



HAL
open science

Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande.

Jérôme Bernard

► **To cite this version:**

Jérôme Bernard. Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande.. Automatique / Robotique. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2007. Français. NNT: . tel-00271090

HAL Id: tel-00271090

<https://theses.hal.science/tel-00271090>

Submitted on 8 Apr 2008

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

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

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DE VALENCIENNES
ET DU HAINAUT-CAMBRESIS

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Mention Automatique

Spécialité Automatique et Génie Informatique

par

Jérôme BERNARD

Ingénieur ENSIAME

Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande

Soutenue le 3 décembre 2007 devant la commission d'examen :

Dr. Felix	BÜCHI	Paul Scherrer Institut	(co-encadrant)
Pr. Geneviève	DAUPHIN-TANGUY	École Centrale de Lille	(président)
Dr. Sébastien	DELPRAT	Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis	(co-encadrant)
Pr. Thierry Marie	GUERRA	Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis	(directeur)
Pr. Lino	GUZZELLA	ETH Zürich	(rapporteur)
Pr. Alain	OUSTALOUP	ENSEIRB Bordeaux	(rapporteur)
Dr. Gino	PAGANELLI	Conception et Développement Michelin	(examineur)
Pr. Richard	STOBART	Université de Loughborough	(rapporteur)

THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITÉ DE VALENCIENNES
ET DU HAINAUT-CAMBRESIS

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Mention Automatique

Spécialité Automatique et Génie Informatique

par

Jérôme BERNARD

Ingénieur ENSIAME

Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande

Soutenue le 3 décembre 2007 devant la commission d'examen :

Dr. Felix	BÜCHI	Paul Scherrer Institut	(co-encadrant)
Pr. Geneviève	DAUPHIN-TANGUY	École Centrale de Lille	(président)
Dr. Sébastien	DELPRAT	Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis	(co-encadrant)
Pr. Thierry Marie	GUERRA	Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis	(directeur)
Pr. Lino	GUZZELLA	ETH Zürich	(rapporteur)
Pr. Alain	OUSTALOUP	ENSEIRB Bordeaux	(rapporteur)
Dr. Gino	PAGANELLI	Conception et Développement Michelin	(examineur)
Pr. Richard	STOBART	Université de Loughborough	(rapporteur)

Remerciements

Entre la France et la Suisse, il y a eu beaucoup de rencontres ces dernières années et autant de personnes que je tiens à remercier vivement.

Tout d'abord, mes compagnons de route, l'équipe MCS du LAMIH, avec Seb qui m'a enrôlé dans cette aventure (« Allé viens gamin ! »), TMG qui est le chef incontesté et bienveillant (« Mais t'es con ! »), Jimmy qui n'est pas vindicatif (« C'est pas faux »), Lolo qui adore les jouets technologiques (« Je peux programmer mes Lègos en wifi ! »), Michel qui encense la musique du chef (« C'est pas bientôt fini ce bouquiant ! ») et François qui s'est fait HDRisé il y a peu (« Ah bon !!! »). Il faut aussi ajouter ceux qui restent dans l'ombre et qui travaillent d'arrache pied pour assurer la relève scientifique : El-Hadi, le seul l'unique (« Attends... j't'esplique... »), Miguel, l'exilé mexicain qui n'aime pas les avions (« C'est à cause des lapins »), Hichem, le basketteur adepte des matrices et des LMI (« C'est n'importe quoi... »), Hugues, qui fait des choses avec des robots (« Ch'tappe dans la balle ! »), et Souade, la touche féminine de l'équipe (« Oui... et alors ? »). Enfin il y a ceux qui sont passés de l'ombre à la lumière (ou plus précisément qui ont réussi à s'enfuir du labo) : Pierrot, le fou qui fait rouler des voitures sans chauffeur (« OK KATE »), Alex le créateur de traîneaux de Noël à base de disques durs et de chameaux (« Djéjé le ouf ! », c'est de lui), Djamel, le joueur de scrabble (« J'en ai marre... »), et Hakim, l'humoriste kabyle (je renonce à citer une de ses blagues). Je vous remercie tous de votre aide et de votre bonne humeur permanente. Dans le labo, je tiens aussi à remercier grandement Jacques qui n'a pas ménagé ses efforts pour permettre à un convertisseur de puissance de fonctionner correctement et de proposer en bonus un magnifique spectacle pyrotechnique (fonction avancée de l'engin).

Direction la suisse maintenant et l'ETH Zürich, avec le projet PAC-Car II. Une grande et belle aventure aux cotés de Florian, Dominik, Nicolas, Pius, Anne-Marie, Fanny et Rachel... merci ces souvenirs sur les pistes du Shell Eco. C'est à Zürich aussi que j'ai fait plus ample connaissance avec des français exilés (temporairement ou définitivement) : Jean-Jacques, un mécano de Valenciennes adepte du Shell Eco Marathon et des Lègos Mindstorms, et Gino, un ancien de chez nous pour qui tout ce qui est électrique n'a pas de secrets ; merci à vous deux de m'avoir communiqué votre intérêt pour la pile à combustible et les véhicules propres.

Merci également à Lino Guzzella de m'avoir permis de participer à ce projet et à Chris pour ses conseils avisés tout au long de ce séjour. Merci à Jan pour ses précieux schémas électroniques du convertisseur de puissance (le fameux engin à la fonction pyrotechnique), et à Guillaume qui m'a fait partager son expérience de la programmation de microcontrôleurs.

Troisième étape, le PSI, ou Paul Scherrer Institut, toujours en Suisse... Là fini de jouer, place à la pratique et son lot de difficultés, avec notamment un système PAC bien décidé à me donner du fil à retordre. Heureusement je pouvais compter sur Felix, toujours disponible et plein de bons conseils pour mener à bien les expérimentations... merci pour cette enrichissante collaboration et pour l'accueil tout au long de ce séjour. Merci également à Thomas pour son support technique et à l'ensemble de l'équipe pile à combustible : Reto, Stefan, Mathias, Gabriel, Aki et Fritz... sans oublier Pierre, mon collègue de bureau qui a supporté mes blagues pendant plusieurs mois et qui m'a fait découvrir l'existence du Hornuss (là encore, je renonce à expliquer de quoi il s'agit...). Merci à mes compagnons de badminton qui m'ont permis de décompresser et par là même de renoncer à torturer PowerPAC.

Enfin, je tiens à remercier les enseignants de l'IUT GIM de Longuenesse, en particulier M. Descamps et M. et Mme. Kaluba, qui m'ont permis de (et encouragé à) continuer les études.

Mais il n'y a pas que des labos dans la vie (ça occupe juste pas mal de temps), il y a aussi les potes et la famille. Évidemment merci à l'incontournable Guy, toujours partant pour faire un petit tour (... du Mont-Blanc), à Jos, encore un exilé mais au Canada cette fois-ci (t'as vu un caribou finalement ?), et à Nico, aussi sympa qu'imprévisible. Un grand Merci à Zahra et à Flo pour leur soutien morale très précieux durant ces années. Merci à ma grand-mère qui m'a supporté depuis mon plus jeune âge. Et finalement, un énorme MERCI à Pa' et à Man' pour leur soutien logistique et morale... merci à ma petite sœur et au futur beauf... et merci à Lulu ☺.

