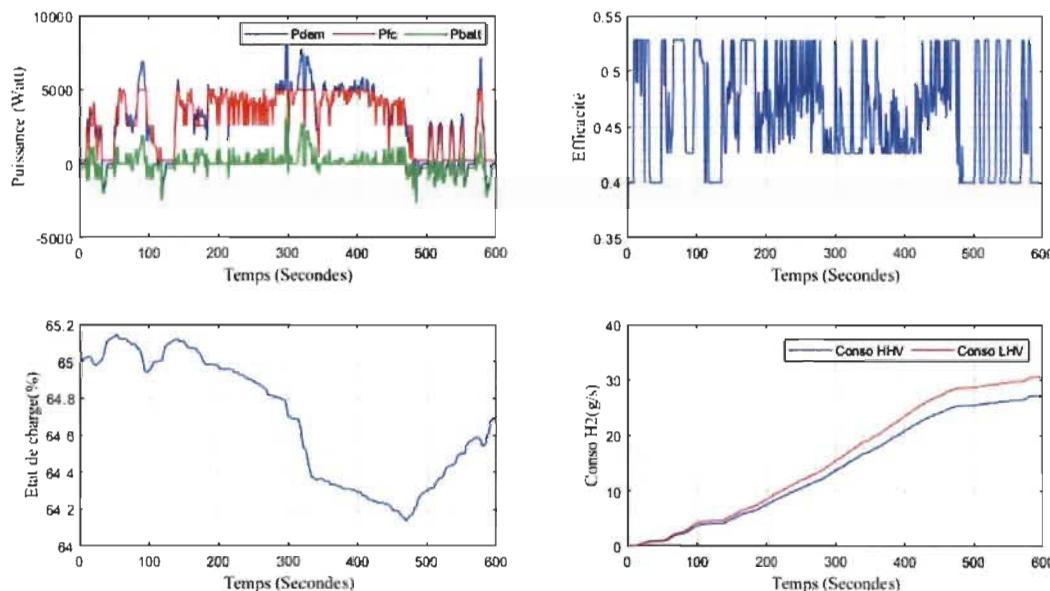


Figure 4-11: Courbes de puissance, rendement état de charge et de consommation en hydrogène pour la stratégie de gestion basée sur une machine d'état

Cette stratégie est plus axée sur la répartition de puissance dans les limites de fonctionnement de chacune des entités. En faisant varier l'état de charge initial de la

batterie, la puissance à allouer à la pile sera fortement affectée donc, afin de faire fonctionner cet algorithme de façon optimale, il faudrait que la batterie soit dans un état de charge variant autour de 90 %. Dans un autre sens, on pourra reconsidérer le dimensionnement du système afin que la pile puisse fonctionner de façon optimale et majorer la puissance de batterie. Cette reconsidération nous mènera sur une stratégie hors ligne de fonctionnement entre la puissance optimale et/ou la puissance maximale. Cette stratégie sera évoquée en fin de ce chapitre, mais ne sera pas implémentée.

4.3.2 Stratégie de contrôle basée sur les règles de la logique floue

Cette stratégie présente une réponse rapide face aux changements opérés au niveau de la puissance demandée par rapport à la stratégie de contrôle par machine d'états. Comme précédemment, la puissance de la pile à combustible est obtenue à partir des fonctions d'appartenance de la puissance demandée et l'état de charge de la batterie et de l'ensemble des règles “*if-then*”. Le schéma de cette stratégie est présenté à la Figure 4-12

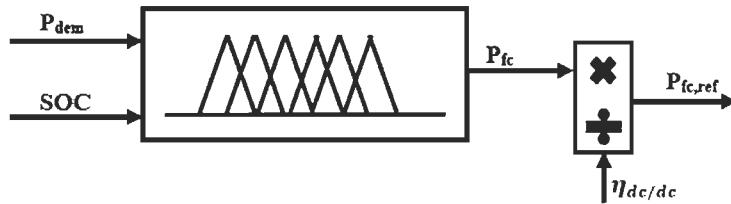


Figure 4-12: Stratégie de gestion de l'énergie basée sur la logique floue

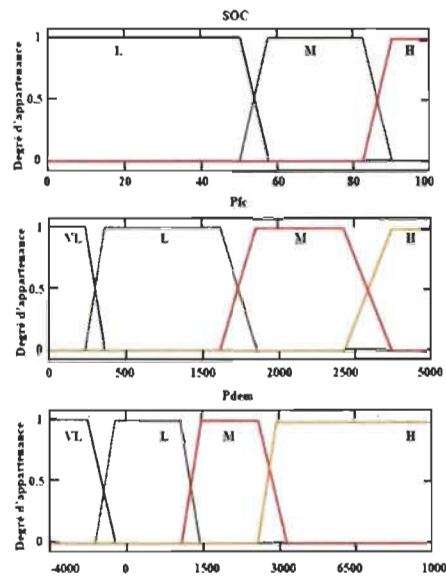


Figure 4-13: Fonctions d'appartenance pour le SOC, la puissance demandée et la puissance de la pile

Son développement est fait selon une approche similaire à [51] où les fonctions d'appartenance trapézoïdale sont utilisées, comme le montre la Figure 4-13. Les règles de la logique floue sont dérivées des décisions issues de la machine d'état comme indiqué au tableau ci-dessous :

SOC ↓	Pdem →	VL (Très faible)	L (Faible)	M (Moyen)	H (Haut)
L (Faible)		L	M	H	H
M (Moyen)		VL	L	M	H
H (Haut)		VL	L	M	H

Tableau 4-4 : Règles de la logique floue assignée à la pile

L'approche de l'inférence floue de Mamdani est utilisée avec la méthode du centroïde pour la défuzzification et la surface de contrôle de logique floue obtenue est représentée sur la Figure 4-14

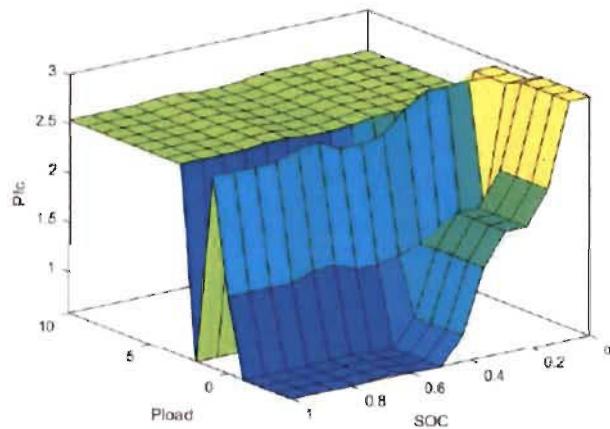


Figure 4-14: Surface de logique floue

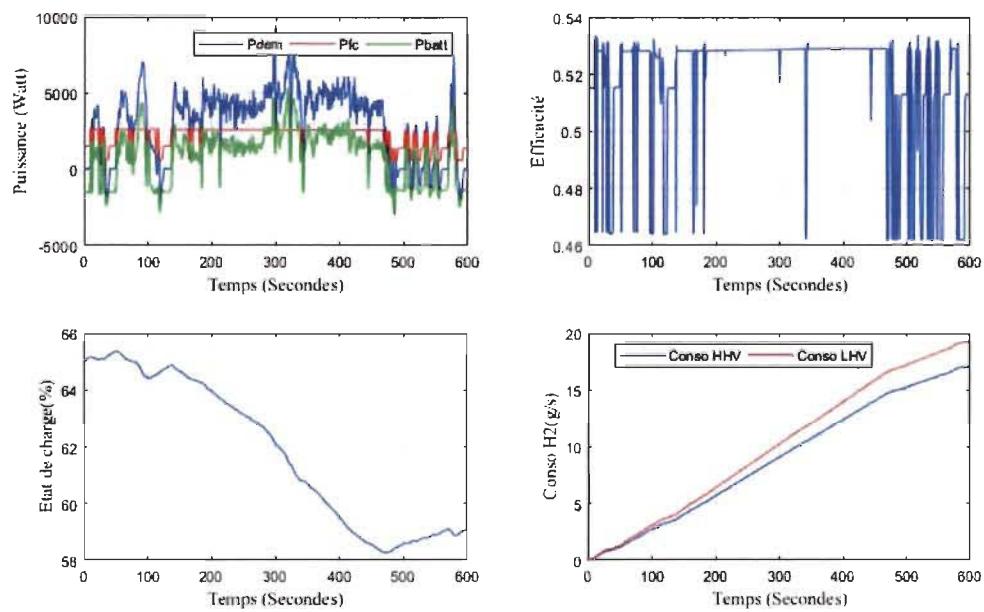


Figure 4-15: Courbe de puissances, rendement, état de charge batterie et consommation en hydrogène pour une stratégie de gestion par logique floue

Dans cette stratégie, la pile fonctionne en tout temps à sa puissance optimale et en même temps, recharge lentement la batterie. Au début de la simulation (à environ 1/6 du cycle de conduite), la batterie est moins sollicitée ce qui permet un léger maintien du SOC. Ensuite lorsque le véhicule entame les phases d'accélération, l'apport en puissance se fait par la PàC et la batterie, ce qui a pour effet de la décharger jusqu'à la dernière phase du cycle qui correspond à des périodes d'accélération et décélération. Dans cette, la pile assure la recharge de la batterie.

4.3.3 Stratégie basée sur le découplage fréquentiel et la logique floue

La stratégie de découplage de fréquence et de logique floue permet au système de pile à combustible de fournir une demande de charge à basse fréquence tandis que les autres sources d'énergie traitent les demandes à haute fréquence [55]. Le principal avantage de cette méthode est le fait que l'énergie moyenne de la batterie est proche de zéro, ce qui garantit une légère variation du SOC de la batterie. Néanmoins, un contrôleur à logique floue est nécessaire pour contrôler le SOC de batterie autour d'une limite minimale [61]. Le schéma de cette stratégie est présenté à la Figure 4-16 ci-dessous, où un filtre passe-bas est utilisé pour le découplage fréquentiel.

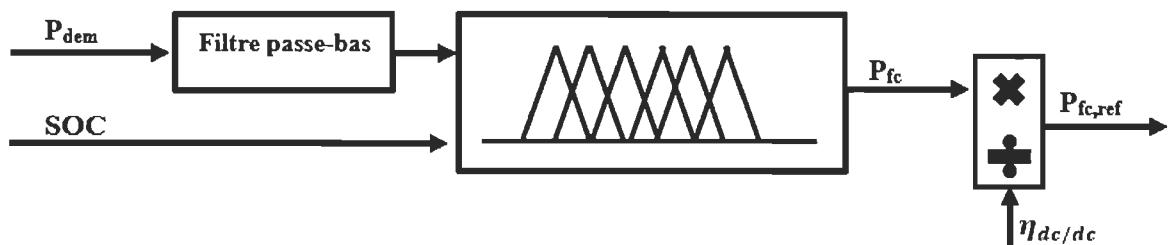


Figure 4-16: Schéma découplage + logique floue

La fréquence de coupure du filtre est fixée à 10 mHz, ce qui permet à la pile à combustible de fournir une puissance presque constante. Le contrôleur de logique floue est le même que dans la stratégie basée sur les règles de la logique floue. L'exception apportée réside au niveau de la puissance demandée. Les limites de la fonction d'appartenance sont centrées entre zéros et la valeur maximale de sortie du filtre. Ainsi le nouveau profil de puissance après le filtre est présenté à la figure ci-dessous :

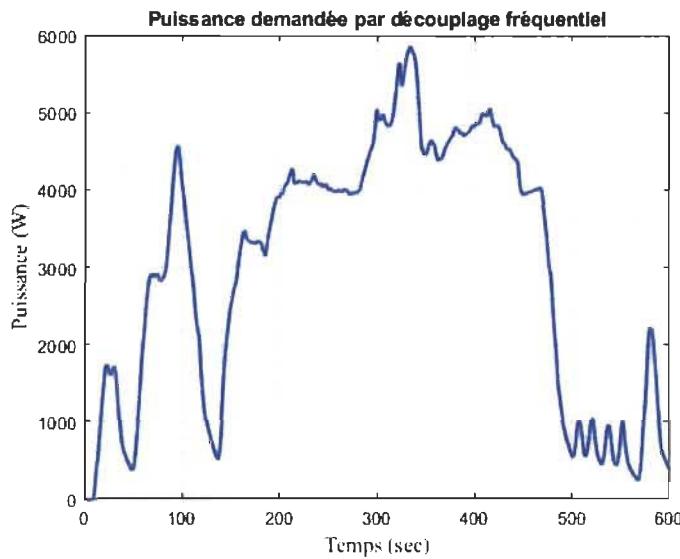


Figure 4-17: Puissance demandée par découplage fréquentiel

Tout comme dans la stratégie de logique floue précédemment évoquée, on obtient une surface

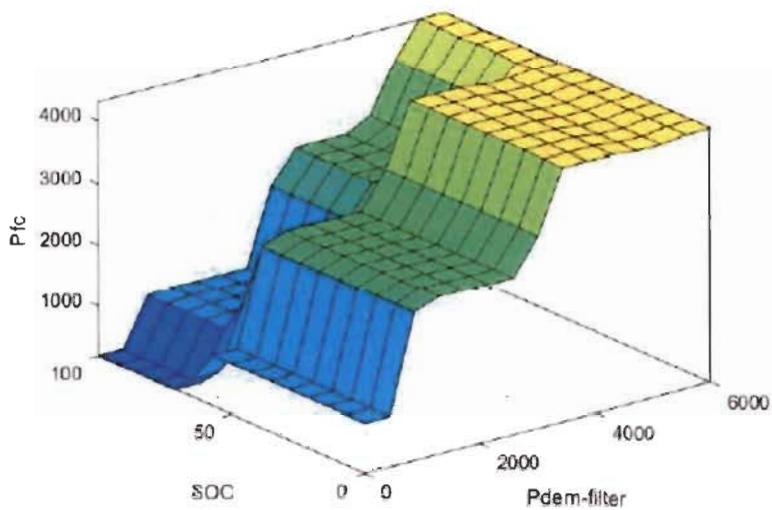


Figure 4-18: Surface stratégie découplage fréquentiel et logique floue

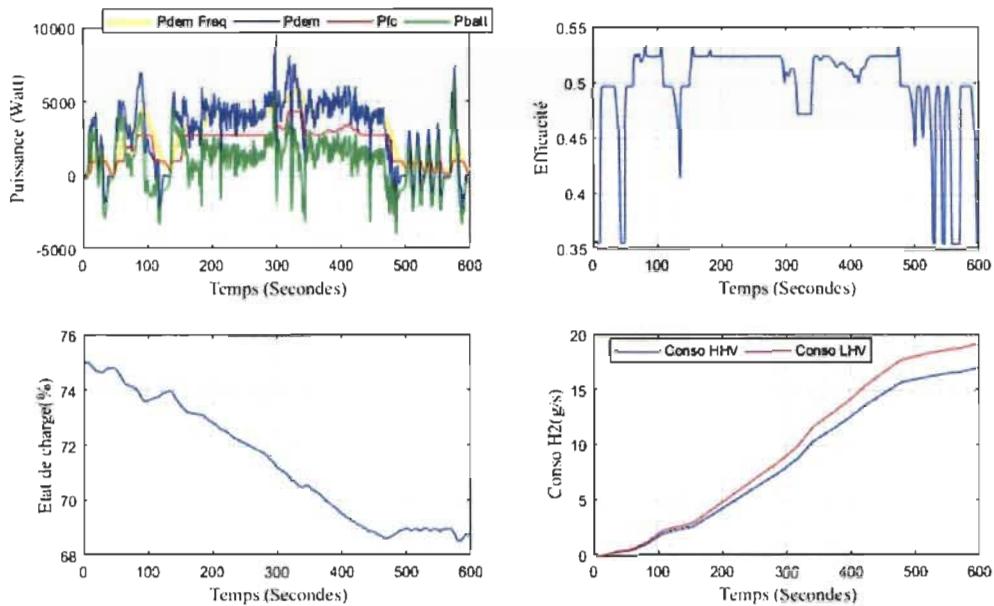


Figure 4-19: Courbe de puissances, rendement, état de charge batterie et consommation en hydrogène pour une stratégie de gestion par découplage fréquentiel et logique floue

Cette stratégie présente de meilleurs résultats par rapport à celles précédentes, car ici, la PàC n'est pas constamment soumise à des variations provenant de la charge. Cela est dû au filtre passe bas qui joue le rôle de rejeter tous les signaux de hautes fréquences pouvant perturber la PàC. Également, on peut observer sur la courbe du SOC de la batterie que ce dernier se maintient à la fin du cycle, mais se comporte comme dans la stratégie précédente. Cette stratégie comme la précédente présente une bonne utilité dans le maintien du SOC, mais aussi s'assure que la PàC soit moyennement sollicitée. En évaluant la consommation en hydrogène, les deux stratégies consomment presque la même quantité d'hydrogène.

4.3.4 La stratégie basée sur la minimisation de la consommation équivalente

Cette stratégie est l'une des méthodes de contrôle d'approche d'optimisation en temps réel qui est basée sur les fonctions de coût et utilisée par de nombreux auteurs [56], [57], [58],[62],[63],[64]. L'objectif est de réduire la consommation d'hydrogène en minimisant l'hydrogène consommé par la pile à combustible et l'énergie équivalente requise pour maintenir le SOC de la batterie. L'approche proposé dans [58] sera utilisé dans cette étude. Ici, au lieu d'utiliser deux facteurs d'équivalence constante, un facteur d'équivalence variable qui dépend du SOC de la batterie est utilisé [56], [57], [64]. Aussi, pour rendre l'algorithme moins sensible au coefficient d'équilibre du SOC (μ), le facteur d'équivalence fait partie de la fonction de coût à optimiser. Autrement dit, pour différentes valeurs de μ , une valeur optimale du facteur d'équivalence est obtenue. Le schéma équivalent est présenté à la figure ci-dessous

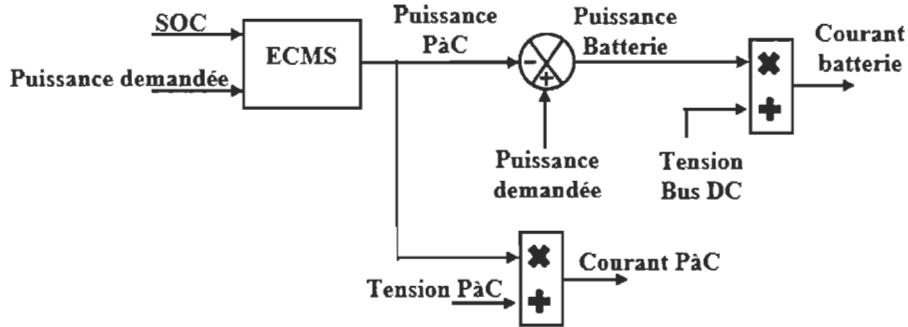


Figure 4-20: Stratégie de contrôle ECMS

Le problème d'optimisation afin de minimiser la consommation d'hydrogène équivalente peut être formulé comme suit :

trouver la solution optimale $x = [P_{fc}, \alpha, P_{batt}]$, qui minimise

$$F = [P_{fc} + \alpha P_{batt}] \cdot \Delta T \quad (4-16)$$

Sous les contraintes d'égalités suivantes

$$P_{dem} = P_{fc} + P_{batt} \quad (4-17)$$

$$\alpha = 1 - 2 * \mu * \left(\frac{SOC - 0.5 * (SOC_{max} + SOC_{min})}{SOC_{max} + SOC_{min}} \right) \quad (4-18)$$

Avec les limites suivantes

$$P_{fc_{min}} \leq P_{fc} \leq P_{fc_{max}} \quad (4-19)$$

$$P_{batt_{min}} \leq P_{batt} \leq P_{batt_{max}} \quad (4-20)$$

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (4-21)$$

$$0 \leq \alpha \leq 100 \quad (4-22)$$

Ou P_{fc} , P_{batt} et P_{dem} sont la puissance de la pile, la puissance de la battery et celle demandée respectivement. α est le coefficient de pénalité. ΔT est le temps d'échantillonnage. $P_{fc_{min}}$ et $P_{fc_{max}}$ sont les puissances minimales et maximales de la pile. $P_{batt_{min}}$ et $P_{batt_{max}}$ sont les puissances minimale et maximale de la batterie. SOC_{min} et SOC_{max} sont les SOC minimum et maximal de la batterie. μ est le coefficient d'équilibre du SOC de la batterie (égale à 0.6 comme présenté dans [56] et [64]).

Pour l'implémentation, on utilisera un algorithme génétique tels que « *particle swarm optimization* » car c'est un algorithme itératif et nous permet d'ajuster la population afin d'obtenir de meilleurs résultats. L'intérêt pour cet algorithme résulte du fait que l'on peut faire appel à d'autre technique de minimisation, en d'autres termes, le système fait tourner deux algorithmes d'optimisation de manière simultanée jusqu'à atteindre la convergence. De ce fait on pourra choisir entre : un algorithme de point-intérieur, un algorithme de programmation quadratique séquentielle (qui présente un très bon résultat si on transforme la fonction de coût en une fonction quadratique) et un algorithme Simplex ou double Simplex.

Dans les figures qui suivront, plusieurs réponses du système seront présentées en fonction de la population prise en compte dans l'algorithme PSO.

A partir de l'idée développée dans cette section, il est également possible de l'assimiler à une stratégie de gestion optimale qui est surtout effectuée en temps réel. Mais c'est une implémentation assez onéreuse car elle demande une puissance de calcul assez importante.