Sommaire

SOMMAIRE	1
NOTATIONS	5
INTRODUCTION GÉNÉRALE	9
CHAPITRE 1. LA PILE À COMBUSTIBLE POUR LA TRACTION AUTOMOBILE	13
1.1. INTRODUCTION	14
1.2. LA PILE À COMBUSTIBLE : HISTORIQUE ET APPLICATIONS	14
1.3. LA PILE À COMBUSTIBLE À MEMBRANE POLYMÈRE (TYPE PEM)	17
1.3.1. Principe de fonctionnement	17
1.3.2. Cellule élémentaire et assemblage de la pile à combustible.....	18
1.3.3. Caractéristique électrique de la pile à combustible	20
1.3.4. Système pile à combustible.....	22
1.4. GROUPES MOTOPROPULSEURS À PILE À COMBUSTIBLE	25
1.4.1. Contraintes dans les applications automobiles.....	25
1.4.2. Véhicule hybride à pile à combustible	29
1.4.3. La source secondaire d'énergie	31
1.5. DIMENSIONNEMENT ET STRATÉGIES DE COMMANDE : ÉTAT DE L'ART	33
1.5.1. Dimensionnement de la source de puissance hybride	33
1.5.2. Stratégies de commande.....	36
1.6. CONCLUSION	39
CHAPITRE 2. MODÉLISATION D'UN VÉHICULE HYBRIDE À PILE À COMBUSTIBLE	41
2.1. INTRODUCTION	42
2.2. PRINCIPE DE MODÉLISATION	42
2.3. LE SYSTÈME PILE À COMBUSTIBLE	43
2.3.1. Cellule élémentaire	44
2.3.2. Les composants auxiliaires	45
2.3.3. Consommation et rendement d'un système pile à combustible	48
2.3.4. Mise à l'échelle du système PAC.....	50
2.4. LA BATTERIE	51
2.5. LES SUPERCONDENSATEURS	54

2.6. LE VÉHICULE ET SON GROUPE MOTOPROPULSEUR	56
2.6.1. Le véhicule.....	57
2.6.2. Les roues	58
2.6.3. Le réducteur et la transmission	59
2.6.4. La machine électrique	60
2.7. LES CONVERTISSEURS DE PUISSANCE	61
2.7.1. Modèle générique d'un convertisseur de puissance	61
2.7.2. Architecture électrique du véhicule	63
2.8. MODÈLE DE SIMULATION.....	66
2.9. CONCLUSION	71
CHAPITRE 3. STRATÉGIES DE COMMANDE : DE L'OPTIMISATION GLOBALE À LA COMMANDE	
TEMPS RÉEL.....	73
3.1. INTRODUCTION	74
3.2. FORMULATION DU PROBLÈME D'OPTIMISATION GLOBALE	74
3.2.1. Hypothèses sur le fonctionnement du système PAC.....	74
3.2.2. Première formulation	75
3.2.3. Réécriture du <i>Problème n°1</i>	79
3.3. APPROCHE PAR LA PROGRAMMATION DYNAMIQUE.....	80
3.3.1. Principe	80
3.3.2. Résultats.....	83
3.4. APPROCHE PAR LA THÉORIE DE LA COMMANDE OPTIMALE	86
3.4.1. Formulation du Hamiltonien et conditions d'optimalité	86
3.4.2. Influence de la condition initiale $\lambda(0)$	89
3.4.3. Algorithme de résolution du problème d'optimisation globale.....	91
3.4.4. Prise en compte de la contrainte sur l'état de charge	94
3.4.5. Prise en compte de la dynamique du système PAC	99
3.5. STRATÉGIE DE COMMANDE TEMPS RÉEL BASÉE SUR LA COMMANDE OPTIMALE.....	102
3.5.1. Approche utilisée	103
3.5.2. Estimation du paramètre de Lagrange $\hat{\lambda}$ sur un cycle a priori connu	103
3.5.3. Proposition d'une stratégie prédictive : λ_{pred}	110
3.6. CONCLUSION	114

CHAPITRE 4. DIMENSIONNEMENT DE LA SOURCE DE PUISSANCE D'UN VÉHICULE HYBRIDE À PILE À COMBUSTIBLE	117
4.1. INTRODUCTION	118
4.2. OUTIL D'AIDE AU DIMENSIONNEMENT DE LA SOURCE DE PUISSANCE.....	118
4.2.1. Contraintes de dimensionnement	118
4.2.2. Estimation de la consommation d'hydrogène	123
4.2.3. Conclusion	128
4.3. EXEMPLE APPLICATIF : LE PROTOTYPE HY-MUVE	130
4.3.1. Présentation du véhicule	130
4.3.2. Objectifs et hypothèses de l'étude.....	132
4.3.3. Résultats de l'étude	136
4.3.4. Conclusion	140
4.4. CONCLUSION	140
CHAPITRE 5. MISE EN ŒUVRE DES STRATÉGIES DE COMMANDE	141
5.1. INTRODUCTION	142
5.2. APPLICATION DE L'OPTIMISATION GLOBALE : LE PROTOTYPE PAC-CAR II	142
5.2.1. Présentation du prototype.....	142
5.2.2. Formulation du problème d'optimisation globale.....	144
5.2.3. Résultats de l'optimisation.....	146
5.2.4. Résultats expérimentaux	148
5.2.5. Conclusion	149
5.3. VALIDATION DES STRATÉGIES DE COMMANDE TEMPS RÉEL : DÉVELOPPEMENT D'UNE PLATEFORME D'ESSAI.....	150
5.3.1. Présentation de la plateforme d'essais	150
5.3.2. Convertisseur de puissance : modélisation et commande	152
5.3.3. Identification et modélisation du banc d'essai.	154
5.3.4. Résultats expérimentaux	167
5.3.5. Conclusion	179
5.4. CONCLUSION	179
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	181
RÉFÉRENCES	185
RÉFÉRENCES PERSONNELLES	195
ANNEXES	197
LISTE DES FIGURES	215
LISTE DES TABLEAUX.....	220

Notations

Système pile à combustible

A_{cell}	surface active de membrane d'une cellule	(cm ²)
$C_{p_{air}}$	chaleur spécifique de l'air ($C_{p_{air}} = 1004 J / kg / K$ pour l'air sec)	(J/kg/K)
d_{sysPAC}	densité massique du système PAC	(kg/kW)
E_{cell}	tension à vide d'une cellule	(V)
F	constante de Faraday ($F = 96485 C$)	(C)
i_{PAC}	densité de courant	(A/cm ²)
I_{PAC}	courant débité par la pile à combustible	(A)
$i_{PAC_{max}}$	densité de courant maximale	(A/cm ²)
k_{air}	coefficient adiabatique de l'air ($k_{air} = 1.4$)	(-)
\dot{m}_{air}^s	débit massique d'air du compresseur par unité de surface	(g/s/cm ²)
$\dot{m}_{H_2}^s$	consommation instantanée d'hydrogène par unité de surface	(g/s/cm ²)
\dot{m}_{H_2}	consommation instantanée d'hydrogène	(g/s)
M_{H_2}	masse molaire de l'hydrogène ($M_{H_2} = 2 g / mol$)	(g/mol)
$\dot{m}_{O_2}^s$	consommation instantanée d'oxygène par unité de surface	(g/s/cm ²)
M_{O_2}	masse molaire de l'oxygène ($M_{O_2} = 32 g / mol$)	(g/mol)
M_{sysPAC}	masse du système pile à combustible	(kg)
N_{cell}	nombre de cellules	(-)
n_{e^-}	nombre d'électrons libérés d'une molécule d'hydrogène ($n_{e^-} = 2$)	(-)
p_{aux}	densité de puissance consommée par les composants auxiliaires	(W/cm ²)
PCI_{H_2}	pouvoir calorifique inférieur de l'hydrogène ($PCI_{H_2} = 120 MJ / kg$)	(J/kg)
p_{cmp}	densité de puissance consommée par le compresseur	(W/cm ²)
p_{H_2}	densité de puissance d'hydrogène consommée	(W/cm ²)
p_{PAC}	densité de puissance brute d'une cellule	(W/cm ²)
p_{sysPAC}	densité de puissance du système pile à combustible	(W/cm ²)
r_{cmp}	rapport de compression du compresseur	(-)
T_{amb}	température ambiante à l'entrée du compresseur	(K)
U_{PAC}	la tension de la pile à combustible	(V)
V_{act}	chute de tension d'activation d'une cellule	(V)
V_{cell}	tension d'une cellule	(V)
V_{conc}	chute de tension de concentration d'une cellule	(V)
V_{ohm}	chute de tension ohmique d'une cellule	(V)
η_{cmp}	rendement du groupe moto-compresseur	(-)
η_{PAC}	rendement de la pile à combustible	(-)
η_{sysPAC}	rendement du système pile à combustible	(-)
λ_{air}	coefficient stœchiométrique pour l'alimentation en air	(-)

Batterie

$C_{batt_{max}}$	capacité nominale de la batterie	(Ah)
C_{batt}	capacité courante de la batterie	(Ah)
E_{batt}	tension à vide d'un élément de batterie	(V)
I_{batt}	courant de la batterie	(A)
M_{batt}	masse d'un élément de batterie	(kg)
N_{batt}	nombre d'éléments de batterie	(-)
R_{batt}	résistance interne d'un élément de batterie	(ohm)
SOC	état de charge	(-)
U_{batt}	tension du pack de batterie	(V)
V_{batt}	tension d'un élément de batterie	(V)
η_f	rendement faradique	(-)

Supercondensateur

C_{SC}	capacité du supercondensateur	(F)
C_{SC}^{eq}	capacité équivalente du pack de supercondensateur	(F)
E_{SC}	tension à vide d'un supercondensateur	(V)
$E_{SC_{max}}$	tension à vide maximale d'un supercondensateur	(V)
I_{SC}	courant du supercondensateur	(A)
M_{SC}	masse d'un supercondensateur	(kg)
R_{SC}	résistance interne d'un supercondensateur	(ohm)
SOC	état de charge	(-)
U_{SC}	tension du pack de supercondensateur	(V)
V_{SC}	tension d'un supercondensateur	(V)
X_{SC}	énergie contenu dans un supercondensateur	(J)
$X_{SC_{max}}$	énergie maximale contenu un supercondensateur	(J)

Véhicule

A_f	surface frontale	(m ²)
C_r	coefficient de résistance au roulement	(-)
C_{roue}	couple de la roue	(N.m)
C_x	coefficient de résistance aérodynamique	(-)
F_{aero}	effort résistant aérodynamique	(N)
F_{pente}	effort résistant en montée	(N)
F_{roul}	effort résistant de roulement	(N)
$F_{traction}$	effort de traction appliquée à la caisse du véhicule	(N)
g	constante de gravité ($g = 9.81 m/s^2$)	(m/s ²)
J_{roue}	inertie d'une roue	(kg.m ²)

J_{GMP}	inertie du groupe-motopropulseur ramenée aux roues	(kg.m ²)
M_{SSE}	masse de la source secondaire d'énergie	(kg)
M_{veh}	masse totale du véhicule	(kg)
M_{veh}^0	masse à vide du véhicule	(kg)
M_{eq}	masse équivalente des éléments en rotation	(kg)
R_{roue}	rayon de la roue	(m)
V_{veh}	vitesse du véhicule	(m/s)
α	pente de la route	(rad)
ρ_{air}	densité de l'air ($\rho_{air} = 1,29 \text{ kg} / \text{m}^3$)	(kg/m ³)
ω_{roue}	régime des roues	(rad/s)

Machine électrique

C_{mot}	couple de la machine électrique	(N.m)
$C_{mot_{max}}$	couple maximal de la machine électrique	(N.m)
$C_{mot_{min}}$	couple minimal de la machine électrique	(N.m)
J_{mot}	inertie de l'arbre de la machine électrique	(kg.m ²)
r_{red}	rapport de réduction du réducteur	(-)
η_{mot}	rendement de la machine électrique	(-)
η_{red}	rendement du réducteur	(-)
ω_{mot}	régime de la machine électrique	(rad/s)

Convertisseurs de puissance

P_{conv}^{entree}	puissance d'entrée du convertisseur	(W)
P_{conv}^{sortie}	puissance de sortie du convertisseur	(W)
η_{conv}	rendement du convertisseur	(-)

Stratégies de commande

\dot{m}_{H_2}	consommation instantanée d'hydrogène du système PAC	(g/s)
P_{mot}	puissance de la machine électrique (convertisseur inclus)	(W)
P_{SSE}	puissance de la source secondaire d'énergie (convertisseur inclus)	(W)
$P_{SSE_{min}}, P_{SSE_{max}}$	puissances limites de la source secondaire d'énergie	(W)
P_{sysPAC}	puissance du système PAC (convertisseur inclus)	(W)
$P_{sysPAC_{min}}, P_{sysPAC_{max}}$	puissances limites du système PAC	(W)
SOC	état de charge	(-)
T_e	période d'échantillonnage	(s)
X	variable d'état correspondant à l'énergie contenue dans la source secondaire	(J)
X_{min}, X_{max}	énergies minimale et maximale de la source secondaire d'énergie	(J)

Introduction générale

Les travaux présentés dans ce mémoire ont été réalisés dans le cadre d'une convention de recherche entre le Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielle et Humaine (LAMIH, UMR CNRS 8530) et le Paul Scherrer Institut (PSI, Villigen, Suisse). Les axes thématiques portent sur l'utilisation de la pile à combustible pour la traction automobile. Ils ont été soutenus en partie par la région Nord Pas-de-Calais et le FEDER (Fonds Européen de Développement Régional) dans le cadre du CPER 2000/2006 dans le projet de recherche AUTORIS T53 « Automatique pour la Route Intelligente et Sûre ».

Les enjeux énergétiques et environnementaux font aujourd'hui partie des préoccupations majeures au niveau international. L'accroissement de la population mondiale ainsi que l'activité industrielle des pays développés et des puissances économiques émergentes ont entraîné une explosion des besoins en énergie. L'utilisation des ressources fossiles pour satisfaire cette « boulimie » énergétique est responsable de la majeure partie des rejets de gaz à effet de serre dans l'atmosphère ; cette pollution est à l'origine du réchauffement de la planète et des bouleversements climatiques qui en découlent. Outre les problèmes liés à l'environnement, les réserves d'énergies fossiles sont limitées et ne pourront satisfaire à moyen terme la demande mondiale /Bentley 2002/.

Plus particulièrement, parmi l'ensemble des secteurs incriminés, l'automobile est régulièrement citée. Le nombre de véhicules en circulation ne cesse d'augmenter et était de plus de 850 millions d'unité dans le monde en 2005 /CCFA/. Évidemment, l'évolution du nombre de véhicules s'accompagne d'une augmentation de la consommation globale de carburant et des rejets de polluants. En Europe, des normes ont été mises en place pour tenter de limiter la pollution des automobiles (par exemple EURO IV et EURO V), et des progrès notables ont été réalisés par les constructeurs et les laboratoires de recherche pour y répondre. Ainsi l'apparition de nouvelles motorisations, de commandes avancées des moteurs thermiques, de filtres à particules ... ont permis de réduire considérablement la consommation et les rejets de polluants des véhicules. A moyen terme, l'utilisation de véhicules hybrides

(couplant une motorisation thermique et électrique) devrait permettre d'améliorer encore l'impact environnemental des automobiles /Mierlo et al. 2006/.