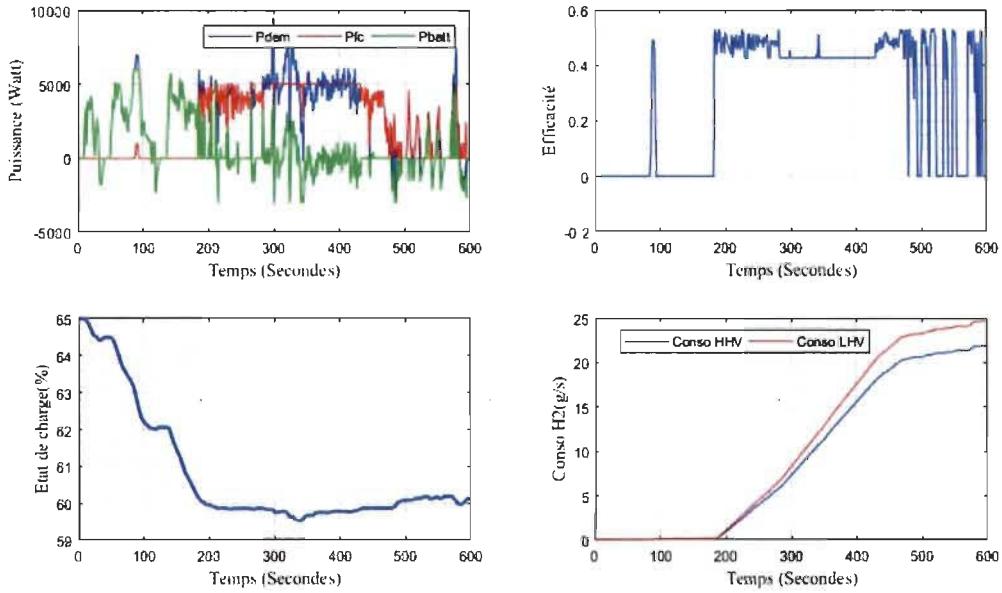


Figure 4-21: Courbe de puissance, d'efficacité, du SOC batterie et de la consommation en hydrogène pour une stratégie ECMS

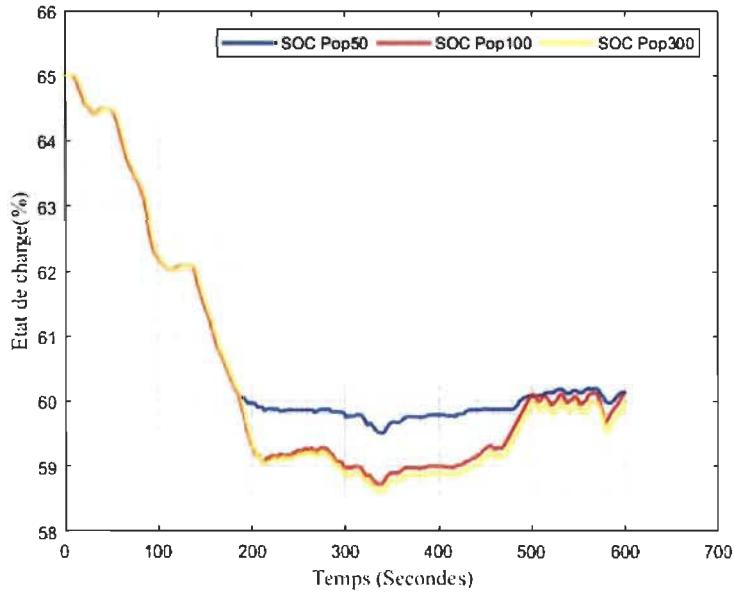


Figure 4-22: Évolution de l'état de charge de la batterie en fonction de la population prise en compte dans l'algorithme basé sur le PSO pour une stratégie basée sur le ECMS

En Figure 4-21 (1-ag), on a la courbe de puissance demandée, celle de la batterie et celle de la puissance optimale de la pile. On peut observer le partage de puissance entre les différents éléments et que la batterie assure la fourniture en puissance durant les 200

premières secondes du cycle avec une légère demande de la pile. Ce fonctionnement est dû au seuil du SOC de la batterie initialement fixé. Autrement, la pile devrait rentrer en fonctionnement tout au long du cycle de conduite. En Figure 4-21 (2-ag), le SOC de la batterie est maintenu autour de son point de référence et est maintenu à l'aide de la pile car dans cette situation, la batterie et la pile fournissent simultanément en énergie et dans la même foulée la pile recharge la batterie.

Sur la Figure 4-22, présentant le SOC de la batterie à différent stade de population pour l'algorithme d'optimisation, le système présente une tendance forte envers la batterie pour la fourniture en puissance mais au final le SOC se stabilise toujours à son point de référence. Cette stratégie peut être poussée plus loin mais comme mentionné plus haut, il faudra une puissance de calcul considérable. Niveau consommation en hydrogène, le système est plus économique que la stratégie précédente.

4.3.5 Stratégie de contrôle basée sur la commande optimale

Dans cette approche nous nous pencherons sur stratégie différente de celles précédentes car celle-ci se fera en ligne et non offline comme les autres. Elle vise à optimiser la consommation équivalente en hydrogène en temps réel. Pour ce faire, nous utiliserons une technique d'optimisation en temps réel en utilisant le multiplicateur de LaGrange.

Ayant toujours le même objectif, qui est de minimiser la consommation en hydrogène dans le système, nous introduirons un nouveau concept d'optimisation basé sur des modèles approximatifs de la pile et également de la batterie. Dans cette nouvelle approche, nous prendrions en considération toutes les pertes dans le système y compris les auxiliaires au niveau de la puissance demandée par le véhicule. La puissance des auxiliaires au niveau

du véhicule a été donnée dans [65]. Également, pour mieux simplifier le système, il faudra développer de nouveaux modèles linéaires de la batterie et de la PàC. Cette simplification permettra de mieux développer la stratégie de gestion d'énergie : la technique à utiliser sera celle d'une approximation polynomiale.

4.3.5.1 Développement de nouveaux modèles : approximation polynomiale

L'idée derrière cette stratégie est de pouvoir approximer les tensions de la pile et de la batterie à un polynôme de 1^{er} ordre. En observant les courbes de tensions de la pile et de la batterie, une approximation exacte serait un polynôme de second ou troisième ordre mais cela rendrait plus difficile le problème d'optimisation. Alors, les deux systèmes seront représentés par une tension en circuit ouvert et une résistance interne. Ces modèles sont présentés comme suit :

- Pile à combustible

La pile à combustible est représentée à la Figure 4-23 par sa tension en circuit ouvert et sa résistance interne

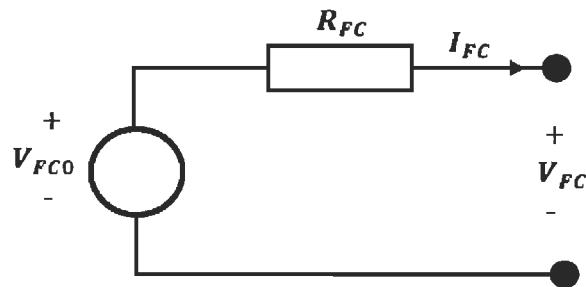


Figure 4-23: Modèle approximatif de la PàC à une équation de 1^{er} ordre

En utilisant la loi de maille sur la Figure 4-23, on obtient la tension aux bornes de la PàC comme donnée à l'équation (4-23)

$$V_{FC} = V_{FC,0} - R_{FC}I_{FC} \quad (4-23)$$

La puissance aux bornes de la PàC est donnée par l'équation (4-24)

$$P_{FC} = V_{FC}I_{FC} = V_{FC,0}I_{FC} - R_{FC}I_{FC}^2 \quad (4-24)$$

De cette équation (4-24) ci-dessus, il est facile d'en déduire le courant de la pile qui sera la solution à cette dernière (uniquement une seule solution, celle qui est positive car la PàC est irréversible)

$$I_{FC} = \frac{V_{FC,0}}{2R_{FC}} \left(1 - \sqrt{1 - 4P_{FC} \frac{R_{FC}}{V_{FC,0}^2}} \right) \quad (4-25)$$

La consommation en hydrogène d'une pile est donnée avec précision par son courant. À l'aide de la masse molaire de l'hydrogène et le flux massique d'hydrogène \dot{m}_{H_2} , qui est proportionnel au courant de la pile, la consommation d'hydrogène est donnée par l'équation (4-26) ci-dessous

$$\dot{m}_{H_2} = N_{FC} \frac{M_{H_2}}{2F} I_{FC} = N_{FC} \frac{M_{H_2}}{2F} \frac{V_{FC,0}}{2R_{FC}} \left(1 - \sqrt{1 - 4P_{FC} \frac{R_{FC}}{V_{FC,0}^2}} \right) \quad (4-26)$$

Pour s'assurer du bon fonctionnement de la PàC, cette dernière devrait fonctionner dans ses limites de puissances minimale et maximales

$$P_{FC,min} \leq P_{FC} \leq P_{FC,max} \quad (4-27)$$

Ici $P_{FC,min}$ et $P_{FC,max}$ indiquent la puissance de fonctionnement nominale minimale et maximale de la pile à combustible. En ce qui concerne la puissance minimale, elle peut être prise entre 10 – 20 % de la puissance maximale.

- Batterie

Semblable à la pile à combustible, la batterie comme stockage d'énergie est représentée comme une source de tension idéale avec une résistance interne, comme esquissé dans Figure 4-24 ci-dessous

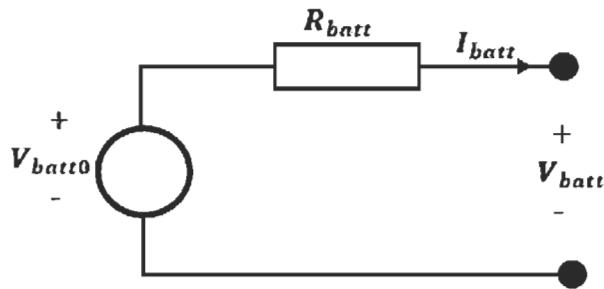


Figure 4-24: Modèle approximatif de la batterie à une équation de 1er ordre

La tension aux bornes de la batterie est égale à :

$$V_{batt} = V_{batt,0} - R_{batt} I_{batt} \quad (4-28)$$

Lors de la décharge de la batterie, la puissance P_{batt} aux bornes de la batterie est égale à la puissance de la source de tension interne idéale $P_{batt,0}$ moins les pertes internes sur la résistance R_{batt}

$$P_{batt} = V_{batt,0} I_{batt} - R_{batt} I_{batt}^2 \quad (4-29)$$

Par conséquence, cette puissance peut être réécrite comme suit :

$$P_{batt} = P_{batt,0} - P_{batt,0}^2 \frac{R_{batt}}{V_{batt,0}^2} \quad (4-30)$$

Comme avec le courant de la pile, celui de la batterie est exprimé comme suit :

$$I_{batt} = \frac{V_{batt,0}^2}{2R_{batt}} \left(1 - \sqrt{1 - 4P_{batt} \frac{R_{batt}}{V_{batt,0}^2}} \right) \quad (4-31)$$

La plupart des publications sur les systèmes de gestion d'énergie font référence aux pertes de batterie en tant qu'efficacité [66],[67],[68],[69].

$$P_{batt} = \eta_S P_{batt,0} \quad (4-32)$$

En terme d'efficacité, l'équation (4-33) fournit un modèle d'efficacité de la batterie de premier ordre :

$$\eta_S = 1 - P_{batt,0} \frac{R_{batt}}{V_{batt,0}^2} \quad (4-33)$$

L'état de charge restera identique à l'équation développée dans ce chapitre. Tout comme pour le fonctionnement des piles, la batterie sera également délimitée par des valeurs minimales et maximales. Ici cela sera l'état de charge et la puissance de la batterie.

- Convertisseur

Utilisant un convertisseur DC/DC de type élévateur, sa puissance sera donnée en fonction de celle de la pile et de l'efficacité du convertisseur. Alors on aura :

$$P_{bus} = \eta_{conv} P_{fc} \quad (4-34)$$

$$V_{bus} I_{FC,net} = \eta_{conv} I_{FC} V_{FC} \quad (4-35)$$

La combinaison du convertisseur DC/DC et la PàC convertit le courant de pile I_{FCn} en un courant net $I_{FCn,net}$ selon un rapport défini par les tensions sur les bornes de la pile V_{FCn} et les bornes du bus CC V_{bus} et l'efficacité du convertisseur $\eta_{conv,n}$

$$I_{FC,net} = r_n I_{FC} \quad (4-36)$$

Sur la base du modèle de la PàC et du modèle de batterie respectivement représentés par les équations (4-23) et (4-28), ce rapport s'exprime comme suit:

$$r_n = \eta_{conv} \frac{V_{FC}}{V_{bus}} = \eta_{conv} \frac{V_{FC,0} - R_{FC} I_{FC}}{V_{batt,0} - R_{batt} I_{batt}} \quad (4-37)$$

Compte tenu du comptage coulombien, le courant moyen de la batterie doit être nul pour éviter l'épuisement ou la surcharge ($\overline{I_{batt}} = 0$). En supposant des petites variations relatives pour le courant de la PàC et le courant de la batterie autour de leur valeur moyenne, le rapport r_n est approximé par:

$$r_n = \eta_{conv} \frac{V_{FC,0} - R_{FC} \overline{I_{FC}}}{V_{batt,0}} \quad (4-38)$$

Connaissant les plages de variation du courant de la PàC, il est possible d'évaluer sa valeur moyenne. La valeur moyenne d'un signal X sur N échantillons est donnée par l'équation ci-dessous :

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \int_0^N X(t) dt \quad (4-39)$$

En conséquence, le rapport r_n est constant sur le cycle de conduite et constant dans l'optimisation.

- Auxiliaires

En général, dans les systèmes de propulsion hybride à pile à combustible, la puissance requise pour une partie des auxiliaires suivra le fonctionnement de la PàC [70]. En particulier, le compresseur d'air contribue de manière significative à la demande totale de puissance pour les auxiliaires. Comme la consommation d'oxygène de la pile est linéaire avec le courant de la pile, et en supposant un courant de compresseur d'air proportionnel à son débit massique d'air, le courant total $I_{aux,n}$ pour faire fonctionner les auxiliaires est approximé comme suit:

$$I_{aux} = \gamma_n I_{FC} + I_{aux0}, \quad (4-40)$$

Ici I_{aux0} , définie le décalage (puissance initiales du compresseur) et la part proportionnel du courant de la pile nécessaire pour faire fonctionner les auxiliaires.

Un modèle légèrement différent, proposé dans [71] et [72], considère la puissance P_{aux} , (nécessaire pour les auxiliaires) proportionnelle à la puissance de la pile à combustible:

$$P_{aux} = \gamma_n P_{FC} + P_{aux0}, \quad (4-41)$$

Les modèles présentés fournissent une base pour la solution au problème de la gestion de l'énergie, qui sera présenté dans la section suivante.

4.3.5.2 Formulation du problème

Compte tenu des dimensions de la PàC et de la batterie, l'objectif du EMS est de minimiser la consommation de carburant sur un cycle de conduite de durée t_f (durée totale du cycle de conduite), tout en répondant à la puissance P_{dem} demandée par le véhicule. Ce

problème d'optimisation est défini comme la minimisation de la consommation d'hydrogène par rapport à un certain nombre de contraintes d'égalité et d'inégalité. Cet ensemble de contraintes est réduit à un ensemble minimum de contraintes, essentielles au problème d'optimisation. La consommation totale en hydrogène sur le cycle de conduite est exprimée sous forme de coût J , en fonction de la variable de contrôle P_{FC} .

$$J(P_{FC}) = \int_0^{tf} \dot{m}_{H_2}(P_{FC}) \quad (4-42)$$

La valeur P_{FC} de la fonction de coût $J(P_{FC})$ qui fournit le minimum global est appelée solution P_{FC}^* du problème d'optimisation. En tant que contrainte à cette solution, la demande d'énergie doit être satisfaite :

$$P_{FC} + P_{batt} - P_{dem} - P_{aux} = 0 \quad (4-43)$$

En tant que contraintes d'inégalité, la puissance de la pile à combustible (4.3) et la puissance de la batterie (4.4) devraient rester dans leurs limites.

$$P_{FCn,min} \leq P_{FCn} \leq P_{FCn,max} \quad (4-44)$$

$$P_{batt,min} \leq P_{batt} \leq P_{batt,max} \quad (4-45)$$

Pour faciliter la résolution du problème, une autre contrainte rentrera en compte : celle de l'énergie stockée dans la batterie. Cette dernière en fin de cycle de conduite devrait être égale à celle au début du cycle. Et tout comme l'état de charge de la batterie, l'énergie de stockage devrait être comprise entre une valeur minimale et une valeur maximale

$$SOE(tf) \geq SOE(0) \quad (4-46)$$

$$SOE_{min} \leq SOE \leq SOE_{max} \quad (4-47)$$

La contrainte (4-46) se réfère à un cycle de conduite. Elle permet au véhicule de continuer à fonctionner normalement pendant de nombreux cycles de conduite. Elle permet également de comparer différentes stratégies de gestion de l'énergie en fonction de leur performance sur l'économie d'hydrogène du véhicule considéré.

Bien que définie comme contrainte d'inégalité, (4-46) est considérée comme une contrainte d'égalité, puisque le minimum dans la consommation de carburant concerne directement la quantité minimale d'énergie restante dans la batterie à la fin du cycle de conduite considéré ($SOE(t_f)$). Mais énoncée comme contrainte d'inégalité, elle ajoute une certaine flexibilité aux solveurs.

Comme indiqué dans la contrainte (4-47) la batterie ne doit pas être déchargée ni surchargée à tout moment. Pour les technologies de batteries disponibles maintenant et dans un proche avenir, il est très peu probable que cette contrainte soit violée, car dans les systèmes de propulsion hybride à pile à combustible, les capacités de gestion de puissance des batteries sont beaucoup plus limitées que leur capacité de stockage [73]. Par conséquent, la contrainte (4-47) n'est pas considérée comme faisant partie du problème d'optimisation, mais vérifiée par la suite.

Sur la base des observations précédentes, le problème d'optimisation est essentiellement constitué par la fonction de coût (4-42) et deux contraintes d'égalité (4-43) et (4-46). La combinaison du modèle de consommation en hydrogène (4-26) avec la fonction de coût (4-42) relie la variable de contrôle P_{FC} à la consommation de carburant $J(P_{FC})$.

$$J(P_{FCn}) = \int_{t=0}^{tf} N_{FCn} \frac{M_{H2}}{2F} \frac{V_{FC,0}}{2R_{FC}} \left(1 - \sqrt{1 - 4P_{FC} \frac{R_{FC}}{V_{FC,0}^2}} \right) dt \quad (4-48)$$

Les modèles pour le rendement de la batterie (4-33) et la puissance auxiliaire (4-41) définissent la relation entre la puissance de la pile P_{FC} , la puissance de la batterie interne $P_{batt,0}$ et la puissance requise P_{dem} .

$$(\eta_{conv} - \gamma_n)P_{FC} + P_{batt,0} \left(1 - P_{batt,0} \frac{R_{batt}}{V_{batt,0}^2} \right) - (P_{dem} + P_{aux,0}) = 0 \quad (4-49)$$

Sur la base du modèle de batterie développée ci-dessus, la contrainte (4-46) est exprimée en termes de puissance de la batterie $P_{batt,0}$

$$\int_{t=0}^{tf} P_{batt,0} dt = 0 \quad (4-50)$$

Par conséquent, le problème d'optimisation se réduit à P_{FC}^* qui minimise la fonction de coût (4-48), sous réserve des contraintes (4-49) et (4-50)

4.3.5.3 Résolution du problème : solution

Pour résoudre le problème d'optimisation indiqué avec les deux contraintes sélectionnées, il est commode de convertir ceci en un problème d'optimisation équivalent sans contraintes en utilisant des multiplicateurs de Lagrange. Par conséquent, dans un premier temps, le problème d'optimisation est réduit à la variable de contrôle P_{FC} seulement en utilisant la contrainte d'égalité (4-49) pour exprimer $P_{batt,0}$ en fonction du P_{FC} .

$$P_{batt,0} = \frac{V_{batt,0}^2}{2R_{batt}} \left(1 - \sqrt{1 - 4 \frac{R_{batt}}{V_{batt,0}^2} [-(\eta_{conv} - \gamma_n)P_{FC} + P_{dem} + P_{aux,0}]} \right) \quad (4-51)$$

Ensuite, en utilisant un multiplicateur de Lagrange, la contrainte (4-50) est accolée à la fonction de coût (4-48) dans une fonction de Lagrange où le Lagrangien est $L(P_{FC}, \lambda)$.

$$\begin{aligned} L(P_{FCn}, \lambda) = & \int_{t=0}^{tf} N_{FC} \frac{M_{H_2}}{2F} \frac{V_{FC,0}}{2R_{FC}} \left(1 - \sqrt{1 - 4P_{FC} \frac{R_{FCn}}{V_{FCn,0}^2}} \right) dt + \\ & \lambda \int_{t=0}^{tf} \frac{V_{batt,0}^2}{2R_{batt}} \left(1 - \sqrt{1 - 4 \frac{R_{batt}}{V_{batt,0}^2} [-(\eta_{conv} - \gamma_n)P_{FC} + P_{dem} + P_{aux,0}]} \right) dt \end{aligned} \quad (4-52)$$

Au minimum, des changements infinitésimaux aléatoires sur δP_{FCn} et $\delta \lambda$ n'entraîneront pas de changements dans la fonction de coût équivalente $L(P_{FCn}, \lambda)$. Comme $\delta L = \frac{\delta L}{\delta P_{FCn}} \delta P_{FCn} + \frac{\delta L}{\delta \lambda} \delta \lambda$, les conditions nécessaires pour avoir un minimum sont que les dérivées partielles à travers les variables P_{FCn} et λ doit être zéro [74]

$$\frac{\delta L(P_{FCn}, \lambda)}{\delta P_{FCn}} = 0 \quad (4-53)$$

$$\frac{\delta L(P_{FCn}, \lambda)}{\delta \lambda} = 0 \quad (4-54)$$

La deuxième condition nécessaire renvoie la contrainte sur le SOE (4-50), ce qui laisse la première condition nécessaire pour fournir la variable de contrôle optimale en fonction du multiplicateur de Lagrange, $P_{FC}^*(\lambda)$.

$$\begin{aligned} \frac{\delta L(P_{FC}, \lambda)}{\delta P_{FC}} = & \int_{t=0}^{tf} N_{FC} \frac{M_{H_2}}{2F} \frac{1}{2V_{FCn,0}} \left(1 - 4P_{FC} \frac{R_{FC}}{V_{FC,0}^2} \right)^{-\frac{1}{2}} dt + \\ & \lambda \int_{t=0}^{tf} -(\eta_{conv} - \gamma_n) \left(1 - 4 \frac{R_{batt}}{V_{batt,0}^2} [-(\eta_{conv} - \gamma_n)P_{FC} + P_{dem} + \right. \\ & \left. P_{aux,0}] \right)^{-\frac{1}{2}} dt \end{aligned} \quad (4-55)$$

Une solution pour laquelle cette condition nécessaire soit zéro est égale à :

$$N_{FC} \frac{M_{H_2}}{2F} \frac{1}{2V_{FC,0}} \left(1 - 4P_{FCn} \frac{R_{FC}}{V_{FC,0}^2} \right)^{-\frac{1}{2}} - \lambda(\eta_{conv} - \gamma_n) \left(1 - 4 \frac{R_{batt}}{V_{batt,0}^2} \left[-(\eta_{conv} - \gamma_n) P_{FC} + P_{dem} + P_{aux,0} \right] \right)^{-\frac{1}{2}} = 0 \quad (4-56)$$

Et par conséquent

$$1 - 4P_{FC} \frac{R_{FC}}{V_{FC,0}^2} = \left(\frac{1}{-\lambda(\eta_{conv} - \gamma_n)} \frac{N_{FC} M_{H_2}}{2F V_{FC,0}} \right)^2 \left(1 - 4 \frac{R_{batt}}{V_{batt,0}^2} \left[-(\eta_{conv} - \gamma_n) P_{FC} + P_{dem} + P_{aux,0} \right] \right) \quad (4-57)$$

La résolution de P_{FC} à partir de (4-57) fournit la solution optimale en fonction de λ .

$$P_{FCn}^*(\lambda) = \frac{[\lambda(\eta_{conv} - \gamma_n) \frac{2F V_{FC,0}}{N_{FC} M_{H_2}}]^2 - 1 + 4 \frac{R_{batt}}{V_{batt,0}^2} (P_{dem} + P_{aux,0})}{4[\lambda(\eta_{conv} - \gamma_n) \frac{2F V_{FC,0}}{N_{FC} M_{H_2}}]^2 \frac{R_{FC}}{V_{FC,0}^2} + 4 \frac{R_{batt}}{V_{batt,0}^2} (\eta_{conv} - \gamma_n)} \quad (4-58)$$

Pour distinguer un minimum d'un maximum ou d'un point de selle, le Hessien devrait être positif semi-fini. Comme le domaine des solutions réalisables est convexe et que la fonction de coût est convexe [75], [68], une vérification du Hessien n'est pas incluse, et (4-58) fournit le minimum global.