Pourtant, la propulsion dite « zéro émission » est envisageable avec des véhicules électriques. Ces derniers n'ont pas connu de véritable essor du fait de leur faible autonomie et de leur important temps de recharge. Une solution à ce problème est possible : la production d'énergie « propre » en quantité suffisante pour alimenter une motorisation électrique peut être réalisée par une pile à combustible /Büchel et al. 2001/ /Wee 2007/ /Helmolt et Eberle 2007/. Si son carburant, l'hydrogène, n'est pas disponible à l'état naturel, il s'agit d'un vecteur énergétique qui peut être produit à partir de différentes sources d'énergies (dont les énergies renouvelables) ce qui offre des perspectives d'avenir très intéressantes /Conte et al. 2001/. L'utilisation de la pile à combustible dans le domaine de la traction automobile fait l'objet de ce mémoire.

Le premier chapitre présente la notion de véhicule à pile combustible (PAC). Après un bref historique et la présentation des technologies existantes, le principe de fonctionnement d'un système pile à combustible est décrit. Suite à cette description, les contraintes engendrées par son utilisation dans un groupe motopropulseur sont abordées. Ces contraintes favorisent l'emploi d'une source secondaire d'énergie réversible en puissance (par exemple des batteries ou des supercondensateurs) ; on parle alors de Véhicule Hybride à Pile à Combustible. Le terme hybride sous entend un degré de liberté dans le dimensionnement du groupe motopropulseur et dans la gestion des échanges énergétiques au sein de celui-ci ; un état de l'art de ces deux domaines est proposé.

Afin d'étudier les stratégies de commande et les problèmes liés au dimensionnement, une modélisation d'un véhicule à pile à combustible hybride est nécessaire. Le modèle présenté au chapitre 2 est dit « énergétique », c'est à dire que les dynamiques rapides ont été négligées. Il en résulte un modèle quasi-statique où les seules dynamiques prises en compte traduisent le comportement longitudinal du véhicule et l'évolution de l'état de charge de la source secondaire d'énergie (batteries ou supercondensateurs). Les modèles développés permettent une mise à l'échelle aisée de la pile à combustible et de la source secondaire d'énergie en vue de l'étude du dimensionnement de ceux-ci.

Dans un véhicule hybride, la stratégie de commande est essentielle pour définir la répartition de puissance entre les différents organes de traction. Dans le chapitre 3, deux approches sont envisagées. Dans un premier temps, le parcours futur du véhicule est supposé connu, ce qui permet d'utiliser « hors ligne » des algorithmes d'optimisation globale minimisant la consommation d'hydrogène. Ces algorithmes sont évidemment inutilisables « en ligne » mais fournissent une expertise et une référence de consommation pour l'évaluation de stratégies de commande temps réel. Dans une seconde partie, une stratégie de commande temps réel est proposée et repose sur les résultats obtenus avec un algorithme de commande optimale.

Le chapitre 4 aborde la problématique du choix des puissances du système pile à combustible et de la source secondaire d'énergie dans un véhicule PAC hybride. Un outil d'aide au dimensionnement est proposé. Ce dimensionnement doit d'abord répondre à un cahier des charges qui impose, par exemple, des performances dynamiques au véhicule (vitesse, accélération). Ensuite, un critère énergétique (consommation d'hydrogène) est considéré pour faire un choix parmi les solutions satisfaisant le cahier des charges. La méthodologie proposée est illustrée par une mise en application sur un prototype de véhicule hybride à PAC.

Le dernier chapitre présente la mise en œuvre des stratégies de commandes abordées tout au long de ce mémoire. En particulier, une plateforme expérimentale émulant à échelle réduite un véhicule à pile à combustible hybride est présentée. Ce banc d'essai, développé au Paul Scherrer Institut, a permis de valider le bon fonctionnement des stratégies de commande et a permis de confronter l'utilisation de batteries et de supercondensateurs dans une architecture hybride à PAC.

Enfin, les conclusions et perspectives des travaux de recherche (théoriques et pratiques) menés tout au long de cette thèse clôturent ce présent mémoire.

Chapitre 1. La pile à combustible pour la traction automobile

1.1. INTRODUCTION	14
1.2. LA PILE À COMBUSTIBLE : HISTORIQUE ET APPLICATIONS	14
1.3. LA PILE À COMBUSTIBLE À MEMBRANE POLYMÈRE (TYPE PEM)	17
1.3.1. Principe de fonctionnement.....	17
1.3.2. Cellule élémentaire et assemblage de la pile à combustible.	18
1.3.3. Caractéristique électrique de la pile à combustible.....	20
1.3.4. Système pile à combustible	22
1.4. GROUPES MOTOPROPULSEURS À PILE À COMBUSTIBLE	25
1.4.1. Contraintes dans les applications automobiles.....	25
1.4.2. Véhicule hybride à pile à combustible	29
1.4.3. La source secondaire d'énergie	31
1.5. DIMENSIONNEMENT ET STRATÉGIES DE COMMANDE : ÉTAT DE L'ART	33
1.5.1. Dimensionnement de la source de puissance hybride.....	33
1.5.2. Stratégies de commande.....	36
1.6. CONCLUSION	39

1.1. Introduction

Ce premier chapitre présente les technologies de pile à combustible et en particulier celles utilisées dans le domaine automobile.

Après un bref historique, les principaux domaines d'application de la pile à combustible (PAC) seront présentés. Les limites d'utilisation liées à l'environnement automobile favorisent l'usage d'une technologie en particulier. Son principe de fonctionnement et ses contraintes d'utilisation sont décrits. Certaines de ces contraintes peuvent être levées par l'adjonction d'une source secondaire d'énergie (par exemple des batteries). Le système hybride ainsi obtenu fait l'objet de ce mémoire.

1.2. La pile à combustible : historique et applications

La pile à combustible (PAC) convertit de l'énergie chimique en énergie électrique. Sa technologie est devenue de plus en plus familière aux cours des dernières décennies mais a pourtant été découverte il y a plus de 150 ans. En 1839, Sir William Grove, un juriste anglais et chercheur amateur en chimie, décrit une expérience où de l'eau et de l'électricité sont produites à partir d'oxygène et d'hydrogène. L'expérience de Grove donne naissance à la batterie à gaz (figure 1-1), rebaptisée plus tard pile à combustible /Fuel Cell Today/ /SAE/.

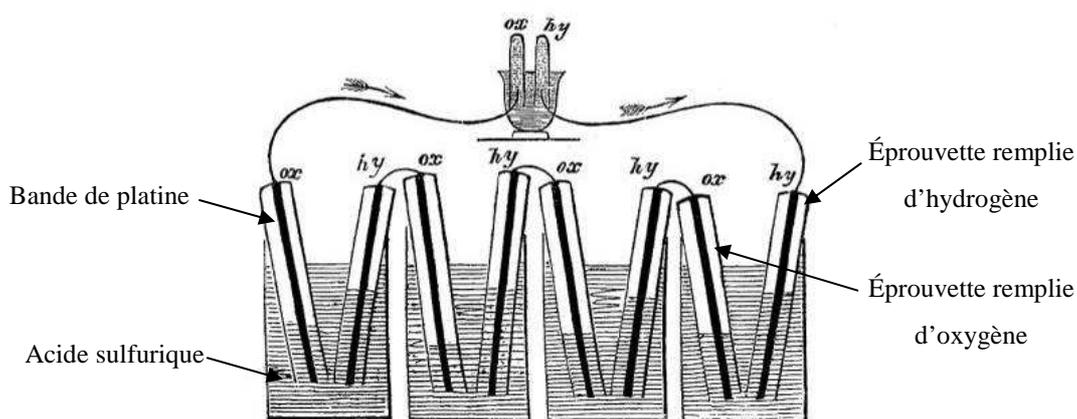


Figure 1-1 : L'expérience de Sir William Grove /ClubPac/.

La découverte de W. Grove ne fut cependant pas exploitée et fut reléguée au rang de curiosité scientifique, alors que l'extraction des combustibles fossiles et le développement du moteur thermique étaient en plein essor. En 1932, le docteur Francis Bacon reprend les recherches initiées par W. Grove et parvient à réaliser une pile à combustible de 5kW en 1959.

La pile à combustible a connu son émergence grâce à la NASA (National Aeronautics and Space Administration, USA) qui cherchait un moyen de produire de l'électricité à bord de ses engins spatiaux. La pile à combustible apparut comme un système idéal du fait de la présence d'oxygène et d'hydrogène disponible dans les systèmes de propulsion. Des piles à combustible furent utilisées avec succès par la capsule Gemini en 1964 /Burke 2003/, et l'eau produite par la réaction entre l'hydrogène et l'oxygène était consommée par les astronautes. Il s'agit d'une des premières utilisations concrètes des piles à combustible.

L'intérêt de l'utilisation de la pile à combustible dans le domaine des transports remonte à 1973. La première crise pétrolière a conduit les gouvernements, les industries et les laboratoires à chercher une alternative aux énergies fossiles pour tenter de s'assurer une indépendance énergétique. De nombreux efforts et moyens ont été fournis pour réduire les coûts de fabrication des systèmes pile à combustible, pour augmenter leur fiabilité et pour améliorer leur compacité. En 1993 un bus à pile à combustible est réalisé par l'entreprise Ballard (aujourd'hui l'un des leaders mondiaux dans le domaine de la pile à combustible) en partenariat avec le constructeur automobile Daimler-Benz /Prater 1992/. La pile à combustible était de type PEM (« Proton Exchange Membrane » ou « membrane échangeuse de proton »). L'hydrogène nécessaire à l'alimentation de la pile était produit par le reformage embarqué de méthanol. Depuis les années 1990, les piles à combustibles et l'hydrogène sont considérés comme des candidats possibles à la production d'énergie durable et propre, que ce soit pour des applications mobiles ou stationnaires.

Les piles à combustibles sont répertoriées en fonction de leurs températures de fonctionnement, de leurs électrolytes et de leurs plages de puissance. Les principales technologies de pile à combustible ainsi que leurs caractéristiques sont données dans le tableau 1-1 /CEA 2004/ /Axane/.

	Nom	Électrolyte	Plage de puissance	Température de fonctionnement	Domaines d'applications
PAC à basses températures	DMFC (« Direct methanol fuel cell »)	Membrane polymère	1mW à 100kW	60-90 °C	Portable
	PEMFC (« Proton exchange membrane fuel cell »)	Membrane polymère	100W à 500kW	60-90 °C	Transport Portable Stationnaire
	AFC (« Alkaline fuel cell »)	Solution alcaline aqueuse	10 kW à 100kW	50-250 °C	Transport Spatial
	PAFC (« Phosphoric acid fuel cell »)	Acide phosphorique	Jusqu'à 10MW	160-220 °C	Stationnaire
PAC à hautes températures	MCFC (« Molten carbonate fuel cell »)	Carbonate fondu	Jusqu'à 100MW	650 °C	Stationnaire
	SOFC (« Solid oxide fuel cell »)	Oxyde solide	Jusqu'à 100MW	750-1050 °C	Stationnaire

Tableau 1-1 : Les principaux types de piles à combustible.

Chaque type de pile à combustible a un domaine d'application privilégié (tableau 1-1). Les piles dites à basses températures sont plutôt destinées aux applications mobiles, alors que les piles dites à hautes températures sont généralement destinées aux applications stationnaires. Les principales applications mobiles concernent les appareils électroniques portables (ordinateur, téléphone cellulaire...) et le domaine des transports (voiture, bus...); les applications stationnaires concernent la production décentralisée d'énergie électrique (habitats collectifs ou individuels...). Dans ces dernières, la chaleur produite par les piles de hautes températures peut être récupérée par des procédés de cogénération ce qui augmente le rendement global du système PAC /CEA 2004/. A la figure 1-2, les différents types de pile à combustible et les plages de puissance sont liés par leurs domaines possibles d'application.

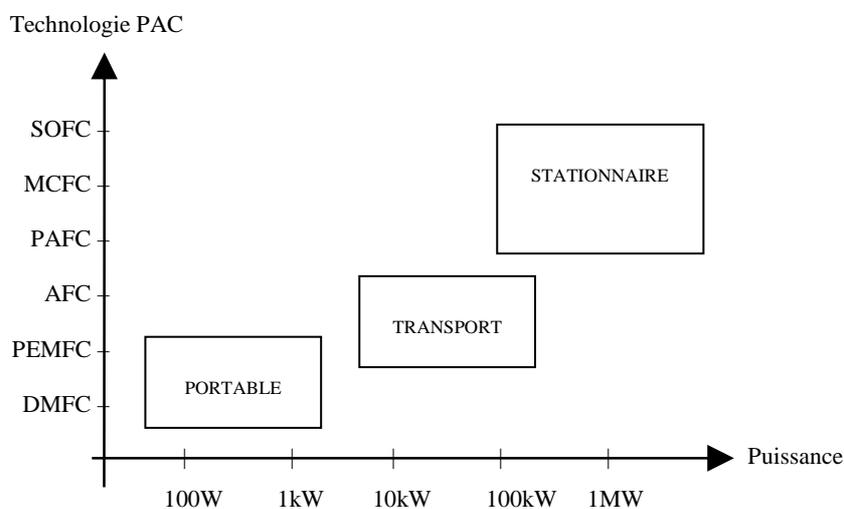


Figure 1-2 : Technologies des piles à combustible et domaines d'application.

Parmi les différents type de pile à combustible, la pile de type PEM (« Proton Exchange Membrane », également appelée PEFC (« Polymer Electrolyte Fuel Cell »), est la technologie généralement retenue pour l'usage automobile. Plusieurs raisons expliquent ce choix /Lachaize 2004/ /Emadi et al. 2005/ /Boettner et al. 2002/ :

- Densité de puissance :

La propulsion d'un véhicule requiert une puissance de quelques kilowatts à une centaine de kilowatts. En outre, le groupe motopropulseur doit avoir une masse et un encombrement acceptable. La PAC de type PEM répond le mieux à ces contraintes avec une densité de puissance comprise entre 1 kg/kW et 3 kg/kW.

- Température de fonctionnement :

La pile de type PEM a une température de fonctionnement comprise entre 50 °C et 80 °C, ce qui est adapté à un usage automobile.

- Structure solide :

La pile à combustible PEM est composée d'éléments solides (spécialement la membrane en polymère). Cette structure solide garantit une certaine résistance mécanique vis à vis des contraintes liées à l'environnement automobile.

1.3. La pile à combustible à membrane polymère (type PEM)

1.3.1. Principe de fonctionnement

La pile à combustible de type PEM convertit l'énergie chimique (l'hydrogène et oxygène) en énergie électrique. Cette réaction électrochimique est une électrolyse de l'eau inverse. L'énergie électrique est produite par une réaction d'oxydoréduction entre l'oxygène (oxydant) et l'hydrogène (réducteur). L'oxydation a lieu à l'anode et la réduction à la cathode. Ces deux réactions sont isolées par une membrane qui joue le rôle d'électrolyte. La cathode est alimentée en oxygène gazeux (ou plus généralement en air) et l'anode est alimentée en hydrogène gazeux. Les équations chimiques d'oxydoréductions sont les suivantes :

- Oxydation à l'anode:



- Réduction à la cathode:



- En combinant (1.1) et (1.2), la réaction globale est :



L'électricité est produite par les 2 électrons libérés par la molécule d'hydrogène (1.1). Les protons d'hydrogène H^+ traversent la membrane séparant l'anode de la cathode et se recombinent à la cathode avec les électrons et les atomes d'oxygène. Idéalement, les seuls produits secondaires de la réaction sont de l'eau et de la chaleur. La figure 1-3 résume le principe de la pile à combustible PEM.