Pour mieux comprendre (4-58), quelques limites seront discutées afin de simplifier la solution:

- En considérant une batterie sans perte ($R_{batt} = 0$), la variable de contrôle optimale P_{FCn}^* se réduit à une puissance constante, seulement dépendante de P_{dem} par le choix de λ . Toutes les transitoires dans la demande d'énergie sont couverts par la batterie, car l'énergie de stockage est n'est plus assujettie à des pertes.

- En opposition, une batterie pauvre avec une très forte résistance interne ($R_{batt} \rightarrow \infty$) transforme la variable de contrôle optimale P_{FCn}^* à un mode de suivi de charge

$$\text{avec } P_{FC}^*(\lambda) = \frac{1}{(\eta_{conv} - \gamma_n)} (P_{dem} + P_{aux,0})$$

L'interprétation de l'expression (4-58) est que la puissance demandée est équilibrée par rapport à la pile à combustible et la batterie en fonction de leurs pertes internes $\frac{V_{FC,0}^2}{R_{FC}}$ et $\frac{V_{batt,0}^2}{R_{batt}}$ et la valeur de λ . De plus, les coûts équivalents représentés par λ définissent une puissance moyenne de la pile à combustible pour compenser les variations du SOE de la batterie au cours du cycle de conduite.

L'expression (4-58) n'est valable que pour les niveaux de puissance de la pile et de la batterie, pour lesquels la puissance dissipée interne dans la pile ou la batterie est inférieure à leur puissance externe $(P_{FC} \leq \frac{V_{FC,0}^2}{R_{FC}})$ et $([-(\eta_{conv} - \gamma_n)P_{FC} + P_{dem} + P_{aux,0}] \leq \frac{V_{batt,0}^2}{R_{batt}})$

Cela ne constitue pas une limitation, car ces niveaux de puissance ne correspondent pas à des évaluations spécifiques pratiques. La politique optimale (4-58) dépend de λ . Pour convertir cette politique en une relation explicite avec seulement des variables mesurables, la relation entre λ et la puissance demandée P_{dem} est dérivée en incluant la solution $P_{FC}^*(\lambda)$ dans la contrainte (4-50).

$$\int_{t=0}^{tf} \frac{V_{batt,0}^2}{2R_{batt}} \left(1 - \sqrt{1 - 4 \frac{R_{batt}}{V_{batt,0}^2} [-(\eta_{conv} - \gamma_n)P_{FC}^* + P_{dem} + P_{aux,0}]} \right) dt = 0 \quad (4-59)$$

En utilisant l'approximation $\sqrt{1-x} \approx 1 - \frac{1}{2}x$, cette expression se réduit à

$$\int_{t=0}^{tf} [-(\eta_{conv} - \gamma_n) P_{FC}^* + P_{dem} + P_{aux,0}] dt = 0 \quad (4-60)$$

Cette relation exprime que sur un cycle de conduite, en moyenne, la pile à combustible fournit la puissance totale requise. En intégrant la relation (4-58) dans (4-60) on obtient :

$$\int_{t=0}^{tf} \left\{ -\frac{[\lambda(\eta_{conv} - \gamma_n) \frac{2FV_{FC,0}}{N_{FC}M_{H_2}}]^2 - 1 + 4 \frac{R_{batt}}{V_{batt,0}^2} (P_{dem} + P_{aux,0})}{4[\lambda(\eta_{conv} - \gamma_n) \frac{2FV_{FC,0}}{N_{FC}M_{H_2}}]^2 \frac{R_{FCn}}{V_{FCn,0}^2} + 4 \frac{R_{batt}}{V_{batt,0}^2} (\eta_{conv} - \gamma_n)} + \frac{1}{(\eta_{conv} - \gamma_n)} (P_{dem} + P_{aux,0}) \right\} dt = 0 \quad (4-61)$$

et par la suite,

$$\int_{t=0}^{tf} \left\{ -\left[\lambda(\eta_{conv} - \gamma_n) \frac{2FV_{FC,0}}{N_{FC}M_{H_2}} \right]^2 + 1 + 4 \frac{1}{(\eta_{conv} - \gamma_n)} \left[\lambda(\eta_{conv} - \gamma_n) \frac{2FV_{FC,0}}{N_{FC}M_{H_2}} \right]^2 (P_{dem} + P_{aux,0}) \frac{R_{batt}}{V_{batt,0}^2} \right\} dt = 0 \quad (4-62)$$

Dans (4-62), seul P_{dem} dépend du temps. Cela réduit l'expression à :

$$\left[\lambda(\eta_{conv,n} - \gamma_n) \frac{2FV_{FC,0}}{N_{FC}M_{H_2}} \right]^2 \left[4 \frac{1}{(\eta_{conv} - \gamma_n)} (\overline{P}_{dem} + P_{aux,0}) \frac{R_{FC}}{V_{FC,0}^2} - 1 \right] + 1 = 0 \quad (4-63)$$

Et donc

$$\lambda^2 = \left[\frac{1}{(\eta_{conv} - \gamma_n)} \frac{N_{FC}M_{H_2}}{2FV_{FC,0}} \right]^2 \frac{1}{1 - 4 \frac{1}{(\eta_{conv} - \gamma_n)} (\overline{P}_{dem} + P_{aux,0}) \frac{R_{FC}}{V_{FC,0}^2}} \quad (4-64)$$

De la relation (4-64) on observe que λ ne dépend que de la puissance demandée moyenne sur le cycle de conduite.

En intégrant la valeur trouvée pour λ dans $P_{FCn}^*(\lambda)$ on trouve P_{FCn}^*

$$P_{FC}^* = \frac{\frac{1}{1-4(\eta_{conv}-\gamma_n)(\overline{P}_{dem}+P_{aux,0})}-1+\frac{R_{batt}}{V_{batt,0}^2}(\overline{P}_{dem}+P_{aux,0})}{\frac{1}{1-4(\eta_{conv}-\gamma_n)(\overline{P}_{dem}+P_{aux,0})}\frac{R_{FCn}}{V_{FC,0}^2}+4(\eta_{conv}-\gamma_n)\frac{R_{batt}}{V_{batt,0}^2}} \quad (4-65)$$

Or on a

$$P_{FCn}^* = \frac{1}{(\eta_{conv}-\gamma_n)} (\overline{P}_{dem} + P_{aux,0}) + \frac{\left[1-4\frac{1}{(\eta_{conv}-\gamma_n)}(\overline{P}_{dem}+P_{aux,0})\right]\frac{R_{FC}}{V_{FC,0}^2}}{\frac{R_{FC}}{V_{FC,0}^2}+(\eta_{conv}-\gamma_n)\left[1-4\frac{1}{(\eta_{conv}-\gamma_n)}(\overline{P}_{dem}+P_{aux,0})\right]\frac{R_{FC}}{V_{FC,0}^2}} \frac{\frac{R_{batt}}{V_{batt,0}^2}}{(\overline{P}_{dem} - \overline{P}_{dem})} \quad (4-66)$$

L'expression (4-66) révèle que la variable de contrôle optimale P_{FC}^* est constituée d'une charge de base constante qui compense la demande de puissance moyenne et d'un rapport qui répartit les déviations instantanées de la puissance moyenne sur la pile à combustible et la batterie. Pour obtenir des expressions plus pratiques, ce rapport est appelé Ψ . Avec l'introduction de $\Delta P_{dem} = P_{dem} - \overline{P}_{dem}$ et avec le ratio Ψ , alors (4-66) se réduit à :

$$P_{FC}^* = \frac{1}{(\eta_{conv,n}-\gamma_n)} (\overline{P}_{dem} + P_{aux,0}) + \frac{1}{(\eta_{conv,n}-\gamma_n)} \Psi \Delta P_{dem} \quad (4-67)$$

Avec

$$\Psi = \frac{(\eta_{conv} - \gamma_n) \left[1 - 4 \frac{1}{(\eta_{conv} - \gamma_n)} (\overline{P_{dem}} + P_{aux,0}) \frac{R_{FC}}{V_{FC,0}^2} \right] \frac{R_{batt}}{V_{batt,0}^2}}{\frac{R_{FC}}{V_{FC,0}^2} + (\eta_{conv} - \gamma_n) \left[1 - 4 \frac{1}{(\eta_{conv} - \gamma_n)} (\overline{P_{dem}} + P_{aux,0}) \frac{R_{FC}}{V_{FC,0}^2} \right] \frac{R_{batt}}{V_{batt,0}^2}} \quad (4-68)$$

Le rapport Ψ est principalement défini par le rapport des pertes internes dans la pile à combustible et dans la batterie, et dépend légèrement de la demande moyenne de puissance P_{dem} .

La combinaison (4-49) avec (4-67) fournit la puissance d'accompagnement P_{batt} aux bornes de la batterie comme étant :

$$P_{batt} = (1 - \Psi) \Delta P_{dem} \quad (4-69)$$

En résumé, (4-67) fournit la variable de commande optimale P_{FC}^* qui minimise la consommation en hydrogène, tout en fournissant la puissance requise pour la traction et maintenant l'énergie moyenne stockée dans la batterie au cours du cycle de conduite.

4.3.5.4 Implémentation

La relation (4-67) révèle que le fonctionnement optimal de la PàC consiste en une partie constante et des écarts par rapport à son point de fonctionnement. Cette idée est représentée par l'équation (4-70) ci-dessous :

$$P_{FC}^* = P_{FC,0} + \Delta P_{FC} \quad (4-70)$$

Le point de fonctionnement $P_{FC,0}$ se rapporte à la valeur future moyenne de la puissance demandée sur le cycle de conduite (4.26), et conduit ainsi à un problème de causalité. Par conséquent, on suppose que la demande d'énergie moyenne par le passé se rapproche de la

demande d'énergie moyenne future. Cette hypothèse permet une implémentation en temps réel ; Plusieurs méthodes peuvent être utilisée sur la demande de puissance afin de fournir l'estimation de la demande d'énergie moyenne future. On peut y utiliser un filtre passe bas ou un « *moving average* » ou de façon plus simple implémenter un algorithme temps réel pour le calcul moyen avec évolution du temps.

L'implémentation résultante est esquissée dans la figure ci-dessous

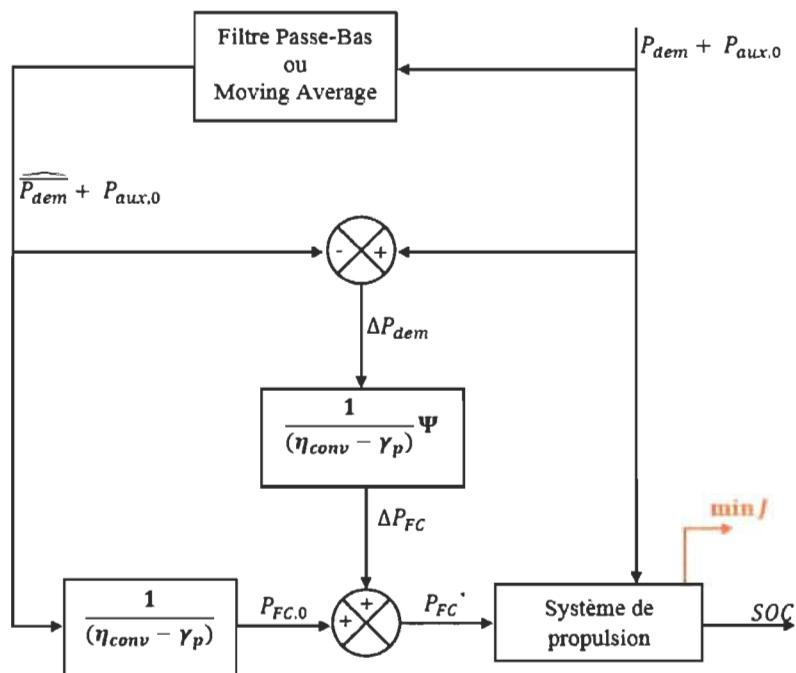


Figure 4-25: Schéma d'implémentation de la stratégie de gestion de l'énergie par la méthode de multiplicateur de LaGrange

Dans la même optique, une autre approche peut être évoquée : celle concernant le contrôle de l'état de charge de la batterie autour d'un point de référence qui donnera la puissance moyenne de la pile en l'absence de pertes internes. Cette stratégie permet d'augmenter la robustesse du système.

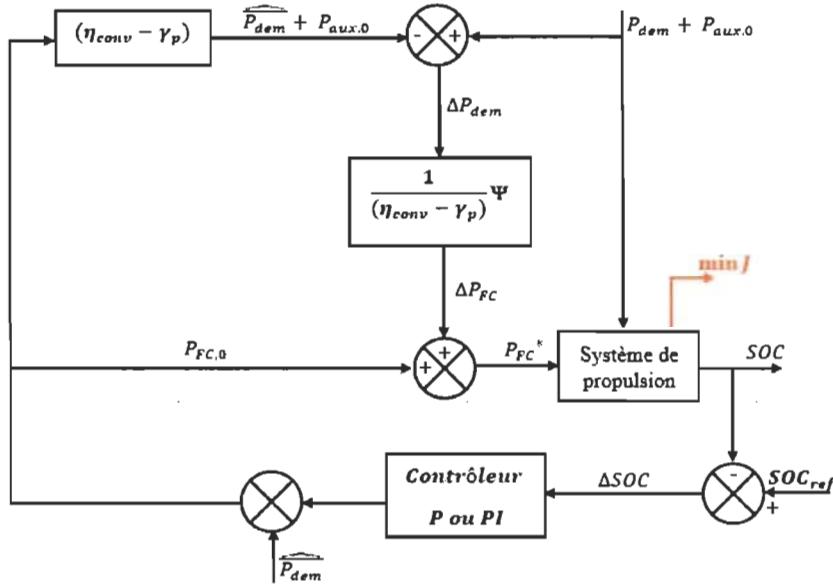


Figure 4-26: Schéma d'implémentation de la stratégie de gestion de l'énergie par la méthode de multiplicateur de LaGrange avec contrôle de l'état de charge

En développant l'équation de l'état de charge, et par approximation, l'on remarque que la dérivée de l'état de charge est une constante. De ce fait nous utiliserons un contrôleur proportionnel.

En effectuant l'implémentation des deux méthodologies sous environnement Matlab/Simulink, on obtient les profils de puissance de la pile et de la batterie, l'état de charge de la batterie et ainsi que la consommation en hydrogène des piles. Les Figure 4-27 et Figure 4-28 ci-dessous représentent les données obtenues lors des simulations sur un cycle de conduite donné.

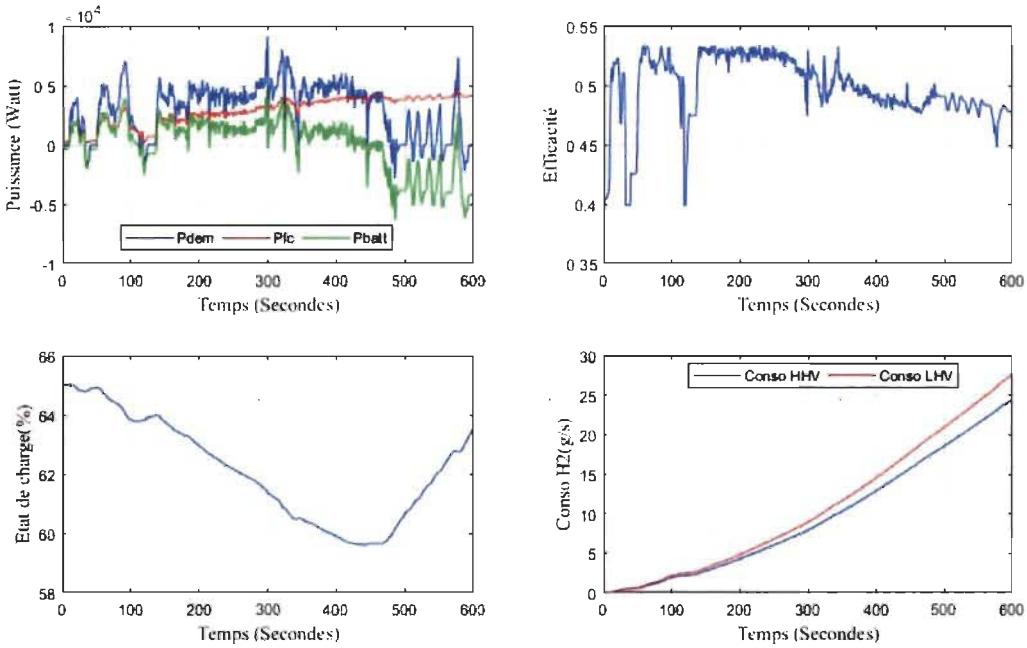


Figure 4-27: Courbe de puissances, de rendement, état de charge de batterie et consommation en hydrogène pour une stratégie de gestion de l'énergie basée sur la commande optimale :la méthode avec multiplicateur de LaGrange

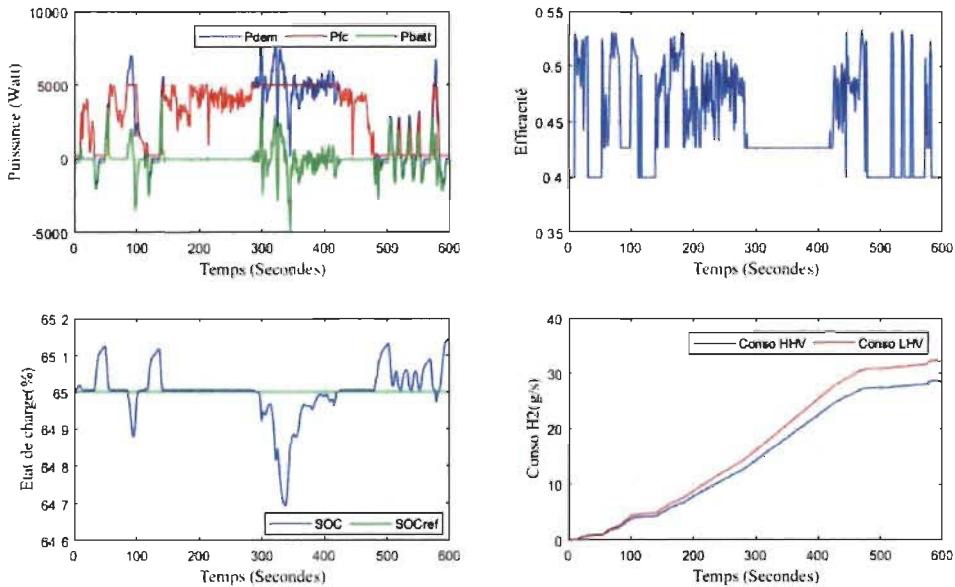


Figure 4-28: Courbe de puissances, de rendement, état de charge de batterie et consommation en hydrogène pour une stratégie de gestion de l'énergie basée sur la commande optimale :la méthode avec multiplicateur de LaGrange et contrôle du SOC de la batterie

Dans la Figure 4-27, la PàC et la batterie assurent la demande en puissance durant la majeure phase de la demande en énergie et durant la fin du cycle, la PàC assure la demande en puissance tout en rechargeant la batterie. Cette stratégie demande une grande sollicitation de la PàC mais la protège des grandes variations au sein de la charge contrairement à la stratégie en Figure 4-28 où l'ensemble de satisfaction énergétique est assurée par la PàC et la batterie ne joue qu'un rôle d'assistance lors de fortes demandes en puissance. On maintient certes le niveau du SOC avec cette stratégie mais on observe une forte consommation en hydrogène. On remarque que la stratégie avec contrôle du SOC consomme un peu plus d'hydrogène que la stratégie sans contrôle. Malgré le maintien du SOC autour d'un point de référence, si l'on devrait faire une étude de dégradation, alors la solution optimale sans contrôle sera plus fructueuse car elle joue en double rôle : satisfaire la charge et maintenir le SOC. En plus dans la stratégie sans contrôle, la différence entre le SOC initial et celui final est très minime.

4.3.6 Stratégie de contrôle MEPT & MPPT avec ou sans contrôle du SOC du stockage

Cette stratégie consiste à faire fonctionner la PàC autour de son meilleur point de rendement et également son meilleur point de puissance maximale. Tout cela peut être indépendant ou non du contrôle de l'état de charge de l'élément de stockage. Pour le fonctionnement autour du meilleur point de rendement on utilisera un algorithme de recherche des points de maximum d'efficacité dit MEPT (*maximum efficiency point tracking*) comme présenté à la Figure 4-29 et pour le fonctionnement à puissance maximale on utilisera un algorithme de recherche de point de maximum de puissance dit MPPT(*Maximum power point tracking*) et présenté à la Figure 4-30. Ces deux algorithmes

ne peuvent être utilisés que dans un cadre de travail en mode temps réel et non offline. De plus cela nécessiterait une seconde implémentation d'un algorithme de sélection de mode (entre MPPT et MEPT). De ce fait, nous utiliserons un algorithme dit de contrôle thermostatique et fonction de la demande de puissance et de l'état de charge, la pile sera mise à OFF ou ON mais l'on s'assurera qu'elle développe sa puissance entre sa puissance optimale et maximale pour le mode ON et sa puissance minimale pour le mode OFF.