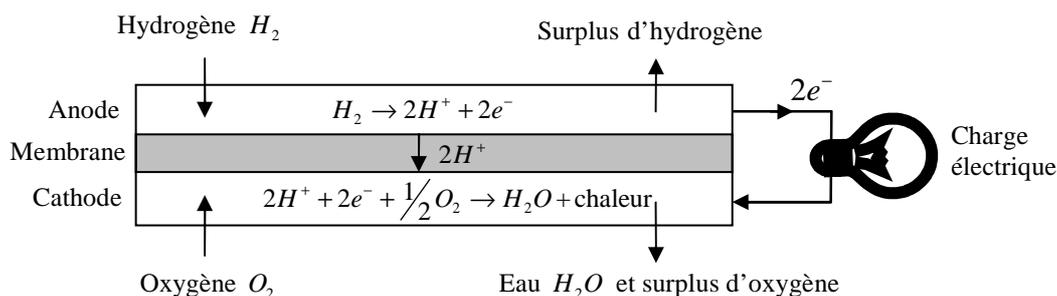


Figure 1-3 : Schéma de principe de la pile à combustible PEM.

1.3.2. Cellule élémentaire et assemblage de la pile à combustible.

La réaction électrochimique a lieu au sein d'une cellule élémentaire. Une cellule élémentaire consiste en un assemblage Electrode-Membrane-Electrode (EME) pressé entre 2 plaques bipolaires (figure 1-4).

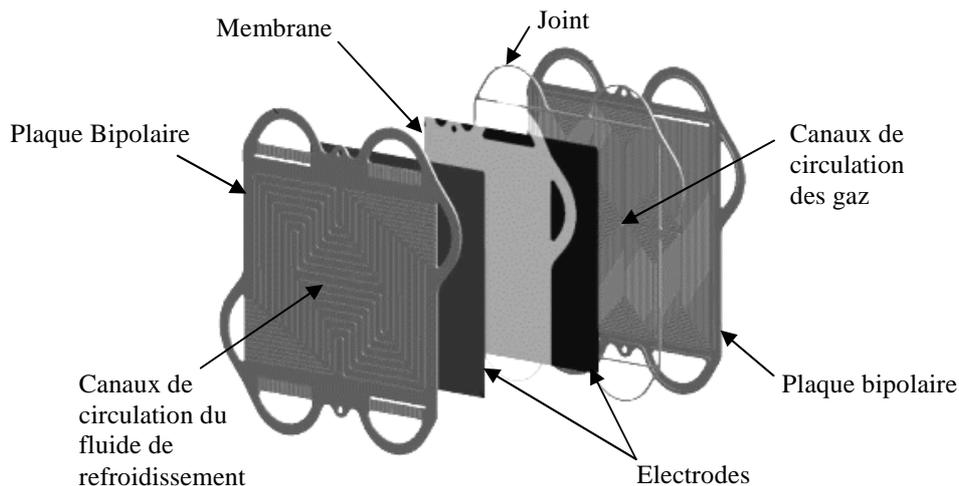


Figure 1-4 : Exemple d'assemblage d'une cellule élémentaire /Ruge 2003/.

La membrane est le cœur de la cellule élémentaire. La membrane est un électrolyte en polymère qui est perméable aux protons d'hydrogène H^+ et imperméable aux gaz. Pour garantir la perméabilité aux protons H^+ , la membrane doit être en permanence humidifiée. La membrane Nafion[®] /Dupont / est la plus répandue dans les piles à combustible PEM.

Un assemblage EME comporte 2 électrodes : l'anode et la cathode. Une électrode est faite de 2 couches de matériaux poreux. La couche de diffusion des gaz (ou GDL, « Gas Diffusion Layer ») transporte et répartit uniformément l'hydrogène et l'oxygène sur la membrane tout en évacuant l'eau produite. La couche de catalyseur (platine) permet d'activer et d'accélérer la réaction d'oxydoréduction.

Les plaques bipolaires remplissent 2 rôles. D'une part elles distribuent les gaz de manière uniforme à l'assemblage EME par le biais de fins canaux (figure 1-4). D'autre part, elles permettent la circulation d'un fluide de refroidissement pour refroidir la cellule élémentaire. Les plaques bipolaires doivent être conductrices et résister à un environnement corrosif (par exemple, le graphite ou l'acier inoxydable sont utilisés).

La tension obtenue avec une cellule élémentaire est inférieure à 1 volt, ce qui est insuffisant pour la majorité des applications. Pour disposer d'une source de tension suffisamment élevée, plusieurs cellules sont assemblées en série pour former la pile à combustible (figure 1-5). Pour assurer l'étanchéité, les cellules sont pressées les unes contre les autres par 2 plaques d'extrémité (« endplates ») et des tirants.

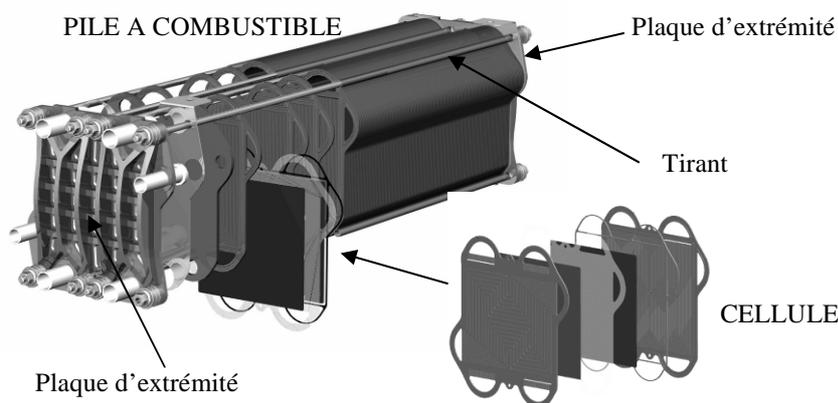


Figure 1-5 : Exemple d'un assemblage de pile à combustible /Ruge 2003/.

1.3.3. Caractéristique électrique de la pile à combustible

La tension à vide de la cellule (figure 1-6) est fonction du potentiel électrochimique de la réaction d'oxydoréduction. Idéalement, ce potentiel électrochimique est de 1,23V (potentiel standard) pour des conditions standard de température et de pression (1 atm, 25 °C). En pratique, la tension à vide se situe légèrement en dessous de 1 V /Rodatz 2003/.

La courbe de polarisation est la caractéristique électrique d'une pile à combustible. Elle représente la tension de la cellule en fonction de la densité de courant (figure 1-6) et dépend de la température de fonctionnement, de la pression des réactifs et du taux d'humidité de la membrane. La densité courant i_{PAC} (A/cm²) est définie par :

$$i_{PAC} = \frac{I_{PAC}}{A_{cell}} \quad (1.4)$$

avec I_{PAC} le courant de la pile à combustible et A_{cell} la surface active d'une membrane.

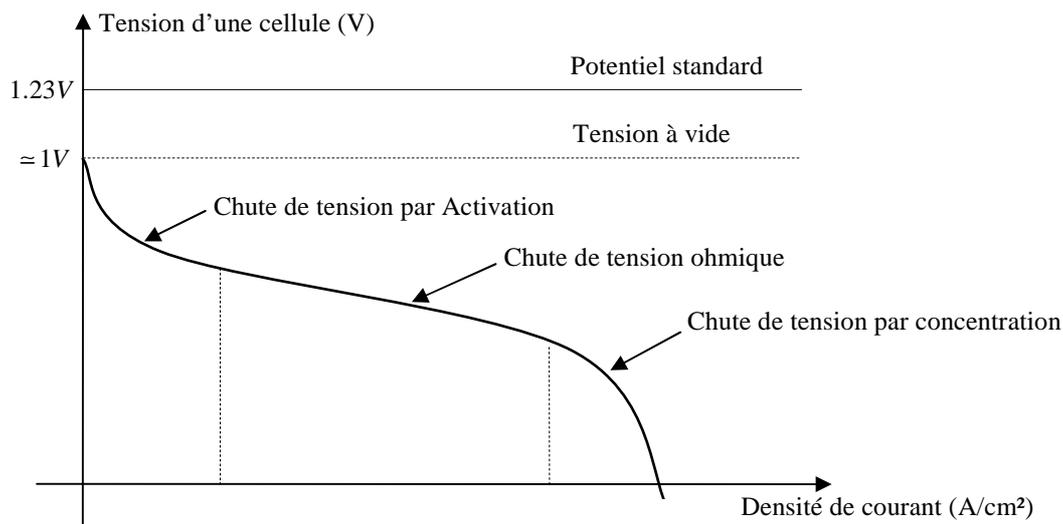


Figure 1-6 : Courbe de polarisation classique d'une cellule de pile à combustible PEM.

La courbe de polarisation (figure 1-6) peut être décomposée en 3 zones distinctes, chacune caractérisée par des chutes de tension prépondérantes /Rodatz 2003/ :

- Chute de tension par activation :
La réaction électrochimique doit franchir un seuil d'activation pour s'initier. Ce seuil est dû à la lenteur de la réaction électrochimique à la surface des électrodes. La couche de catalyseur présente dans les électrodes aide à accélérer la réaction.
- Chute de tension ohmique :
Les chutes de tension ohmiques sont causées par la résistance électrique de la membrane et par la résistance électrique de l'ensemble électrodes/plaques bipolaires.
- Chute de tension par concentration :
Les chutes de tension par concentration résultent d'un manque de réactifs. Lorsque la densité de courant devient élevée la diffusion des gaz dans les électrodes n'est plus assez rapide pour entretenir la réaction.

La courbe de polarisation à la figure 1-6 est donnée pour une cellule élémentaire. De manière classique, en faisant l'hypothèse que toutes les cellules ont un comportement électrique identique, la tension totale de la pile à combustible V_{PAC} est donnée par :

$$V_{PAC}(I_{PAC}) = N_{cell} \cdot V_{cell}(I_{PAC}) \quad (1.5)$$

avec V_{cell} la tension élémentaire d'une cellule et N_{cell} le nombre de cellules.

La puissance brute P_{PAC} fournie par la pile à combustible est :

$$P_{PAC}(I_{PAC}) = V_{PAC}(I_{PAC}) \cdot I_{PAC} \tag{1.6}$$

Une pile à combustible est capable de fournir de la puissance électrique tant qu'elle est alimentée en réactifs (oxygène et hydrogène). Ceci implique qu'une pile à combustible ne peut fonctionner seule et a besoin d'un ensemble de composants périphériques pour fonctionner.

1.3.4. Système pile à combustible

La pile à combustible a besoin d'un ensemble de conditions pour produire de l'énergie électrique /Boettner et al. 2002/ : elle doit être alimentée en hydrogène et en air, la membrane doit être en permanence humidifiée, et la chaleur produite doit être évacuée. Les composants auxiliaires ont pour rôle d'assurer le bon fonctionnement de la pile à combustible. L'ensemble composé de la pile à combustible et de ses composants auxiliaires est appelé *système* pile à combustible.

Les *systèmes* de piles à combustibles sont généralement conçus spécifiquement pour une application en particulier. Il existe donc de nombreuses architectures possibles. Une architecture classique est donnée figure 1-7.

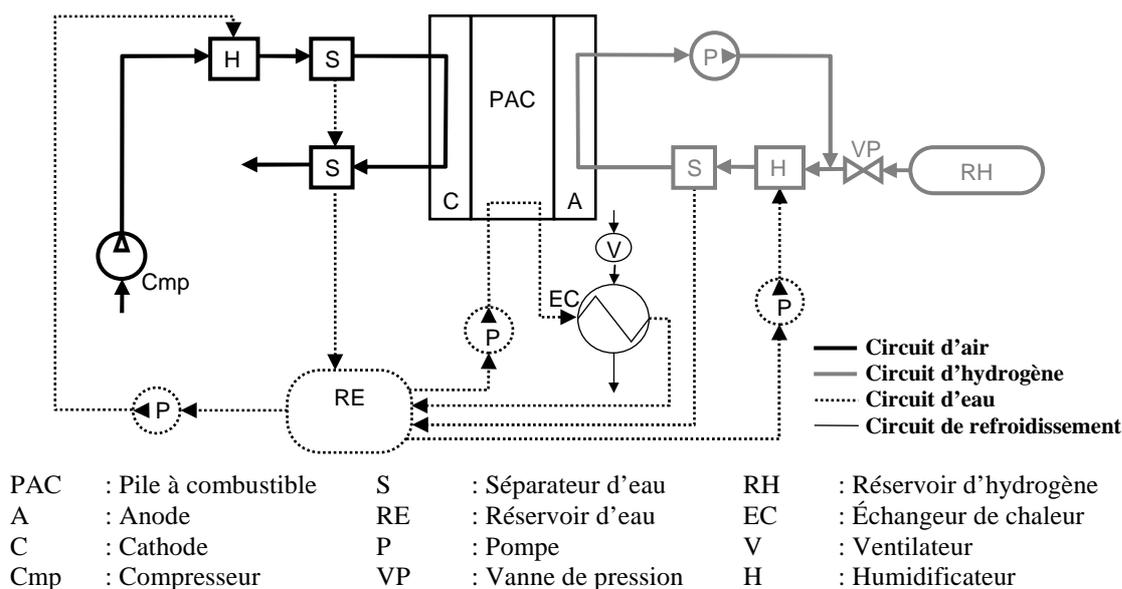


Figure 1-7 : Architecture d'un système à pile à combustible /Boettner et al. 2002/.

Quatre circuits principaux composent un système PAC (figure 1-7):

- Le circuit d'hydrogène (circuit fermé) :

Il alimente l'anode en hydrogène gazeux. L'hydrogène non consommé à la sortie de la PAC peut être réinjecté à l'entrée de celle-ci par l'intermédiaire d'une pompe de recirculation.

- Le circuit d'air (circuit ouvert) :

Généralement, pour alimenter la pile à combustible en oxygène, un compresseur injecte de l'air à la cathode.

- Le circuit de refroidissement

Le circuit de refroidissement est une partie essentielle du système pile à combustible (figure 1-7). La chaleur produite par la PAC peut représenter plus de 50% des pertes de puissances pour des courants élevés. De plus, la différence de température limitée entre la pile à combustible (80 °C environ) et l'air ambiant ne favorise pas les échanges thermiques et impose l'utilisation de larges échangeurs de chaleurs. Ceci représente une contrainte technique importante dans des applications automobiles.

- Le circuit d'eau :

L'humidification des membranes se fait par les gaz entrants (air et hydrogène) via le circuit d'eau (figure 1-7). L'eau contribue également au refroidissement de la pile à combustible lors de son passage dans l'échangeur de chaleur.