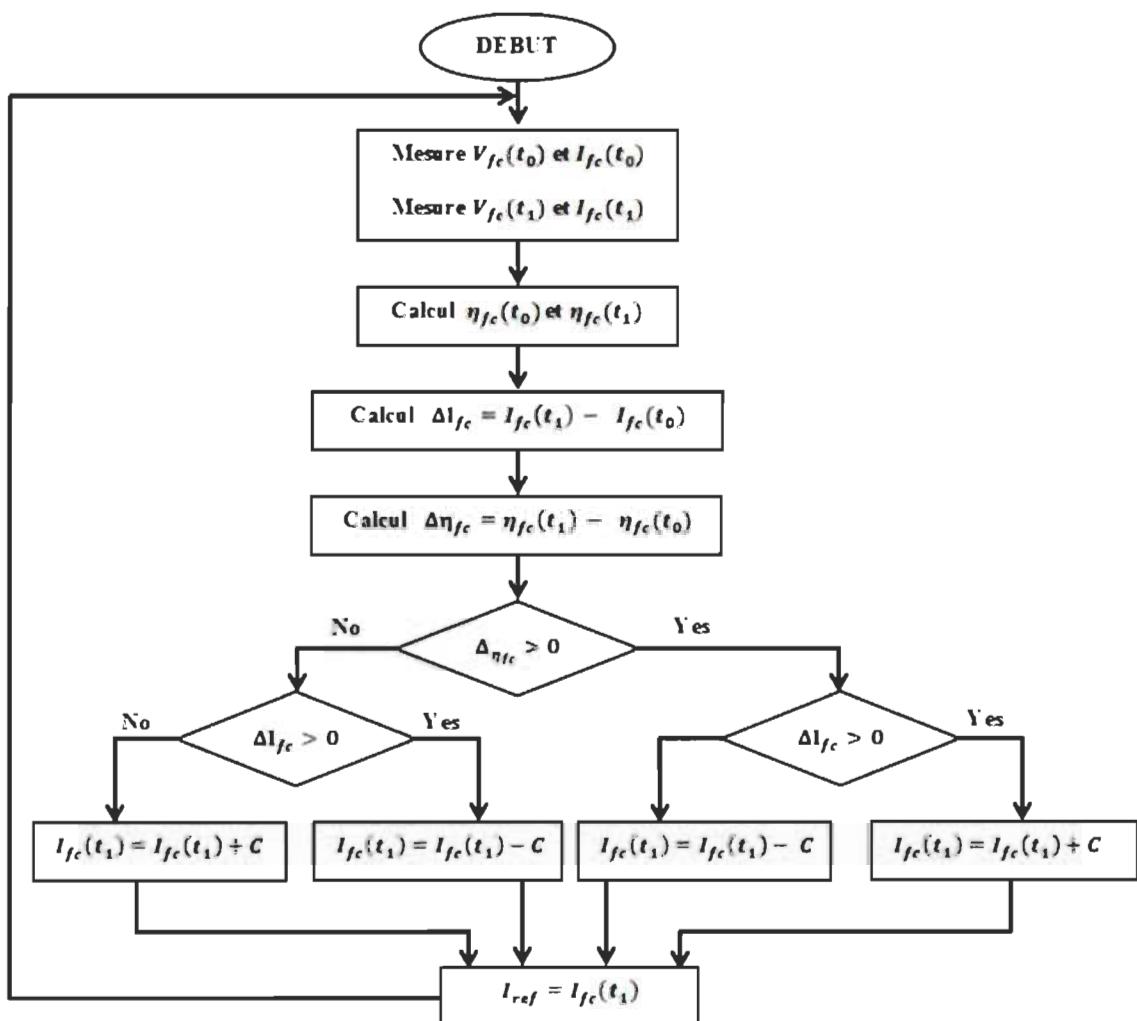


Figure 4-29: Principe de recherche des points de maximum d'efficacité par la méthode P&O

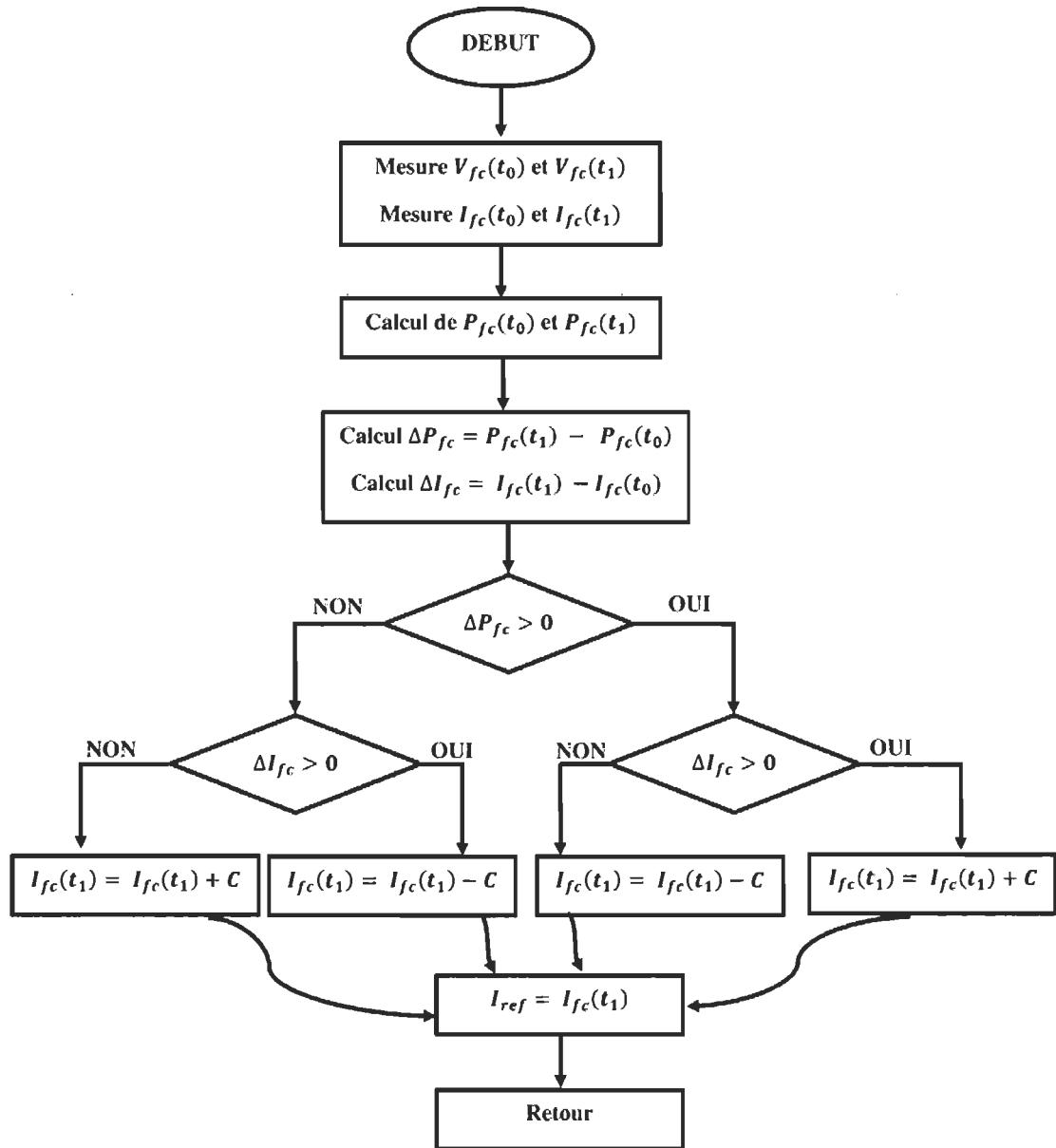


Figure 4-30: Schéma de recherche des points de maximum de puissance par la méthode (P&O)

En combinant ces deux premiers algorithmes comme décrit précédemment on obtient un nouvel organigramme de commande présenté à la Figure 4-31 ci-dessous :

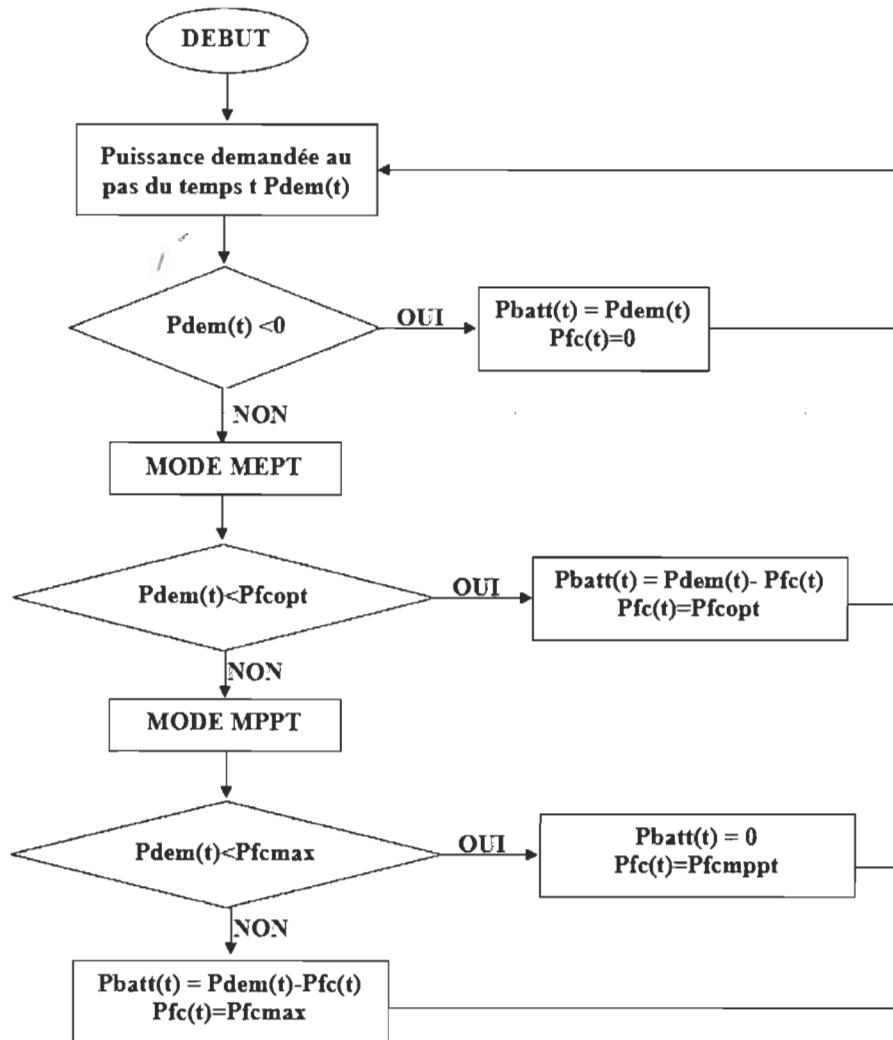


Figure 4-31: Organigramme de fonctionnement MEPT & MPPT

L'implémentation de cet algorithme aura du sens si ce dernier est implémenté en temps réel (en ligne) car en faisant une implémentation hors ligne, cela revient à se retrouver dans une situation d'implémentation déterministe qui n'est autre que la méthode développée à la section 4.3.1 de ce chapitre. Alors elle pourra faire objet d'une étude future pour de la commande temps réel.

4.4 Conclusion

Ce chapitre représente une base de dimensionnement d'un système multi-pile pour une application transport. Tout au long, le dimensionnement des différents éléments que composent le système a été abordé et développé. Dans la même foulée, plusieurs stratégies de gestion de l'énergie ont été abordées afin de commander chaque élément de puissance. Le développement de ces stratégies représente le cœur de ce travail car sa leur principale mission est de repartir la puissance entre les différentes sources et d'assurer une consommation minimale en hydrogène par le système. D'autres stratégies ont été évoquées à titre indicatif mais pour faire objet d'une implémentation dans de futurs travaux. Ainsi la consommation équivalente d'hydrogène sera l'élément de comparaison pour émettre un choix dans la stratégie. De plus on pourrait y également prendre en considération le SOC de la batterie. Les résultats ci-dessus récapitulent la consommation en hydrogène de chaque stratégie et nous nous rendons compte que la stratégie de gestion par logique floue présente une faible consommation en hydrogène.

Dans le chapitre suivant, nous évoquerons la même problématique présenté dans ce chapitre mais sauf que la différence résidera au niveau du système.

Chapitre 5 - Dimensionnement et stratégie d'un système multi-pile à combustible

5.1 Introduction

Ce chapitre présente les étapes à suivre pour dimensionner et commander un système de multi PàC. Le dimensionnement du système portera sur le dimensionnement des différentes piles, de l'élément de stockage et également du profil de charge. Tout d'abord, il faudra dimensionner le profil de charge qui permettra d'évaluer la puissance des sources primaires et secondaires. Dans le cadre de ce travail, tout comme dans la section précédente, le profil charge utilisé sera un véhicule léger. Ensuite, à partir des stratégies développées dans le chapitre précédent, ces dernières seront adaptées pour commander le système multi-pile. Travaillant dans un domaine électrique, nous nous intéresserons à l'architecture électrique du véhicule et cette dernière est présentée à la Figure 5-1.

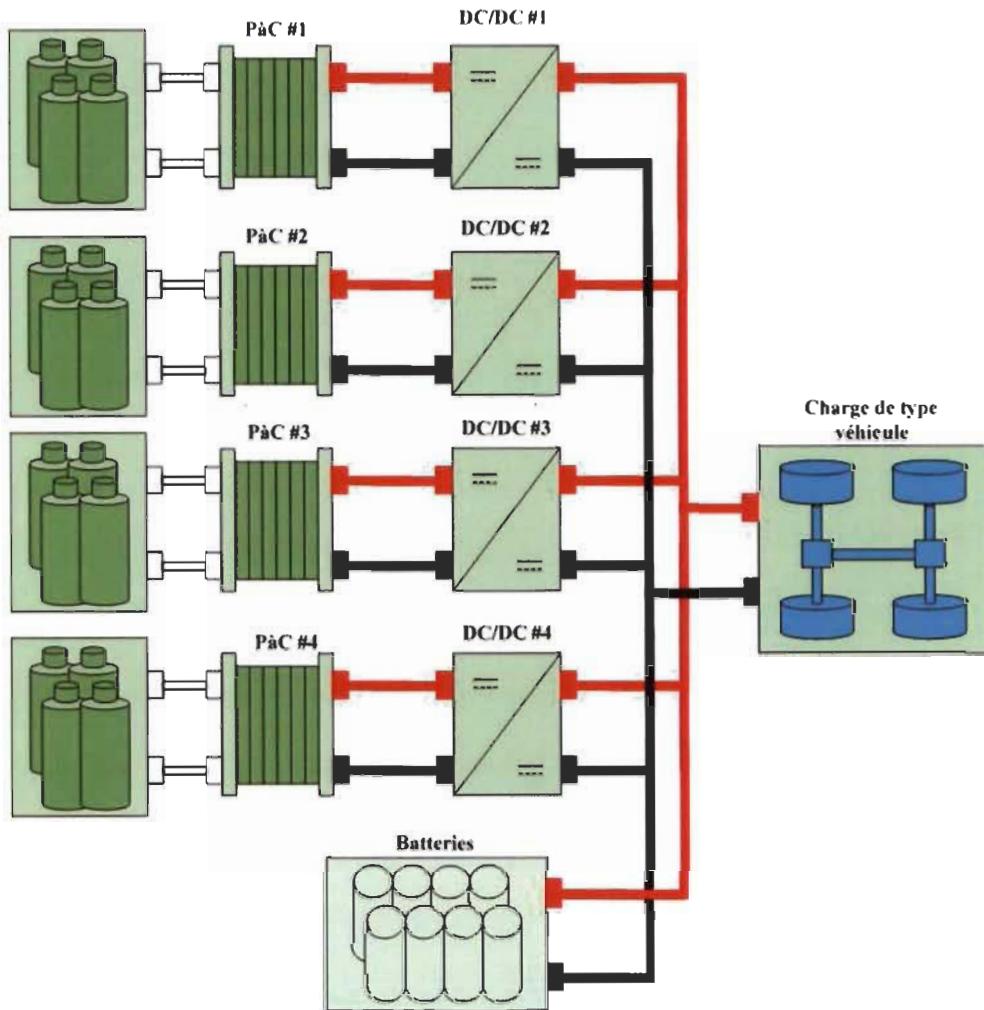


Figure 5-1: système multi-pile

5.2 Dimensionnement du profil de charge

Pour dimensionner le profil de charge, nous prendrons en considération un véhicule léger de type **Saturn SLI 1994** et également plusieurs profils de conduite. Les paramètres du véhicule à modéliser sont présentés dans le Tableau 5-1 ci-dessous et ceux des performances dans le Tableau 5-2. Ces paramètres proviennent de la base de données du logiciel ADVISOR du département d'énergie américain (NREL) (ADVISOR).

Paramètres	Symbol	Valeurs
Masse totale du véhicule	M_V	1380 kg
Accélération de la pesanteur	g	9.81 m/s ²
Coefficient de résistance au roulement	f_r	0.009
Coefficient de pénétration dans l'air	C_D	0.335
Masse volumique de l'air	ρ_a	1.2 kg/m ³
Surface frontale du véhicule	A_f	2.0 m ²
Rayon de la roue	r_d	0.282 m
Hauteur du CG au-dessus du sol	h	0.5 m
Distance du CG à l'axe des roues avant	a	1.3 m
Distance du CG à l'axe des roues arrière	b	1.3 m
Rendement du système de transmission	η_t	0.935
Rendement du moteur	η_m	0.9
Facteur de la masse	δ	1.035
Puissance moyenne des auxiliaires	P_{aux}	700 W

Tableau 5-1: Paramètres véhicule Saturn SL1 1994

Paramètres	Symbole	Valeur
Vitesse maximale du véhicule	v_{max}	160 km/h (95mph) (@ $N_{max_power}=12500$ rpm)
Temps d'accélération de 0 à 100 km/h	t_a	10 s
Pente maximale	i_{max}	5% à 100 km/h

Tableau 5-2: Paramètres de performance du véhicule

En utilisant un profil de conduite et également les équations des forces appliquées sur un véhicule développé dans la section précédente, nous obtenons différents profils de puissances développés par le véhicule et présentés à la Figure 5-2.

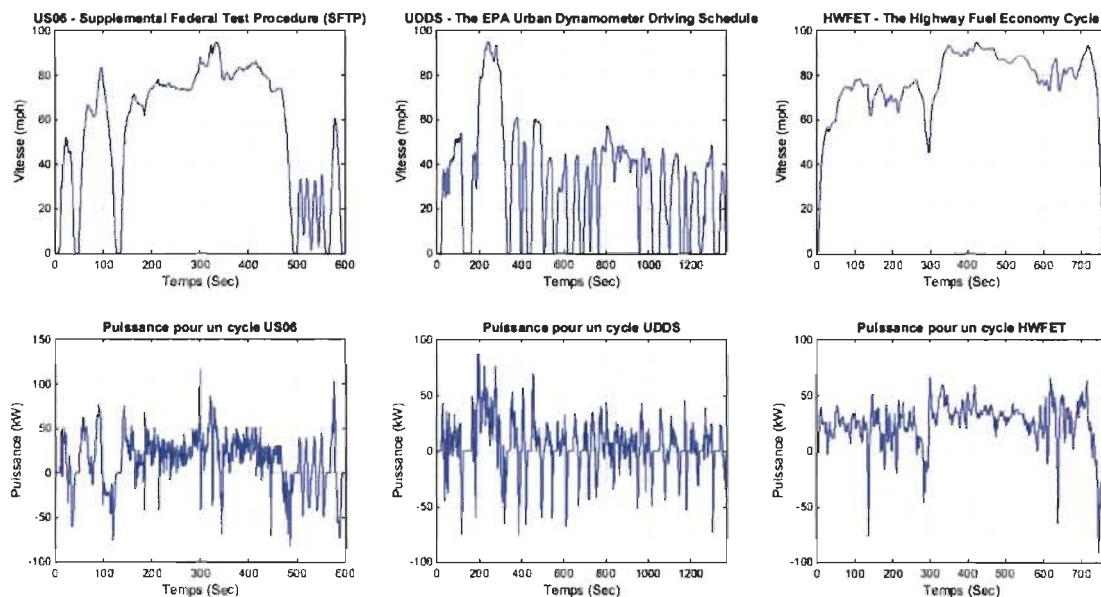


Figure 5-2: Profil de puissance pour un cycle US06, UDDS et HWFET

À partir des données de puissances obtenues, il est possible de déterminer l'énergie cumulative de traction et celle récupérée par le véhicule durant un cycle de conduite donné.

Dans la même optique, avoir la puissance crête de traction pour chacun des cycles de conduite. Ces données présentées en Figure 5-3, seront vitales dans le dimensionnement de l'élément de stockage.

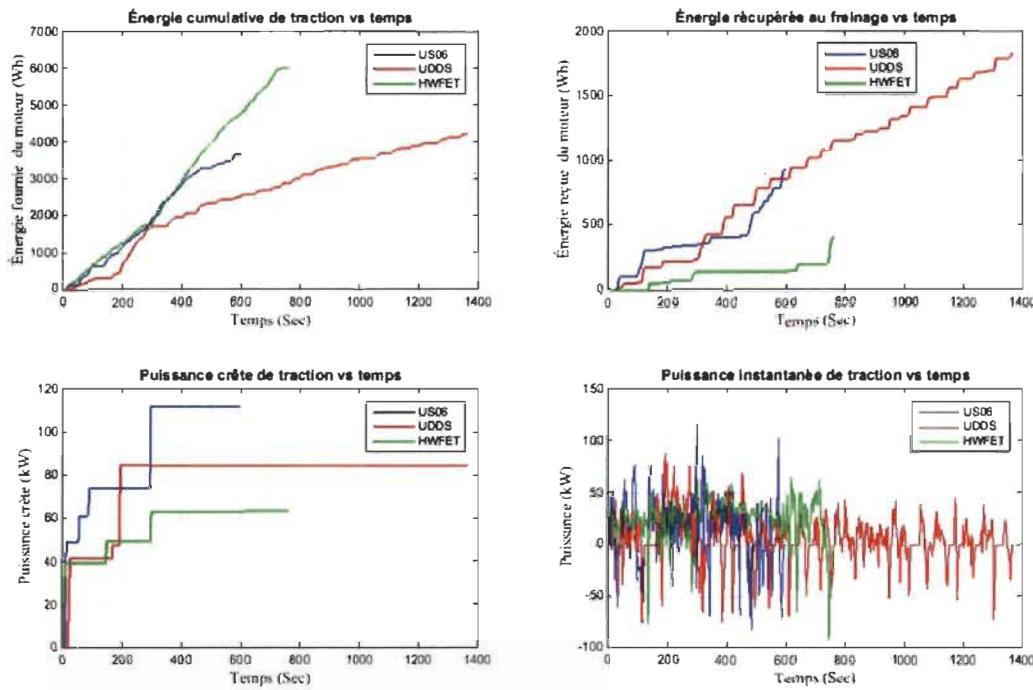


Figure 5-3: Graphiques de puissance et d'énergie pour les profils de conduite US06, urbaine (UDDS) et d'auto route (HWFET)

5.3 Dimensionnement de la puissance aux piles et de l'élément de stockage

En utilisant la méthode précédemment évoquée pour dimensionner le système à une pile, la puissance de l'ensemble des piles sera donnée par la puissance électrique que peut fournir le véhicule à vitesse constante sur une route plate ou en pente sans le soutien de l'élément de stockage. À vitesse constante (95 MPH), la puissance de traction du moteur est donnée par l'équation suivante :

$$P_m = \frac{(M_V.g.fr + 0.5 * \rho_a.A_f.C_D.V^2).V}{\eta_t} \quad (5-1)$$

En appliquant les paramètres du véhicule au Tableau 5-1 dans l'équation (5-1), pour une vitesse de 160 km/h et pour une pente nulle, le véhicule délivre une puissance électrique de 44.31kW.

Selon l'hypothèse 1, le générateur PAC sera d'une puissance de 44.31 kW, donc nous choisirons la puissance du générateur égale à 50 kW.

Pour déterminer la puissance de la batterie, on utilisera l'hypothèse 2 précédemment adoptée. Comme on peut le voir à la Figure 5-3, la valeur maximale de puissance se trouve dans le cycle de conduite US06 (puissance de crête de 112.138 kW). En utilisant à nouveau l'équation (4-8) et avec la puissance des PàC choisies précédemment (50 kW), la puissance de la batterie est obtenue comme suit:

$$P_{batt} = \frac{112.138}{0.9} - 50 \text{ kW} = 74.59 \text{ kW} \quad (5-2)$$

Nous choisirons la puissance de la batterie à 75 kW

En observant la Figure 5-3, nous remarquons que le cycle UDDS génère la plus grande récupération d'énergie lors des freinages (1.5 kWh). De cette valeur il sera possible de dimensionner la capacité de la batterie. Comme défini précédemment, la batterie est directement connectée au bus DC et donc la tension est de 288 Vdc. De plus on prendra en considération un SOC maximal de la batterie à 80 % et un SOC minimal à 40 %. Alors nous aurons

$$DOD = 80\% - 40\% = 40\% \quad (5-3)$$

Pour que la batterie puisse récupérer toute l'énergie au freinage, son énergie totale sera :

$$E_{tot_bat} = \frac{E_{utile_bat}}{\%DOD} = \frac{1500Wh}{0.4} = 3750Wh \quad (5-4)$$

En prenant en considération une tension maximale par module de batterie égale à 15.675, la capacité minimale de la batterie est :

$$C_{min_bat} = \frac{E_{tot_bat}}{V_{max_bat}} = \frac{3750}{288} = 13 Ah \quad (5-5)$$

Cette capacité calculée est la capacité minimale de la batterie. En utilisant la même technique présentée dans un système uni-pile pour déterminer la capacité de la batterie, celle d'un système multi-pile, calculée est de 100 Ah.

5.4 Choix des générateurs PàC

Dans le cadre de ce travail, nous désirons travailler selon la configuration définie en Figure 5-1 et ce avec 4 piles. Comme mentionné dans la section précédente, le système nécessite une puissance globale de pile équivalente à 50 kW et la répartition de puissance est présentée au Tableau 5-3 ci-dessous.

Constructeur	Modèle	Tension (V)	Courant	Puissance
BALLARD #4	MARK 9 SSL	60 – 110 Vdc	300 A	19.4 kW
HYDROGENICS #3	HyPM HD 12-500	30 – 60 Vdc	320 A	12.5 kW

BALLARD #1	MARK IV	60 – 110 Vdc	120 A	5 kW
PowerCell #2	S2-150C	75 – 150 Vdc	200 A	13.5 kW

Tableau 5-3: Récapitulatif des puissances de la PàC

Certaines piles ont été modélisées à partir des études menées et d'autres ont été obtenues via les données du constructeur. Ici la pile Ballard 5kW est obtenue via un système de simulation et les autres sont représentées en utilisant les données des constructeurs.

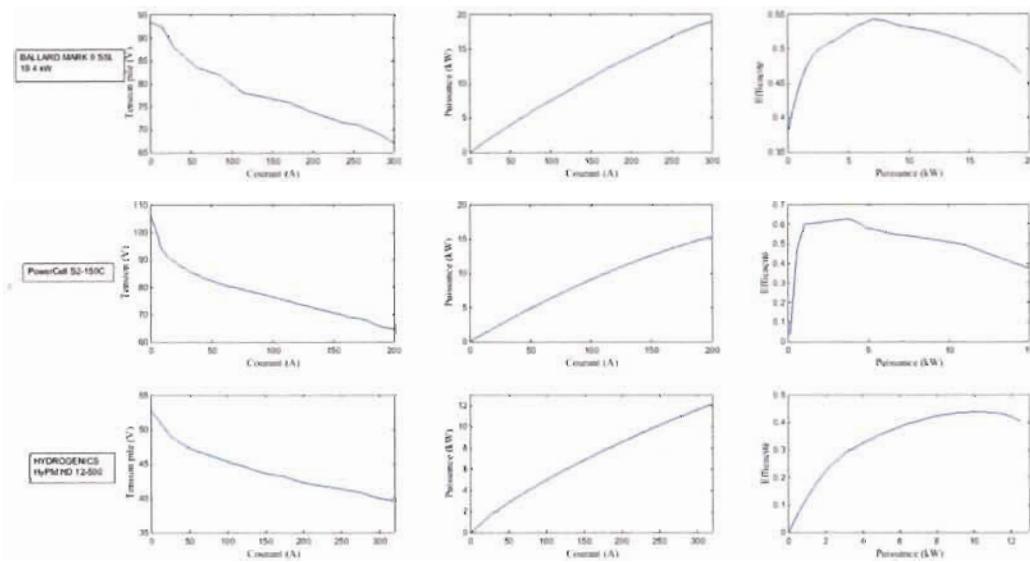


Figure 5-4: Courbes de polarisation en tension, puissance et efficacité de chacune des piles

5.5 Stratégie de commande d'un système multi-piles

Dans cette section, nous aborderons les différentes méthodologies élaborées dans un système uni-pile pour les appliquer à celui d'un système multi-pile. L'objectif étant de

minimiser la consommation en hydrogène des piles et de maintenir l'état de charge de l'élément de stockage, plusieurs stratégies seront utilisées comme présentées ci-dessous :

- Minimisation de la consommation équivalente en hydrogène (ECMS)
- Stratégie de gestion basée sur les règles
- Stratégie de gestion basée sur la commande optimale
- Stratégie de contrôle basée sur la logique floue.

5.5.1 Stratégie de gestion de l'énergie basée sur les règles

Cette stratégie a été abordée dans la section précédente dans le cadre d'un système unique à pile. L'objectif dans cette nouvelle configuration sera de maintenir l'état de charge de l'élément de stockage et également d'assurer une distribution efficace de puissance entre les différentes piles. En utilisant les seuils minimums et maximums de chacun des éléments, le système fonctionnera toujours dans les limites permises. En fonction du SOC de l'élément de stockage et du comportement de la charge (puissance requise par le véhicule), plusieurs phases seront définies comme suit.

La phase 1 traite du fonctionnement du système lors des phases de demande de puissances négatives et également de l'état de charge de l'élément de stockage entre sa valeur de référence et sa valeur maximale. Cette phase consiste à gérer le système de stockage afin que ce dernier ne puisse être en surcharge. Dans cette phase, toutes les piles sont à OFF mais dans une prise en considération de l'effet de la dégradation des piles, ces dernières pourront fonctionner à leur puissance minimale respective.

La phase 2 traite du fonctionnement du système lors des demandes de puissances positives et l'état de charge de l'élément de stockage lorsque ce dernier est supérieur à sa valeur de référence. Cette phase a pour objectif de permettre aux piles d'apporter un support à l'élément de stockage afin de compenser les demandes de puissances supérieures à celles de l'élément de stockage. Ainsi, il est facile de maintenir l'état de charge à son niveau de référence et faire fonctionner les piles à leurs puissances maximales et ceux à chaque tout de rôle ou de façon simultanée. Dans une autre optique, il est également possible d'envisager de faire fonctionner les piles à leurs puissances optimales et/ou maximales (comme effectuée dans la phase 3) pour soutenir l'élément de stockage.

La phase 3 traite du fonctionnement du système lors des demandes positives de puissances et lorsque l'état de charge de l'élément de charge est en dessous de sa valeur de référence. Dans cette configuration, les piles fonctionnent entre leurs puissances optimales et maximales, ce qui permet également de recharger l'élément de stockage dans certaines situations. Également, une option de fonctionnement à puissances minimales pourrait être envisagée dans les cas de figure où les piles seront en mode OFF.

En utilisant, l'outil Matlab/Simulink, l'algorithme décrivant les trois (3) phases sera implémenté.

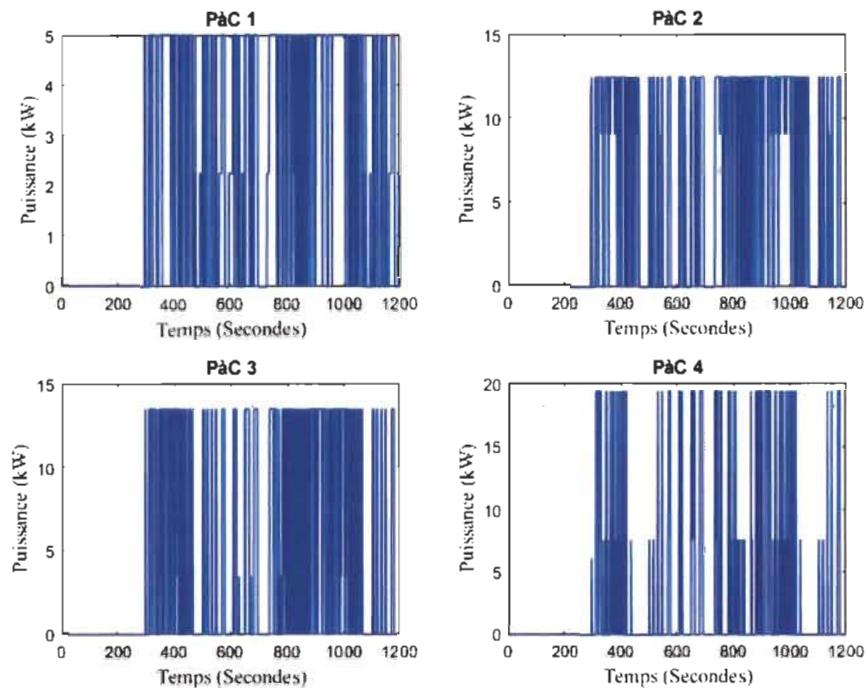


Figure 5-5: Courbe de puissances des piles pour une stratégie de gestion de l'énergie basée sur les règles

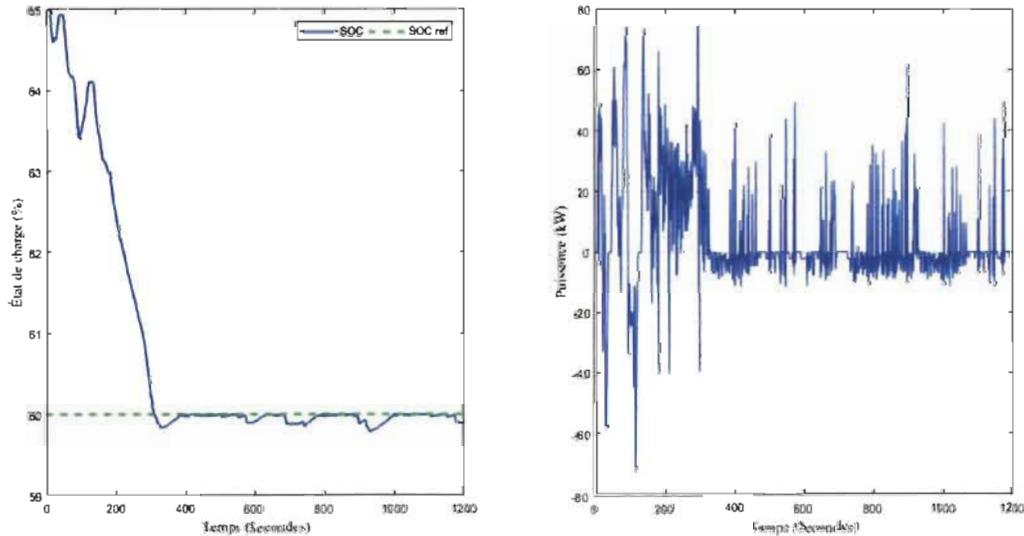


Figure 5-6: Courbe du SOC et de la puissance de la batterie pour une stratégie de gestion de l'énergie basée sur les règles

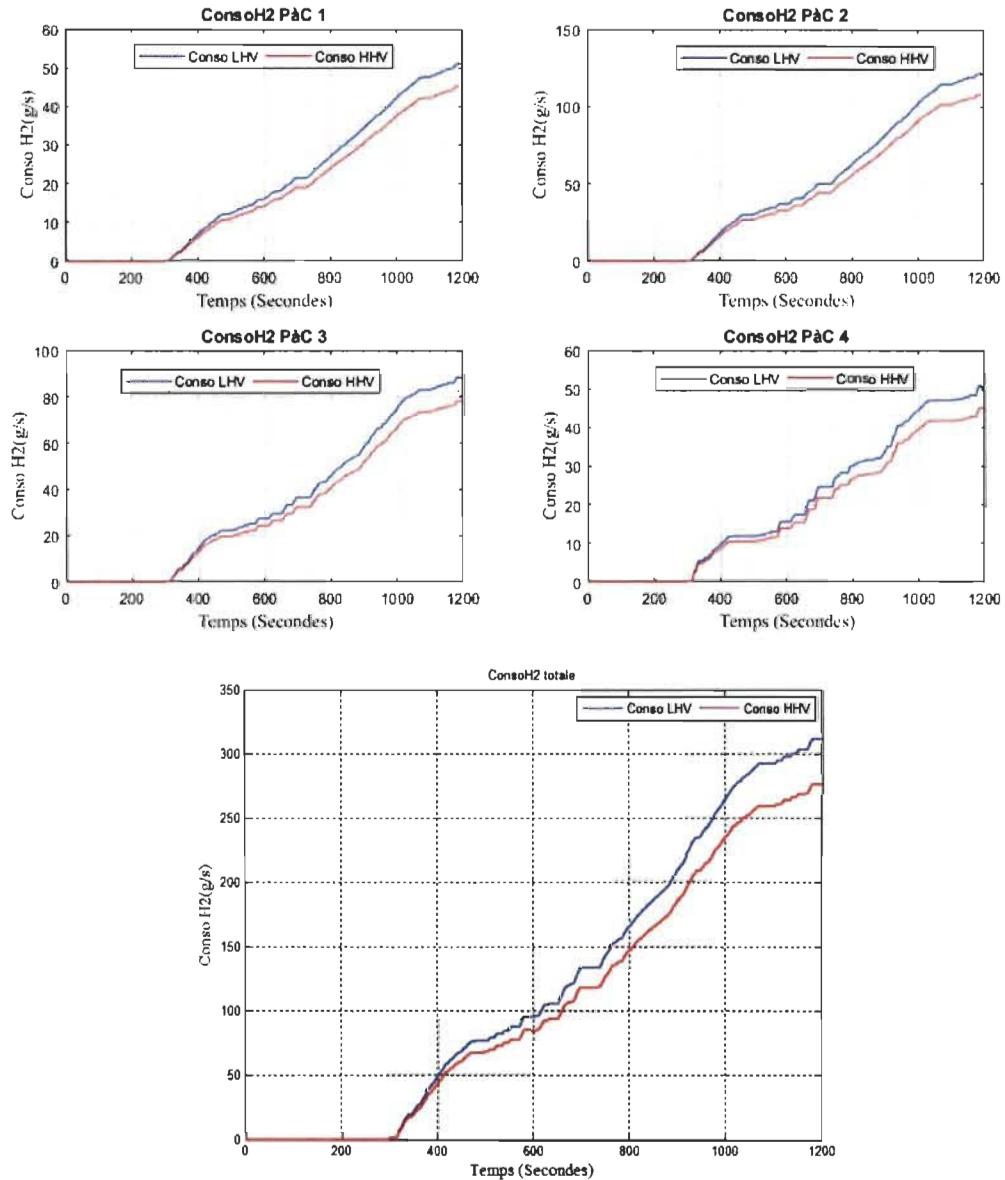


Figure 5-7: Courbe de consommation en hydrogène des piles et consommation totale pour une stratégie de gestion de l'énergie basée sur les règles

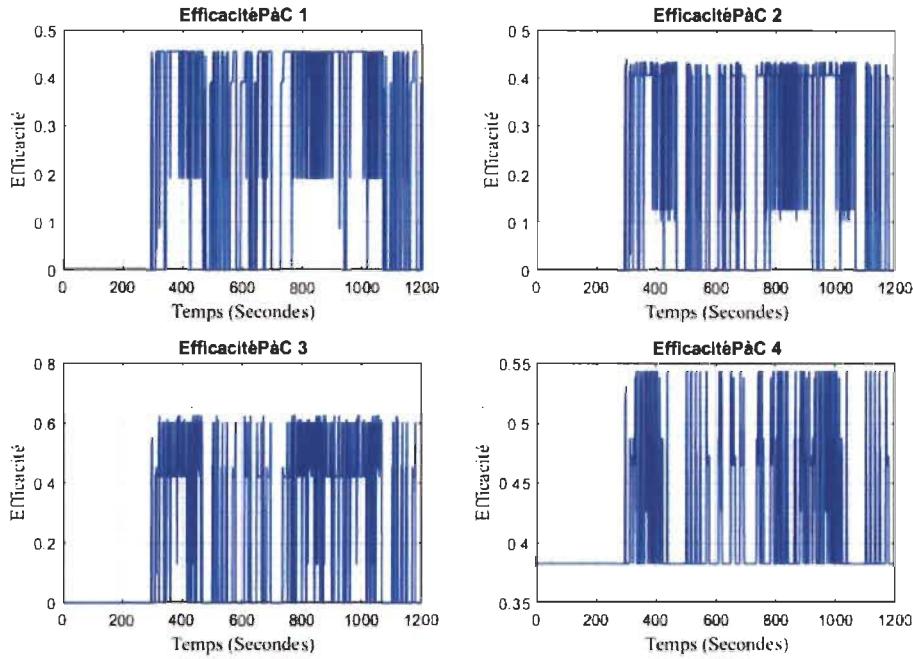


Figure 5-8: Courbe d'efficacité des piles pour une stratégie de gestion de l'énergie basée sur les règles

Pour évaluer, cette stratégie et s'assurer de son bon fonctionnement, la durée du cycle s'est effectué sur deux fois la période d'un cycle. En Figure 5-5, on observe une variation de la puissance de chaque pile entre leur puissance minimale, optimales et maximale respectivement. Comme son nom l'indique, cette stratégie se base les états mais ses états dépendent de la puissance demandée et l'état de charge de la batterie.

Comme on peut le remarquer à la Figure 5-6, la batterie fournie en puissance le système jusqu'à son état de charge de référence où les piles rentrent en considération et se partage la puissance demandée entre ces dernières et la batterie. Les piles 2 et 3 sont très sollicitées dans cette stratégie et cela peut s'observer en Figure 5-7 par leurs consommation en hydrogène.

5.5.2 Stratégie basée sur la commande optimale

Plusieurs algorithmes de commande optimale ont été développés dans la littérature pour la commande des systèmes hybrides à pile à combustible. Les deux méthodes les plus couramment utilisées sont le Principe Minimum de Pontryagin (PMP) et la programmation dynamique. La plupart de ces principes s'attaquent à des systèmes hybrides ayant une source principale d'énergie et une ou deux sources secondaires d'énergie. Dans ce travail, on s'attaquera à plusieurs sources principales d'énergie et une source secondaire en utilisant la méthode PMP. Également, deux hypothèses seront formulées dans le travail : la première est plusieurs sources principales indépendantes et la seconde est une source principale en tant que source principale équivalente (toutes les piles en une seule). Dans la section qui suit, le PMP sera présenté et les deux hypothèses seront évaluées.

5.5.2.1 Principe de minimum de Pontryagin

Le principe de minimum de Pontryagin est un outil très puissant dans la théorie du contrôle optimal. Il fournit un ensemble de conditions nécessaires pour assurer l'optimalité globale d'un problème de contrôle sous contraintes. Sous le PMP, la solution optimale, u^* , si elle est trouvée doit suivre la trajectoire admissible ζ et satisfaire les exigences afin que la fonction J soit minimisée.

$$\dot{\zeta}(t) = f(\zeta(t), u(t), t) \quad (5-6)$$

$$J = h(\zeta(t_f), t_f) + \int_{t_0}^{t_f} L(\zeta(t), u(t), t) dt \quad (5-7)$$

$h(\zeta(t_f), t_f)$ est le coût final du système tandis que $L(\zeta(t), u(t), t)$ est le coût instantané.

Les contraintes de la dynamique du système peuvent être jointes en introduisant un vecteur multiplicateur λ variant dans le temps, appelé vecteur co-état. Cela conduit à la construction du Hamiltonien, H

$$H(\lambda(t), \zeta(t), u(t), t) = \lambda^T(t) \dot{\zeta}(t) + L(\zeta(t), u(t), t) \quad (5-8)$$

Le PMP indique que la trajectoire de contrôle optimale u^* , la trajectoire optimale du vecteur d'état ζ^* et le vecteur multiplicateur de Lagrange λ^* minimisent le Hamiltonien H si et seulement si la relation en (5-9) est respectée

$$H(\lambda^*(t), \zeta^*(t), u^*(t), t) \leq H(\lambda(t), \zeta(t), u(t), t) \quad (5-9)$$

Et sous les contraintes suivantes :

$$\zeta^*(t) = \frac{\partial H}{\partial \lambda}(\lambda^*(t), \zeta^*(t), u^*(t), t) \quad (5-10)$$

$$\lambda^*(t) = \frac{\partial H}{\partial \zeta}(\lambda^*(t), \zeta^*(t), u^*(t), t) \quad (5-11)$$

$$\phi(\zeta^*(t_f), t_f) = 0 \quad (5-12)$$

$$\zeta^*(0) = \zeta_0 \quad (5-13)$$

$$\zeta^*(t_f) \in S(t) \quad (5-14)$$

$$u^* \in U(t) \quad (5-15)$$

L'équation (5-12) est la contrainte de l'état final, $U(t)$ est l'ensemble des données d'entrées de contrôle admissibles, $S(t)$ est l'ensemble des états admissibles du système, et ζ_0 est l'état initial connu du système.

Les solutions qui satisfont les conditions du PMP sont dites des solutions extrêmes. Le PMP assure que si une solution optimale globale existe pour le problème de contrôle, alors c'est une solution extrémale.

5.5.2.2 Formulation du problème de contrôle optimal

Le problème de la commande optimale est formulé pour minimiser la consommation équivalente d'hydrogène pour un cycle de conduite donnée. A cela, vient s'ajouter la protection de la batterie contre les surcharges surtout dues à l'accumulation d'énergie provenant des freinages répétitifs. De façon générale, l'objectif est de minimiser la consommation en hydrogène et de maintenir l'élément de stockage dans état normal.

La consommation d'hydrogène équivalente est décomposée en cinq (5) équations. Ces équations dépendent du nombre de piles à prendre en considération dans le système mais l'ensemble suit la même formulation. La première convertit la consommation d'énergie de la batterie en fonction de la quantité équivalente d'hydrogène de toutes les piles et les quatre autres représentent la consommation d'hydrogène par chacune des piles respectives.

La fonction objective J est donnée par l'équation

(5-17). Alors minimiser cette fonction revient à trouver la répartition de la puissance entre les piles à combustibles et la batterie. Les variables de commande sont considérées également à la puissance respective de chacune des piles. Mais sous une autre hypothèse, la variable de commande peut être supposée égale à la somme des puissances des piles du système comme donnée en (5-16). La puissance de la batterie est donnée par l'équation (5-18).

$$P_{fc_tot}(t) = P_{fc1}(t) + P_{fc2}(t) + P_{fc3}(t) + P_{fc4}(t) \quad (5-16)$$

$$\begin{aligned} J = & \int_0^N (m_{fc1}^*(P_{fc1}(t)) + m_{fc2}^*(P_{fc2}(t)) + m_{fc3}^*(P_{fc3}(t)) \\ & + m_{fc4}^*(P_{fc4}(t)) + m_{bat}^*(SOC, P_{batt}(t), t)) \end{aligned} \quad (5-17)$$

$$P_{batt}(t) = P_{dem}(t) - P_{fc_tot}(t) \quad (5-18)$$

Avec m_{fc1}^* , m_{fc2}^* , m_{fc3}^* , m_{fc4}^* sont la consommation instantanées de chacune des piles à combustibles (g/s), m_{bat}^* est la consommation instantanée équivalente en hydrogène au niveau de la batterie (g/s). P_{dem} , P_{fc1} , P_{fc2} , P_{fc3} , P_{fc4} et P_{batt} sont respectivement la puissance demandée par véhicule, les puissances des piles et la puissance de batterie.

La minimisation de la fonction J sera assujettie aux contraintes locales suivantes

$$SOC = -\frac{I_{batt}}{C_{Ah}} \quad (5-19)$$

$$SOC_{min} \leq SOC \leq SOC_{max} \quad (5-20)$$

$$SOC(1) = SOC(t_f) \quad (5-21)$$

$$P_{batt\ min} \leq SOC \leq P_{batt\ max} \quad (5-22)$$

$$P_{fc1\ min} \leq P_{fc1} \leq P_{fc1\ max} \quad (5-23)$$

$$P_{fc2\ min} \leq P_{fc2} \leq P_{fc2\ max} \quad (5-24)$$

$$P_{fc3\ min} \leq P_{fc3} \leq P_{fc3\ max} \quad (5-25)$$

$$P_{fc4\ min} \leq P_{fc4} \leq P_{fc4\ max} \quad (5-26)$$

Le Hamiltonien du problème peut être défini par l'équation (5-27)

$$H = \dot{m}_{fc_tot} (P_{fc_tot}(t)) + \dot{m}_{batt} (SOC, P_{fc_{tot}}(t)) + \lambda(t) S \dot{C}(t) \quad (5-27)$$

Avec

$$\begin{aligned} \dot{m}_{fc_tot} (P_{fc_tot}(t)) &= \dot{m}_{fc1} (P_{fc1}(t)) + \dot{m}_{fc2} (P_{fc2}(t)) + \\ &\quad \dot{m}_{fc3} (P_{fc3}(t)) + \dot{m}_{fc4} (P_{fc4}(t)) \end{aligned} \quad (5-28)$$

$$\dot{m}_{batt} (SOC, P_{fc_{tot}}(t)) = \alpha(t) * (P_{dem}(t) - P_{fc_{tot}}(t)) \quad (5-29)$$

avec $\lambda(t)$ est la fonction de l'état adjoint. Les équations d'état et du vecteur adjoint sont définies par les équations (5-30) et (5-31)

$$S \dot{C}(t) = \frac{\partial H (t, SOC(t), P_{fc_{tot}}(t), \lambda(t))}{\partial \lambda} \quad (5-30)$$

$$\dot{\lambda}(t) = \frac{\partial H (t, SOC(t), P_{fc_{tot}}(t), \lambda(t))}{\partial SOC} \quad (5-31)$$

Selon le PMP, la variable de commande ou les variables de commandes est ou sont obtenues en imposant la condition définie par l'équation (5-32) ou (5-33)

$$\frac{\partial H (t, SOC(t), P_{fc_{tot}}(t), \lambda(t))}{\partial P_{fc_{tot}}} = 0 \quad (5-32)$$

Ou dans le cadre de fonctionnement sous forme de pile unique on aura

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial H(t, SOC(t), P_{fc_{tot}}(t), \lambda(t))}{\partial P_{fc1}} = 0, \frac{\partial H(t, SOC(t), P_{fc_{tot}}(t), \lambda(t))}{\partial P_{fc2}} \\
& \quad = 0 \\
& \frac{\partial H(t, SOC(t), P_{fc_{tot}}(t), \lambda(t))}{\partial P_{fc3}} = 0, \frac{\partial H(t, SOC(t), P_{fc_{tot}}(t), \lambda(t))}{\partial P_{fc4}} \\
& \quad = 0
\end{aligned} \tag{5-33}$$

La résolution des conditions nécessaires d'équations (5-30), (5-31), (5-32) et (5-33) conduit à la solution du problème de PMP. La condition limite doit être satisfaite. Elle est exprimée en (5-21).

5.5.2.3 Application du PMP au problème de contrôle

La résolution du problème de la commande optimale basée sur les équations est appliquée sur le Hamiltonien pour trouver une solution optimale. La consommation en hydrogène sera exprimée en fonction de la puissance de chaque pile et ce, de façon approximatif à un polynôme de second ordre. Comme évoqué, on pourra fonctionner sur les deux hypothèses. La consommation en hydrogène de chaque pile est donnée par les équations (5-34)-(5-38)

$$\dot{m}_{fc1}(P_{fc1}(t)) = a_1 P_{fc1}^2(t) + a_2 P_{fc1}(t) + a_3 \tag{5-34}$$

$$\dot{m}_{fc2}(P_{fc2}(t)) = b_1 P_{fc2}^2(t) + b_2 P_{fc2}(t) + b_3 \tag{5-35}$$

$$\dot{m}_{fc3}(P_{fc3}(t)) = c_1 P_{fc3}^2(t) + c_2 P_{fc3}(t) + c_3 \tag{5-36}$$

$$\dot{m}_{fc4} \left(P_{fc4}(t) \right) = d_1 P_{fc4}^2(t) + d_2 P_{fc4}(t) + d_3 \quad (5-37)$$

$$\dot{m}_{fc_tot} \left(P_{fc_tot}(t) \right) = e_1 P_{fc_tot}^2(t) + e_2 P_{fc_tot}(t) + e_3 \quad (5-38)$$

Les paramètres $a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3, c_1, c_2, c_3, d_1, d_2, d_3, e_1, e_2$ et e_3 sont les constantes des différentes approximations.

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

De là, l'équation (5-27) du Hamiltonien peut s'écrire en fonction des équations (5-34)-(5-38), (5-19) et (5-29) et on obtient une nouvelle équation du Hamiltonien (5-39) ou (5-40)

$$\begin{aligned} H = & a_1 P_{fc1}^2(t) + a_2 P_{fc1}(t) + a_3 + b_1 P_{fc2}^2(t) + b_2 P_{fc2}(t) + b_3 + \\ & c_1 P_{fc3}^2(t) + c_2 P_{fc3}(t) + c_3 + d_1 P_{fc4}^2(t) + d_2 P_{fc4}(t) + d_3 + \left(1 - 2 * \right. \\ & \left. mu * \left(\frac{SOC - 0.5 * (SOC_{max} + SOC_{min})}{SOC_{max} + SOC_{min}} \right) \right) * P_{batt}(t) - \lambda(t) \frac{V_{OC} - \sqrt{V_{OC}^2 - 4 * R_{batt} * P_{batt}}}{2 * R_{batt} * Q_{batt}} \end{aligned} \quad (5-39)$$

Ou

$$\begin{aligned} H = & e_1 P_{fc_tot}^2(t) + e_2 P_{fc_tot}(t) + e_3 + \left(1 - 2 * mu * \right. \\ & \left. \left(\frac{SOC - 0.5 * (SOC_{max} + SOC_{min})}{SOC_{max} + SOC_{min}} \right) \right) * P_{batt}(t) - \lambda(t) \frac{V_{OC} - \sqrt{V_{OC}^2 - 4 * R_{batt} * P_{batt}}}{2 * R_{batt} * Q_{batt}} \end{aligned} \quad (5-40)$$

En combinant les équations (5-29) (5-30) et (5-31), on détermine la nouvelle équation de la fonction d'état adjoint (5-41)

$$\dot{\lambda}(t) = \frac{\partial H(t, SOC(t), P_{fc_{tot}}(t), \lambda(t))}{\partial SOC} = -2 * mu * \left(\frac{P_{batt}(t)}{SOC_{max} + SOC_{min}} \right) \quad (5-41)$$

De cette équation on obtient la puissance optimale globale du système ou celle de chaque pile

$$P^*_{fc_{tot}} = \frac{1}{2e_1} \left[\frac{\lambda(t)}{C_{Ah}V_{batt}} + \left(1 - 2 * mu * \left(\frac{SOC - 0.5 * (SOC_{max} + SOC_{min})}{SOC_{max} + SOC_{min}} \right) \right) - e_2 \right] \quad (5-42)$$

La puissance de chaque pile sera soumise à de nouvelles contraintes comme exprimée en (5-43) et (5-44)

$$P_{fc}^*_{1,2,3,4}(t) = \begin{cases} P_{fc1,2,3,4,min} & \text{si } P_{fc}^*_{1,2,3,4}(t) < P_{fc}^*_{1,2,3,4,min} \\ P_{fc1,2,3,4,max} & \text{si } P_{fc}^*_{1,2,3,4}(t) > P_{fc}^*_{1,2,3,4,max} \\ \text{équation (5-42) sinon} & \end{cases} \quad (5-43)$$

$$P^*_{fc_{tot}}(t) = \begin{cases} P_{fc_{tot},min} & \text{si } P^*_{fc_{tot}} < P_{fc_{tot},min} \\ P_{fc_{tot},max} & \text{si } P^*_{fc_{tot}} > P_{fc_{tot},max} \\ \text{équation (5-42) sinon} & \end{cases} \quad (5-44)$$

En implémentant cet algorithme sous Matlab/Simulink, sur le profil routier et véhicule choisi, la puissance optimale obtenue est présentée en Figure 5-9. Également, cette puissance sera répartie entre les différentes sources et ce comme effectuer précédemment.

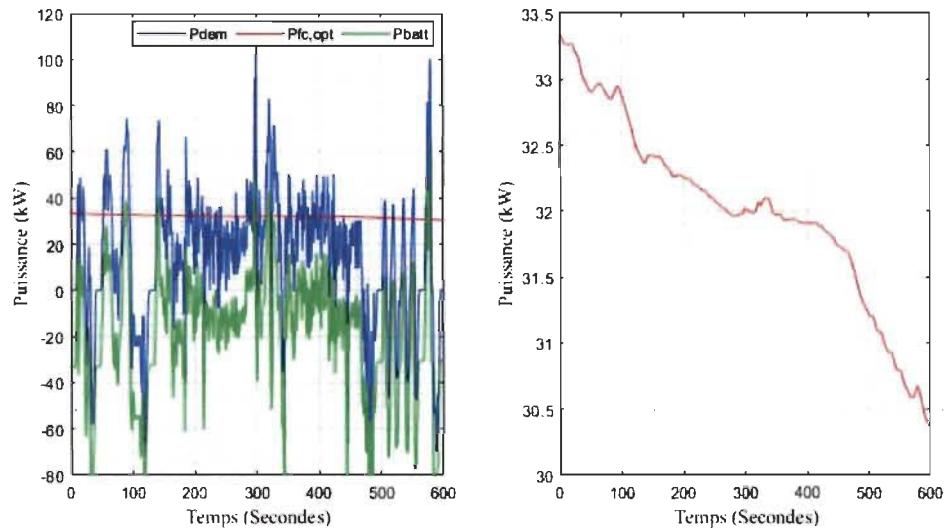


Figure 5-9: Puissance demandée, puissance de la batterie et puissance optimale pour une stratégie de gestion basée sur la commande optimale par la méthode PMP

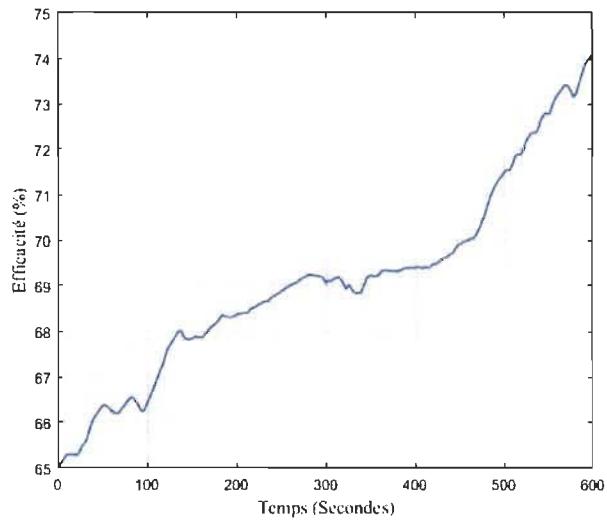


Figure 5-10: État de charge de la batterie obtenue pour une stratégie de gestion basée sur la commande optimale par la méthode PMP

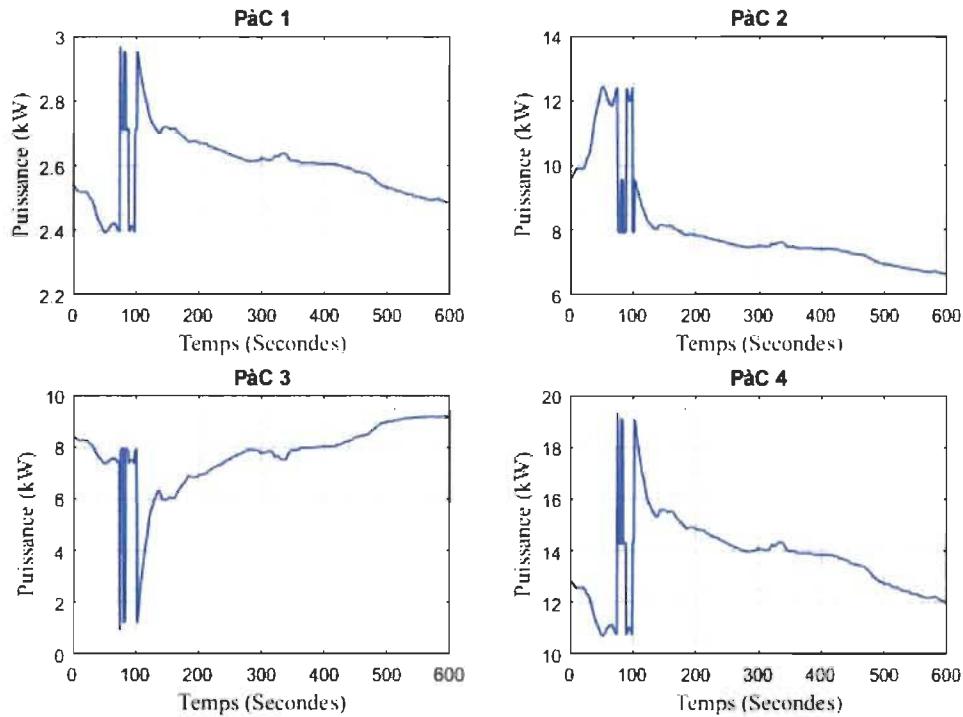


Figure 5-11: Puissances des différentes piles obtenues pour une stratégie de gestion basée sur la commande optimale par la méthode PMP

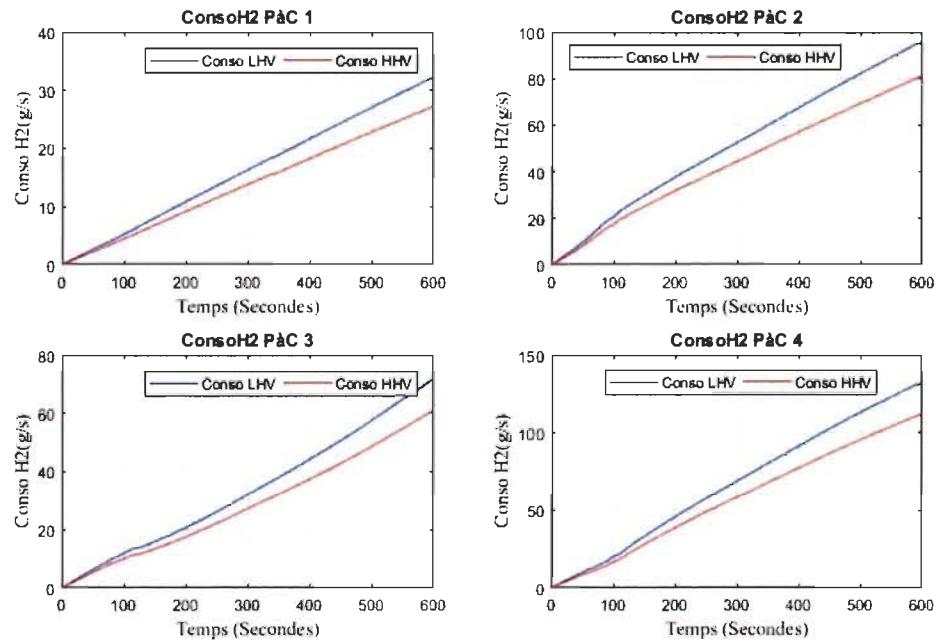


Figure 5-12: Courbes de consommation en hydrogène de chaque pile pour une stratégie de gestion basée sur la commande optimale par la méthode PMP

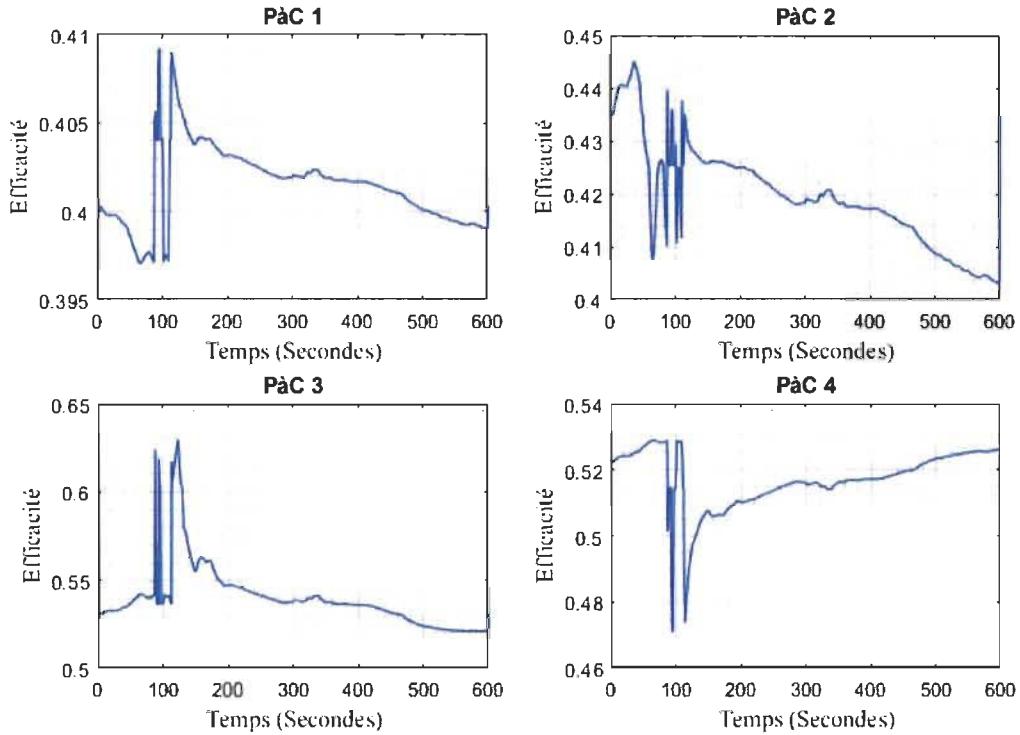


Figure 5-13: Efficacité de chaque piles pour une stratégie de gestion basée sur la commande optimale par la méthode PMP

En observant la courbe de puissance en Figure 5-9 et Figure 5-11, on note que la puissance demandée est partagée entre les piles et la batterie. Dans les deux figures, la puissance des PàC et la puissance de la batterie respectent les contraintes imposées.

En observant l'état de charge de la batterie, on remarque une différence entre l'état de charge initial et final. Dans un fonctionnement optimal, la valeur de l'état de charge initial devrait être égal à celui final (en fin de parcours). Cette influence peut être due au fait que le vecteur co-état n'a pas été bien choisi. Alors l'idée sera de faire valoir l'utilisation d'un nouvel algorithme de recherche en temps réel de ce vecteur et par exemple en utilisant la méthode de shooting.

5.5.3 Stratégie de contrôle par ECMS (Energy Consumption Minimization Strategy)

L'objectif principale de cette stratégie de contrôle, est de minimiser la consommation en hydrogène de chaque pile tout en maintenant l'état de charge de l'élément de stockage dans un niveau normal (entre 60% - 80 %). Dans cette étude les éléments qui composeront la fonction objective seront la puissance de chaque pile et la variation de l'état de charge. Cette fonction objective peut être formulée comme suit :

$$J_1 = P_{fc1} + P_{fc2} + P_{fc3} + P_{fc4} + \alpha P_{batt} \quad (5-45)$$

Et avec pour objectif de trouver la solution qui minimise J_1 .

Cette fonction J_1 décrite plus haut sera assujettie aux contraintes énoncées en (5-20) et (5-22)-(5-26),(5-46) et (5-47).

$$P_{dem} = P_{fc1} + P_{fc2} + P_{fc3} + P_{fc4} + P_{batt} \quad (5-46)$$

$$\text{Avec } \alpha = 1 - 2 * mu * \left(\frac{SOC - 0.5 * (SOC_{max} + SOC_{min})}{SOC_{max} + SOC_{min}} \right) \quad (5-47)$$

En appliquant un algorithme de minimisation, on obtiendra une répartition de puissance entre les différentes sources et ainsi que leur efficacité. De ces données, il sera possible d'évaluer la consommation en hydrogène du système et également de l'état de charge de l'élément de stockage.

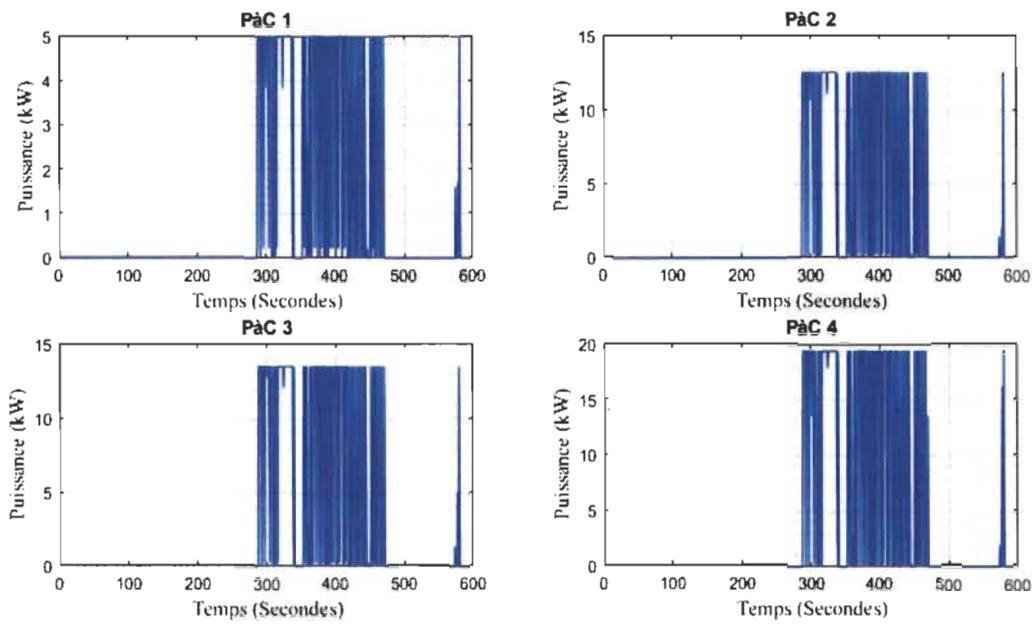


Figure 5-14: Courbes de puissances des piles pour une stratégie de contrôle basée sur ECMS

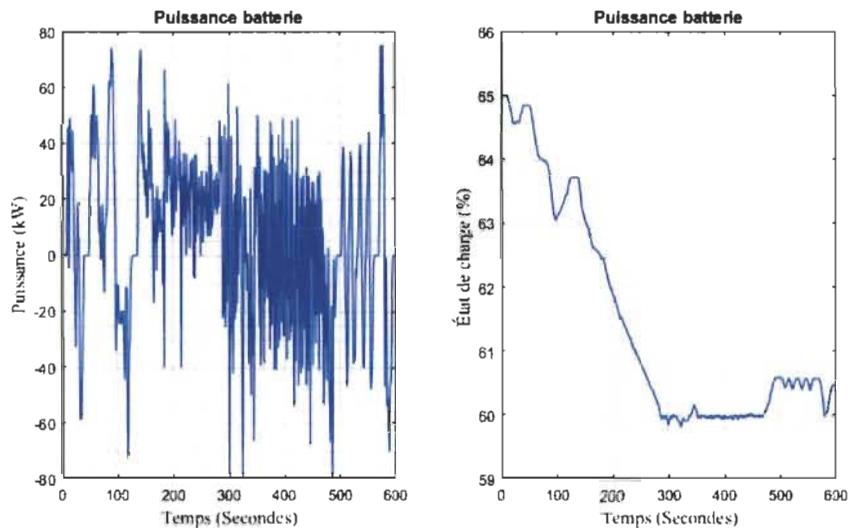


Figure 5-15: Puissance et état de charge de la batterie pour une stratégie de contrôle basée sur ECMS

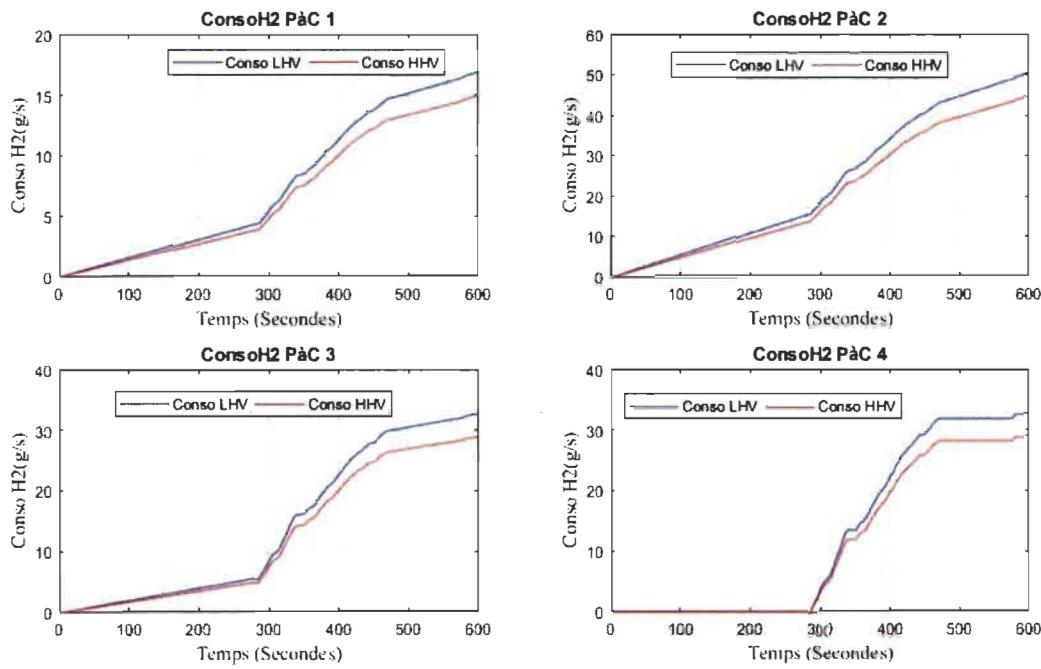


Figure 5-16: Consommation au pas de temps de chaque pile pour une stratégie de contrôle basée sur ECMS

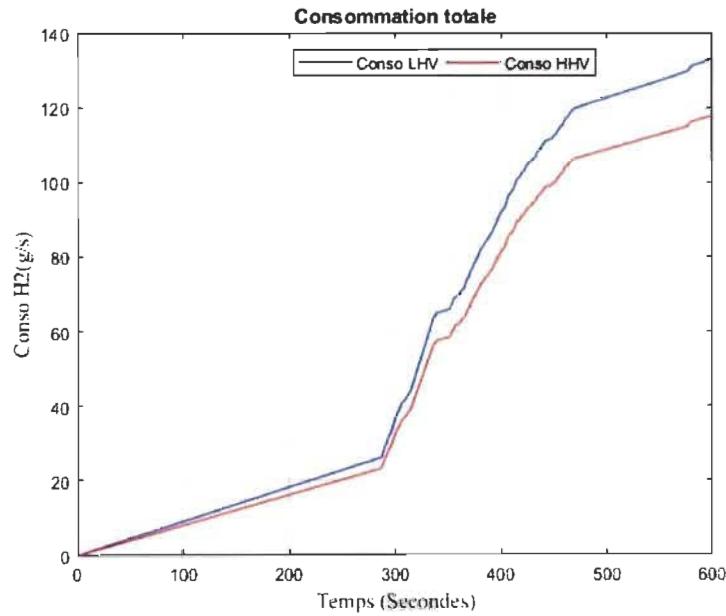


Figure 5-17: Consommation cumulative en hydrogène du système pour une stratégie de contrôle basée sur ECMS

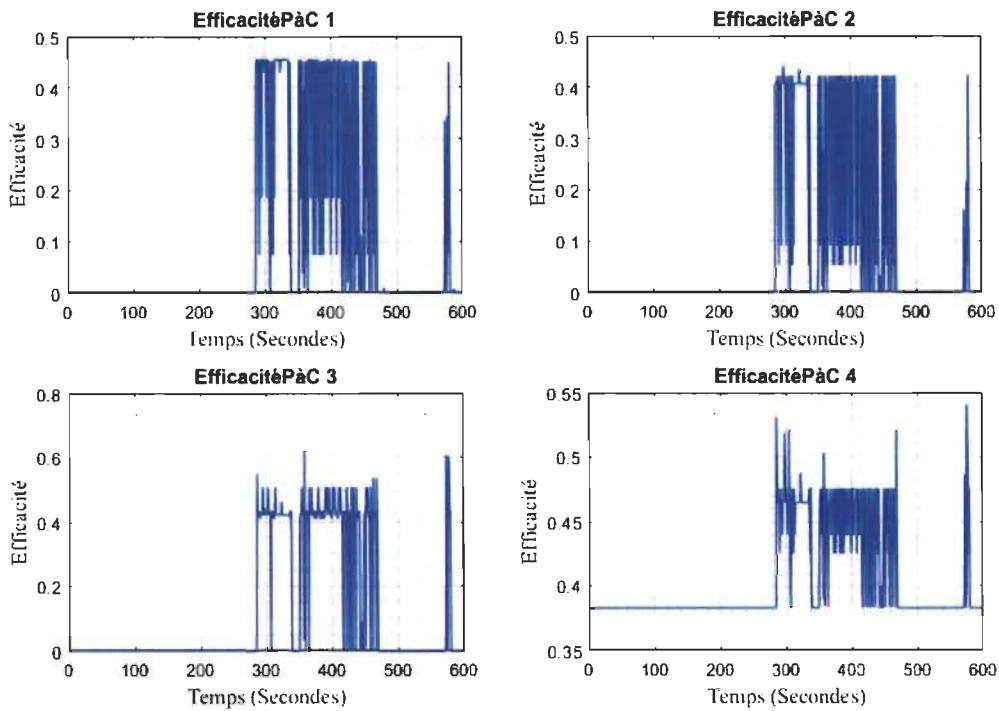


Figure 5-18: Courbe d'efficacité des piles pour une stratégie de contrôle basée sur ECMS

L'observation des courbes de puissances (Figure 5-14), démontre que la stratégie ECMS fait fonctionner les piles durant les phases de légères fluctuations de la puissance demandée par le véhicules. Cette phase début à partir de la 200^{ème} seconde du parcours et prend fin vers la 500^{ème} seconde. Hors cette période, c'est la batterie qui en prend le relais afin de satisfaire la demande. Mais en observant de plus près les courbes de puissance des piles, on remarque que les pile prennent le relais 100 secondes après le début de ladite période et s'arrête environ 100 secondes également de la fin. Ce qui permet de mieux économiser de l'hydrogène, donc moins solliciter les piles.

Avec la courbe de l'état de charge de la batterie en Figure 5-15, on s'en rend compte que le système assure un maintien de la charge autour de son point de référence. Si l'on s'en tient aux périodes de fonctionnement des piles, ces dernières assurent également le maintien du SOC. De façon générale, la batterie est très sollicitée dans cette stratégie et les

piles sont sollicitées pour satisfaire le restant de la charge et rechargée la batterie. Avec un état de charge initial fixé à 65 %, ce dernier se stabilise à environs 60 % dans ladite période et progresse légèrement jusqu'à la fin du parcours.

Également, en observation de la Figure 5-16 qui montre la consommation en hydrogène de chaque pile, elle est très minime par rapport à d'autres stratégies et par le fait de ladite zone de fonctionnement.

5.5.4 Stratégie de gestion basée sur la logique floue et la répartition de puissance

Cette stratégie utilise le même principe que celle développée dans un système à une pile mais la différence réside au niveau des fonctions d'appartenances et de la puissance de sortie. L'idée est de développer une logique qui nous fournit une puissance totale équivalente des piles et ensuite la répartir avec un second algorithme de répartitions de puissances. De ce fait, nous pouvons utiliser un algorithme déterministe basé sur les règles ou un algorithme optimal comme le PSO pour répartir la puissance issue de la logique floue entre les différentes piles.

Le contrôleur logique utilisé aura l'état de charge de la batterie, la puissance demandée par le véhicule en entrée et la puissance totale de piles en sortie. Les caractéristiques du contrôleur sont les suivantes :

- Type de logique floue : Mamdani
- Moteur d'influence : règle AND (opérateur minimum)
- Défuzzification : centroïde

Le système de logique floue est présenté à la Figure 5-19 et de même, la surface de contrôle de la logique est présentée en Figure 5-20. Il est à noter que les valeurs de puissance des

piles ainsi que celle demandée sont des valeurs normalisées. Chaque entrée et sortie possèdent trois fonctions d'appartenance comme présentées en Figure 5-21. Dans cette figure de fonctions d'appartenance, les fonctions d'appartenance trapézoïdales sont utilisées pour les petites et grandes valeurs en entrée et sortie ; tandis que les fonctions d'appartenance triangulaires sont utilisées pour les valeurs moyennes et normales en entrée et sortie. Les règles de ce contrôleur sont données au Tableau 5-4et suivent la logique *if input 1 is ... And input 2 is ... then output is*

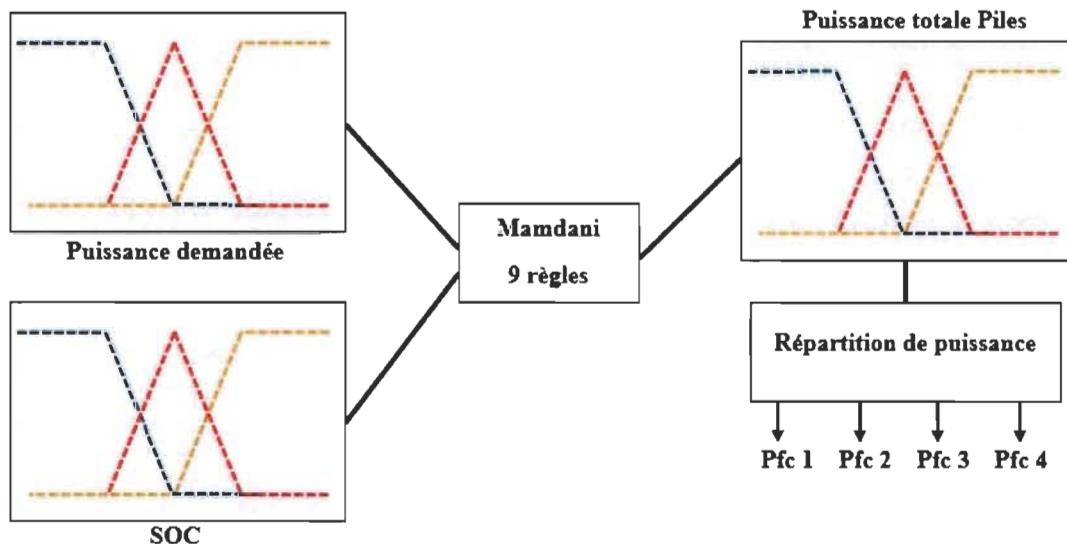


Figure 5-19: Système de logique floue avec répartition de puissance

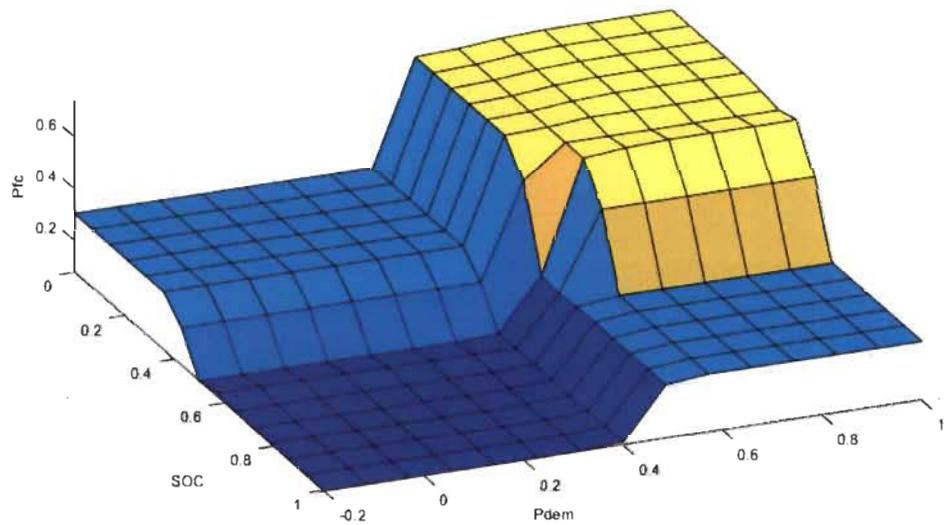


Figure 5-20: Surface de contrôle logique floue

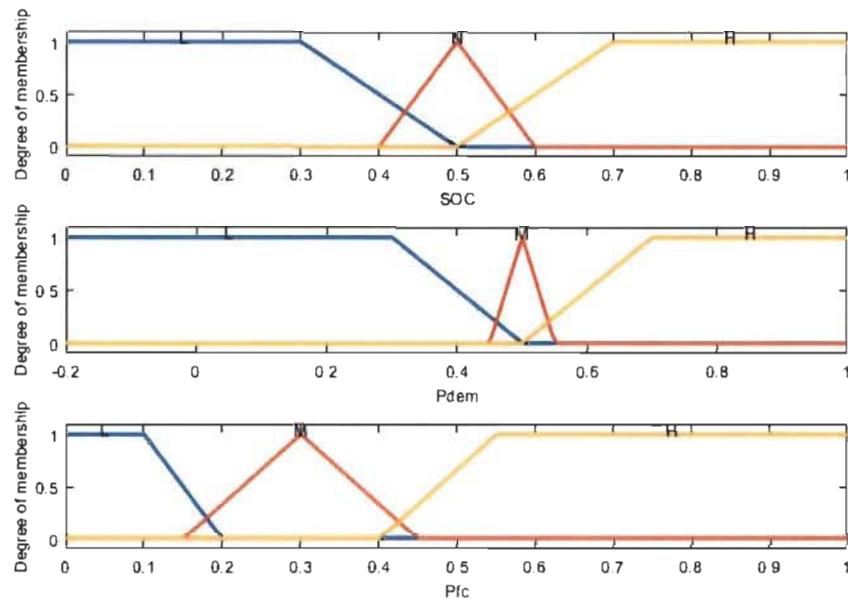


Figure 5-21: Fonctions d'appartenances pour la stratégie basée sur la logique floue

Pdem	SOC	L(faible)	N(Normal)	H(haut)
L(petit)	M(Moyen)	L(faible)	L(faible)	

M(moyen)	H(haut)	M(Moyen)	M(Moyen)
H(haut)	H(haut)	H(haut)	M(Moyen)

Tableau 5-4: Règles pour le contrôleur en logique floue

En ce qui concerne la pile, la puissance faible correspond à la somme des puissances minimales de chaque, la puissance moyenne à la somme des puissances optimales de chaque pile et la puissance haute à la somme des puissances maximales de chaque pile.

Avec ce contrôleur développé, il faudra ensuite mettre en place le système de répartition de puissance qui fonctionnera autour des valeurs minimales et maximales des piles. Également, cette répartition peutse faire de manière optimale en minimisant la fonction présentée à l'équation (5-48) sous les contraintes (5-49) et

(5-50)

$$J = P_{fc,fuzzy} - k_1 P_{fc1,max} - k_2 P_{fc2,max} - k_3 P_{fc3,max} - k_4 P_{fc4,max} \quad (5-48)$$

$$k_1 + k_2 + k_3 + k_4 = 1 \quad (5-49)$$

$$0 \leq k_1 \leq \frac{P_{fc1,max}}{P_{fc,max-tot}}, 0 \leq k_2 \leq \frac{P_{fc2,max}}{P_{fc,max-tot}}$$

$$0 \leq k_3 \leq \frac{P_{fc3,max}}{P_{fc,max-tot}}, 0 \leq k_4 \leq \frac{P_{fc4,max}}{P_{fc,max-tot}} \quad (5-50)$$

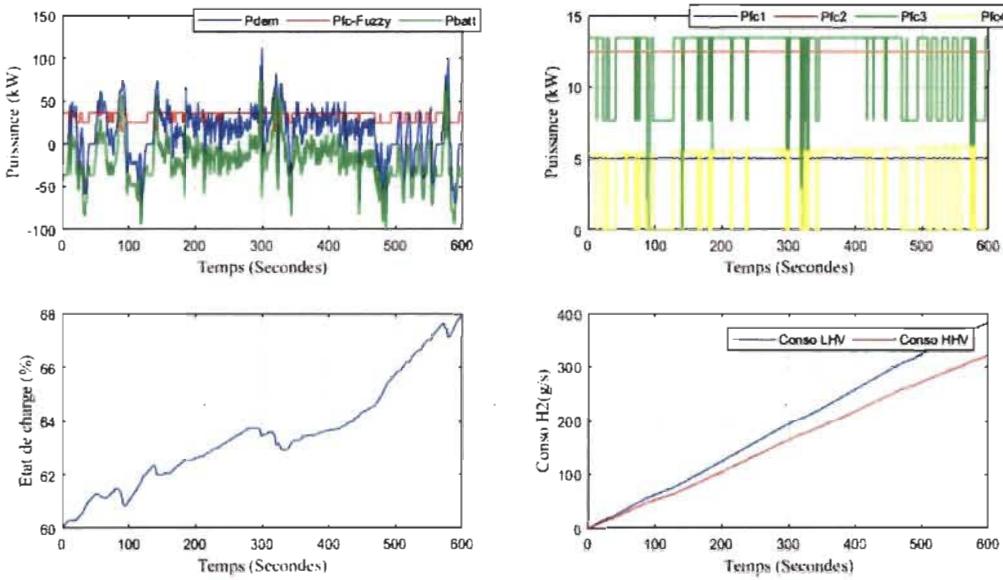


Figure 5-22: Courbes de puissance, état de charge et consommation d'hydrogène pour une stratégie basée sur la logique floue

En utilisant la méthode de répartition de puissance par le PSO on obtient les nouvelles valeurs de puissances à allouer à chaque pile, comme présentées ci-après (Figure 5-23)

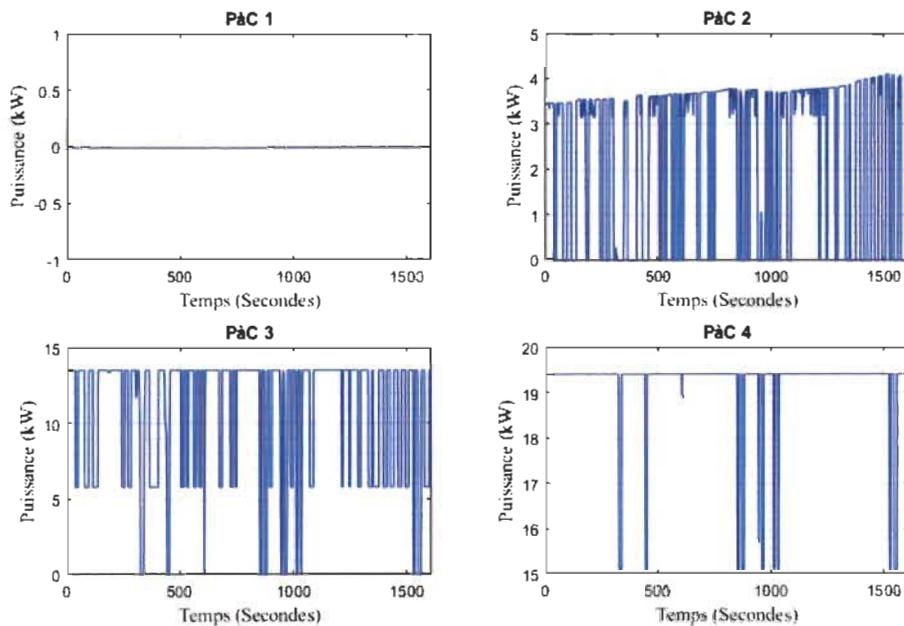


Figure 5-23: Répartition de la puissance obtenue via la stratégie de logique à l'aide d'un algorithme d'optimisation (PSO)

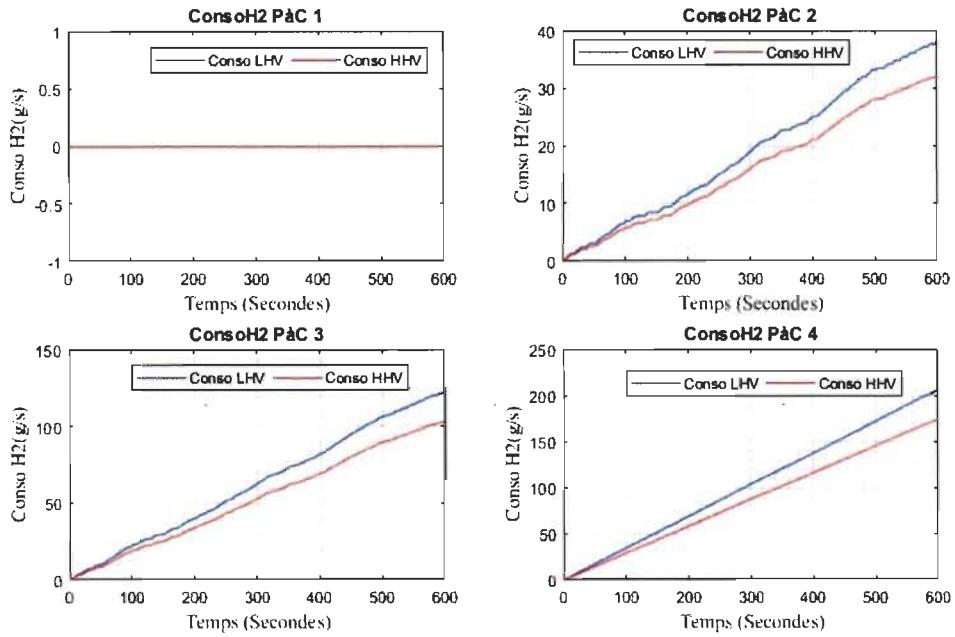


Figure 5-24: Courbe de consommation en hydrogène pour la stratégie basée sur la logique floue et de la répartition de puissance

Les courbes en Figure 5-22 présentent la puissance demandée, la puissance des piles, la puissance de la batterie (1-ag), les courbes de puissances des piles par répartition basée sur les règles de fonctionnement minimal maximal (1-ad), l'état de charge de la batterie (2-ag) et la consommation en hydrogène (2-ad). La puissance issue de la logique floue est presque constante durant le cycle, elle varie légèrement et à l'aide d'un algorithme de répartition de puissance il sera facile d'allouer la puissance que chaque pile pourra fournir. En utilisant la méthode standard, c.-à-d. avec des conditions de limitations entre les valeurs minimales et maximales de chaque pile, la pile 1 et la pile 2 fonctionneront en tout temps à leurs puissances maximales tandis que la pile 3 et 4 fonctionneront entre leurs puissances optimales et maximales. Avec ce raisonnement, la consommation en hydrogène du système est importante et si l'on devrait étudier la dégradation, les piles 1 et 2 seraient sujettes à une forte limitation de vie. De ce fait, il serait idéal de penser à un algorithme capable de

prendre la puissance générée par la logique floue et la répartir de manière minimale entre les piles.

L'un des algorithmes utilisé est le PSO par sa méthode itérative des points intérieurs qui nous permettra de pouvoir allouer la puissance à chaque pile. En implémentant ce dernier, on obtient une répartition de puissance (Figure 5-23). Et comme on peut le remarquer sur cette figure, la pile 1 ne fonctionne pas durant tout le cycle de conduite, et donc la puissance est gérée par les piles 2,3 et 4. Et en observant les courbes de consommation, la stratégie faisant appel à la répartition par PSO est bien meilleure.

5.6 Conclusion

Dans ce chapitre a été présenté la modélisation d'un système multi-piles à combustible et le développement de différentes stratégies de commande. Ce chapitre vise également à évaluer la stratégie de commande la plus robuste tant sur le plan de consommation en hydrogène que sur le rendement de chacune des piles. En partant de l'ensemble des simulations réalisées, les stratégies de commande basées sur la courbe d'efficacité et l'optimisation multi-objective présente de meilleurs résultats sur le plan de la consommation en hydrogène et de rendement. Également dans ces différentes stratégies, le mode ON/OFF est quasi inexistant ce qui permet d'éviter un bon nombre de commutation, qui comme présenté dans la problématique évite la dégradation.

Avec les travaux menés dans le chapitre 4 sur un système à une PAC, nous mènerons une investigation sur les avantages et les inconvénients entre les deux systèmes. Cette analyse peut être sous plusieurs angles de vues comme la consommation en hydrogène, la fiabilité, la modularité, l'efficacité, la durabilité et le contrôle. Un système à une PàC présente une faible modularité contrairement à un système multi PàC surtout en cas de défaillance du système surtout sur l'interchangeabilité des composantes. Mais en terme de conception, le système à une PàC présente une utilisation minime de composants par rapport à un système multi PàC mais, si l'on devrait faire un rapport prix cela reviendrait sensiblement au même. Niveau efficacité, un système multi PàC présente une très bonne efficacité de par son mode de fonctionnement au meilleur rendement pour une puissance demandée ce qui améliore davantage la durée de vie des PàC et demande également une courte sollicitation de l'élément de stockage. Dans un système à une PàC, travailler au meilleur rendement en tout pour satisfaire la demande en puissance reviendrait à solliciter

une forte demande de la part de l'élément de stockage. Cette haute demande de l'élément de stockage peut devenir problématique, et donc la PàC ne serait plus dans l'obligation de fonctionner au meilleur rendement. Niveau fiabilité, qui peut s'étendre sur la fourniture en puissance, l'interchangeabilité des PàC est un très grand avantage dans le système multi PàC en cas défaillance. Avec une présence de plusieurs convertisseurs DC/DC dans un système multi PàC, l'utilisation d'un convertisseur DC/DC central nous permettrait de d'adopter la même configuration côté convertisseur dans le système à une PàC.

Chapitre 6 - Conclusion

Les conceptions classiques de systèmes à pile à combustible utilisent une source d'énergie à pile à combustible unique et un dispositif de stockage pour fournir la charge de base et les transitions dans divers fonctionnements tel un cycle de conduite pour des applications de transport, ou lors de support lors des alimentations isolées ou connectées. Cette recherche propose une nouvelle configuration de multiples sources d'énergie à piles à combustible et de contrôle dans des systèmes multi-pile à combustible. Les piles à combustible dans le système ont été dimensionnées pour différentes puissances afin d'étudier le comportement niveau puissance de chacune d'elles. Dans d'autres cas de figure ces piles pourront être identiques et donc l'avantage sera d'apporter une importante économie niveau d'hydrogène. À l'aide d'un cycle de conduite urbain et des paramètres d'un véhicule, l'on a pu obtenu un profil de charge présentant de bonnes conditions, ce qui a également entraîné une excellente modélisation du système multi-pile. Plusieurs stratégies de commandes ont été présentées dans le cadre d'un système uni-pile et dans le cadre multi-pile, ce qui a permis d'évaluer quelle stratégie serait meilleure pour chacun des systèmes. D'autres techniques ont été également proposées, mais elles n'ont pas fait objet d'étude dans ce travail et sont des projets pour des perspectives futures.

Dans une optique future, il sera envisageable de mettre en place une stratégie de gestion ou de commande intelligente qui déterminera dans un premier temps la priorité de

fonctionnement des piles, et dans un second temps le type des stratégies à adopter et tout cela en fonction d'un profil bien défini. Cette stratégie sera plus développée autour d'un système d'apprentissage afin de permettre au système de prendre des décisions dans la gestion énergétique.

Références

- [1] *Pile à combustible.* Available: https://fr.wikipedia.org/wiki/Pile_à_combustible
- [2] B. Wahdame, "Analyse et optimisation du fonctionnement de piles à combustible par la méthode des plans d'expériences.", Énergie Électrique, Université de Franche-Comté, Université de Technologie de Belfort-Montbeliard, tel-00163317, 2006.
- [3] C. Dépature, L. Boulon, P. Sicard, and M. Fournier, "Simulation model of a multi-stack fuel cell system," in *2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, 2013, pp. 1-10.
- [4] L. Palma and P. N. Enjeti, "A Modular Fuel Cell, Modular DC-DC Converter Concept for High Performance and Enhanced Reliability," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 6, pp. 1437-1443, 2009.
- [5] N. Marx, L. Boulon, F. Gustin, D. Hissel, and K. Agbossou, "A review of multi-stack and modular fuel cell systems: Interests, application areas and on-going research activities," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 23, pp. 12101-12111, 2014/08/04/ 2014.
- [6] A. De Bernardinis, M.-C. Péra, J. Garnier, D. Hissel, G. Coquery, and J.-M. Kauffmann, "Fuel cells multi-stack power architectures and experimental validation of 1kW parallel twin stack PEFC generator based on high frequency magnetic coupling dedicated to on board power unit," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 8, pp. 2367-2383, 2008/08/01/ 2008.
- [7] A. Kolli, A. Gaillard, A. De Bernardinis, O. Bethoux, D. Hissel, and Z. Khatir, "A review on DC/DC converter architectures for power fuel cell applications," *Energy Conversion and Management*, vol. 105, no. Supplement C, pp. 716-730, 2015/11/15/ 2015.
- [8] N. Marx, D. Hissel, F. Gustin, L. Boulon, and K. Agbossou, "On the sizing and energy management of an hybrid multistack fuel cell – Battery system for automotive applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 2, pp. 1518-1526, 2017/01/12/ 2017.
- [9] J. E. Garcia, D. F. Herrera, L. Boulon, P. Sicard, and A. Hernandez, "Power sharing for efficiency optimisation into a multi fuel cell system," in *2014 IEEE 23rd International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, 2014, pp. 218-223.
- [10] M. Becherif, F. Claude, T. Hervier, and L. Boulon, "Multi-stack Fuel Cells Powering a Vehicle," *Energy Procedia*, vol. 74, no. Supplement C, pp. 308-319, 2015/08/01/ 2015.

- [11] P. Khayyer, "Design and performance analysis of electric vehicles fed by multiple fuel cells," M.Sc. Master of Science WEST VIRGINIA UNIVERSITY, 2008.
- [12] Y. Levron and D. Shmilovitz, "On the Maximum Efficiency of Systems Containing Multiple Sources," *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, vol. 57, no. 8, pp. 2232-2241, 2010.
- [13] Y. Levron and D. Shmilovitz, "On the maximum power of systems consisting of multiple sources," in *2008 IEEE 25th Convention of Electrical and Electronics Engineers in Israel*, 2008, pp. 213-216.
- [14] A. D. James LARMINIE, *Fuel cell systems explained*, 2nd ed. Wiley, 2003.
- [15] J. Garnier, "Association en parallèle de générateurs pile à combustible PEMFC," Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard (UTBM), Université de Franche-Comté, 2006.
- [16] *Plan d'Action National sur l'Hydrogène et les piles à combustible (PAN-H)*. Available: www.agence-nationale-recherche.fr
- [17] J. G. Sandra Curtin, "Fuel Cell Technologies Market Report 2014," 2014, Available: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/10/f27/fcto_2014_market_report.pdf.
- [18] C. CEA, "Nouvelles technologies de l'énergie," vol. 44,
- [19] J.-W. Jung, "Modeling and control Fuel Cell based Distributed Generation Systems," Ph.D. Dissertation, Ohio State University, Columbus, OH, 2005.
- [20] James Larminie and Anderw Dicks, in *Fuel Cell Systems Explained* 1st ed. New York: John Wiley & Sons, 2000, pp. 29-52.
- [21] G. Kortum, *Treatise on Electrochemistry*, 2nd ed. New York: Elsevier, 1965.
- [22] P. Andreas, "Implementation of distributed generation technologies in isolated power systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, no. 1, pp. 30-56, 1// 2007.
- [23] J. C. Amphlett, R. M. Baumert, R. F. Mann, B. A. Peppley, P. R. Roberge, and T. J. Harris, "Performance Modeling of the Ballard Mark IV Solid Polymer Electrolyte Fuel Cell: II . Empirical Model Development," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 142, no. 1, pp. 9-15, January 1, 1995 1995.
- [24] W. Caisheng, M. H. Nehrir, and S. Shaw, "Dynamic models and model validation for PEM fuel cells using electrical circuits," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005*, 2005, p. 2115 Vol. 3.
- [25] N. E. T. Laboratory, *Fuel Cell Hand Book*, 6th ed. New York:: John Wiley, 1965.
- [26] D. Candusso *et al.*, "Fuel cell operation under degraded working modes and study of diode by-pass circuit dedicated to multi-stack association," *Energy Conversion and Management*, vol. 49, no. 4, pp. 880-895, 4// 2008.

- [27] M. M. Nanda, "Digital control of pulse width modulated inverters for high performance uninterruptible power supplies," Ph.D. Dissertation, Ohio State University, Columbus, OH, 2004.
- [28] C. Lu-Ying, B. Diong, and R. S. Gemmen, "An improved small-signal model of the dynamic behavior of PEM fuel cells," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 4, pp. 970-977, 2004.
- [29] C. Wang and M. H. Nehrir, "A Physically Based Dynamic Model for Solid Oxide Fuel Cells," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 22, no. 4, pp. 887-897, 2007.
- [30] G. N. Hatsopoulos and J. H. Keenan, *Principles of General Thermodynamics*, 1st ed. New York: John Wiley, 1965.
- [31] S. S. Williamson, A. Emadi, and M. Shahidehpour, "Distributed fuel cell generation in restructured power systems," in *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004.*, 2004, pp. 2079-2084 Vol.2.
- [32] T. E. Springer, T. A. Zawodzinski, and S. Gottesfeld, "Polymer Electrolyte Fuel Cell Model," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 138, no. 8, pp. 2334-2342, August 1991.
- [33] M. H. Nehrir and C. Wang, *Modeling and Control of Fuel Cells:Distributed Generation Applications*. Wiley-IEEE Press, 2009.
- [34] R. F. Mann, J. C. Amphlett, M. A. I. Hooper, H. M. Jensen, B. A. Peppley, and P. R. Roberge, "Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell," *Journal of Power Sources*, vol. 86, no. 1, pp. 173-180, 2000/03/01/ 2000.
- [35] J. C. Amphlett, R. F. Mann, B. A. Peppley, P. R. Roberge, and A. Rodrigues, "A model predicting transient responses of proton exchange membrane fuel cells," *Journal of Power Sources*, vol. 61, no. 1, pp. 183-188, 1996/07/01/ 1996.
- [36] C. Spiegel, *PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab*. Academic Press, 2011.
- [37] L. Jun, "Modelling and control of proton exchange membrane fuel cell," PhD, Engineering and Physical Sciences, James Cook University, 40440, 2013.
- [38] A. García-Olivares, J. Ballabrera-Poy, E. García-Ladona, and A. Turiel, "A global renewable mix with proven technologies and common materials," *Energy Policy*, vol. 41, no. Supplement C, pp. 561-574, 2012/02/01/ 2012.
- [39] T. Olivier and L.-A. Dessaint, "Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 3, 13-16 mai 2009.
- [40] C. M. Shepherd, "Design of Primary and Secondary Cells—Part 2. An Equation Describing Battery Discharge," *Journal of Electrochemical Society*, vol. 112, pp. 657-664, jul. 1965.

- [41] T. Instrument, "Basic Calculation of a Boost Converter's Power Stage," Application Report SLVA372C, Nov. 2009.
- [42] K. B. Wipke, M. R. Cuddy, and S. D. Burch, "ADVISOR 2.1: a user-friendly advanced powertrain simulation using a combined backward/forward approach," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 48, no. 6, pp. 1751-1761, 1999.
- [43] F. Odeim, J. Roes, and A. Heinzel, "Power Management Optimization of an Experimental Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid System," *Energies*, vol. 8, no. 7, p. 6302, 2015.
- [44] M. Ehsani, Y. Gao, S. E. Gay, and A. Emadi, *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design*. CRC Press, 2004.
- [45] M. S. Alam, "Golf Car Application Based Performance Analysis of a Generic Neighborhood Fuel Cell Vehicle (NFCV) Powertrain," *Advances in Automobile Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. -, 2014.
- [46] P. G. E. Vehicle. 2012 *Gem eL Golf car*. Available: <https://static1.squarespace.com/static/54ca7687e4b092fde90db2ac/554a1688e4b09fc3f1e9805a/554a1688e4b0e9b67c9ec50b/1430918792536/el-xd-p01.jpg>
- [47] T. Markel, M. Zolot, K. B. Wipke, and A. A. Pesaran, "Energy Storage System Requirements for Hybrid Fuel Cell Vehicles," Accessed on: June 10-13
- [48] S. N. MOTAPON, "DESIGN AND SIMULATION OF A FUEL CELL HYBRID EMERGENCY POWER SYSTEM FOR A MORE ELECTRIC AIRCRAFT: EVALUATION OF ENERGY MANAGEMENT SCHEMES," Ph.D., ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE, 2013.
- [49] L. M. Fernandez, P. Garcia, C. A. Garcia, J. P. Torreglosa, and F. Jurado, "Comparison of control schemes for a fuel cell hybrid tramway integrating two dc/dc converters," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 11, pp. 5731-5744, 2010/06/01/ 2010.
- [50] L. M. Fernandez, P. Garcia, C. A. Garcia, and F. Jurado, "Hybrid electric system based on fuel cell and battery and integrating a single dc/dc converter for a tramway," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 5, pp. 2183-2192, 2011/05/01/ 2011.
- [51] S. Caux, W. Hankache, M. Fadel, and D. Hissel, "On-line fuzzy energy management for hybrid fuel cell systems," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 5, pp. 2134-2143, 2010/03/01/ 2010.
- [52] P. Thounthong, V. Chunkag, P. Sethakul, S. Sikkabut, S. Pierfederici, and B. Davat, "Energy management of fuel cell/solar cell/supercapacitor hybrid power source," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 1, pp. 313-324, 2011/01/01/ 2011.
- [53] 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*, vol. 35, no. 2, pp. 774-783, 2010/01/01/ 2010.

- [54] 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*, vol. 194, no. 1, pp. 369-380, 2009/10/20/ 2009.
- [55] B. Vural *et al.*, "Fuel cell and ultra-capacitor hybridization: A prototype test bench based analysis of different energy management strategies for vehicular applications," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 20, pp. 11161-11171, 2010/10/01/ 2010.
- [56] P. García, J. P. Torreglosa, L. M. Fernández, and F. Jurado, "Viability study of a FC-battery-SC tramway controlled by equivalent consumption minimization strategy," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 11, pp. 9368-9382, 2012/06/01/ 2012.
- [57] J. P. Torreglosa, F. Jurado, P. García, and L. M. Fernández, "Hybrid fuel cell and battery tramway control based on an equivalent consumption minimization strategy," *Control Engineering Practice*, vol. 19, no. 10, pp. 1182-1194, 2011/10/01/ 2011.
- [58] P. Rodatz, G. Paganelli, A. Sciarretta, and L. Guzzella, "Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle," *Control Engineering Practice*, vol. 13, no. 1, pp. 41-53, 2005/01/01/ 2005.
- [59] J. Han, J.-F. Charpentier, and T. Tang, "An Energy Management System of a Fuel Cell/Battery Hybrid Boat," *Energies*, vol. 7, no. 5, p. 2799, 2014.
- [60] S. F. Tie and C. W. Tan, "A review of energy sources and energy management system in electric vehicles," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 20, no. C, pp. 82-102, 2013.
- [61] S. N. MOTAPON, "DESIGN AND SIMULATION OF A FUEL CELL HYBRID EMERGENCY POWER SYSTEM FOR A MORE ELECTRIC AIRCRAFT: EVALUATION OF ENERGY MANAGEMENT SCHEMES," DOCTOR OF PHILOSOPHY, ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE, 2013.
- [62] C. H. Zheng, N. W. Kim, and S. W. Cha, "Optimal control in the power management of fuel cell hybrid vehicles," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 655-663, 2012/01/01/ 2012.
- [63] A. Sciarretta, M. Back, and L. Guzzella, "Optimal control of parallel hybrid electric vehicles," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 352-363, 2004.
- [64] L. Xu, J. Li, J. Hua, X. Li, and M. Ouyang, "Adaptive supervisory control strategy of a fuel cell/battery-powered city bus," *Journal of Power Sources*, vol. 194, no. 1, pp. 360-368, 2009/10/20/ 2009.
- [65] C. Mi, M. A. Masrur, and D. W. Gao, *Hybrid Electric Vehicles: Principles and Applications with Practical Perspectives*. John Wiley & Sons, 2011.
- [66] G. Lino and S. Antonio, *Vehicle propulsion systems, introduction to modeling and optimization*. Springer, 2005.

- [67] T. Hofman, M. Steinbuch, R. M. van Druten, and A. F. A. Serrarens, "RULE-BASED ENERGY MANAGEMENT STRATEGIES FOR HYBRID VEHICLE DRIVETRAINS: A FUNDAMENTAL APPROACH IN REDUCING COMPUTATION TIME," *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 39, no. 16, pp. 740-745, 2006/01/01/ 2006.
- [68] J. T. B. A. Kessels, M. W. T. Koot, P. P. J. v. d. Bosch, and D. B. Kok, "Online Energy Management for Hybrid Electric Vehicles," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57, no. 6, pp. 3428-3440, 2008.
- [69] M. Koot, J. T. B. A. Kessels, B. d. Jager, W. P. M. H. Heemels, P. P. J. v. d. Bosch, and M. Steinbuch, "Energy management strategies for vehicular electric power systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 54, no. 3, pp. 771-782, 2005.
- [70] P. J.T, S. A.G., and P. H., *Control offuel cell power systems*. Springer, 2005.
- [71] K. M., "Dimensionnement et fonctionnement optimal d'une unité d'alimentation auxiliaire à pile à combustible dans un véhicule," PhD, Université de Magdeburg, 2011.
- [72] B. Thorstensen, "A parametric study of fuel cell system efficiency under full and part load operation," *Journal of Power Sources*, vol. 92, no. 1, pp. 9-16, 2001/01/01/ 2001.
- [73] E. Tazelaar, Y. Shen, P. A. Veenhuizen, T. Hofman, and P. P. J. van den Bosch, "Sizing Stack and Battery of a Fuel Cell Hybrid Distribution Truck," *Oil Gas Sci. Technol. – Rev. IFP Energies nouvelles*, 10.2516/ogst/2012014 vol. 67, no. 4, pp. 563-573, 7// 2012.
- [74] B. A.E., *Dynamic optimization*. Addison Wesley Longman, 1999.
- [75] H. T., "Framework for combined control and design optimization of hybrid vehicle propulsion systems," PhD, Eindhoven University of Technology, 2007.