Les composants auxiliaires sont donc indispensables au bon fonctionnement de la pile à combustible. Ils consomment une partie de l'énergie produite par la pile à combustible. Le compresseur d'air (figure 1-7) est l'auxiliaire qui absorbe le plus de puissance /Guezennec et al. 2003/, et il influe considérablement sur le rendement global du système pile à combustible. La puissance nette disponible en sortie du système PAC P_{sysPAC} est fonction de la puissance brute P_{PAC} et de la puissance consommée par les composants auxiliaires P_{aux} :

$$P_{sysPAC}(I_{PAC}) = P_{PAC}(I_{PAC}) - P_{aux}(I_{PAC}) \quad (1.7)$$

Des allures caractéristiques des puissances sont données figure 1-8.

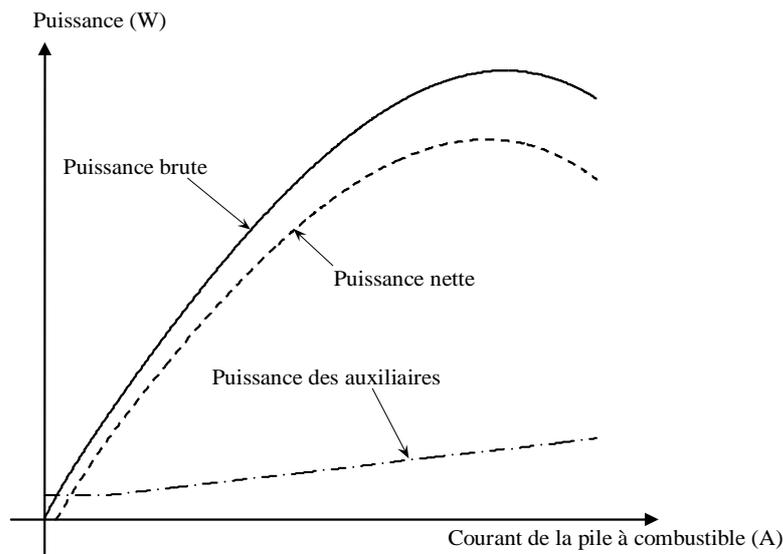


Figure 1-8 : Puissances caractéristiques d'un système PAC (puissances brutes, nette et auxiliaires).

Les pertes de puissances induites par la consommation électrique des composants auxiliaires affectent le rendement global du système (figure 1-9). Alors que la PAC convertit l'énergie chimique en énergie électrique avec un rendement maximal d'environ 70 % pour de faibles charges, le système pile à combustible atteint un rendement maximal d'environ 50 % aux alentours de 25 % de la puissance nette disponible.

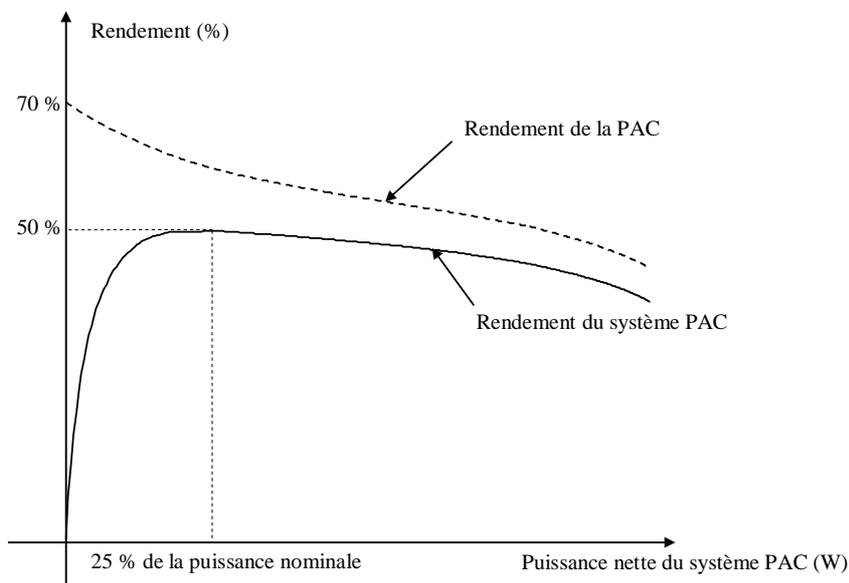


Figure 1-9 : Rendements caractéristiques de la PAC et du système PAC.

1.4. Groupes motopropulseurs à pile à combustible

1.4.1. Contraintes dans les applications automobiles

Un véhicule à pile à combustible est avant tout un véhicule électrique. La motorisation est assurée par une ou plusieurs machines électriques et la puissance est fournie par le système pile à combustible. Comme la production d'énergie électrique est réalisée sans émissions de gaz à effet de serre, un véhicule à pile à combustible est considéré non-polluant (localement). Le système PAC ayant un rendement élevé (jusqu'à 50 %), son utilisation dans un groupe motopropulseur apparaît donc comme une solution intéressante de mobilité durable.

Une architecture classique d'un groupe motopropulseur utilisant une pile à combustible est donnée figure 1-10.

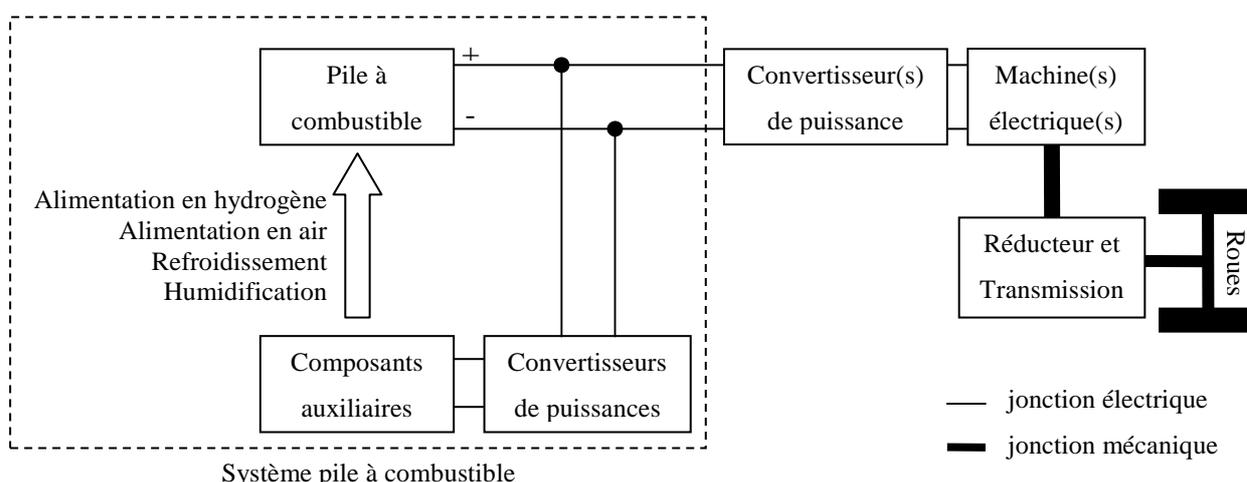


Figure 1-10 : Exemple d'architecture de groupe motopropulseur à pile à combustible.

Cependant certaines contraintes liées à l'utilisation de l'hydrogène et de la pile à combustible dans un milieu automobile doivent être considérées :

- Stockage de l'hydrogène :

Plusieurs technologies de stockage d'hydrogène ont été envisagées pour l'automobile /Züttel 2003/ /Ananthachar et Duffy 2005/ /Zhou 2005/ mais ne permettent pas encore de stocker suffisamment d'hydrogène pour assurer une autonomie similaire à celle d'un véhicule conventionnel :

- + Stockage sous forme gazeuse : l'hydrogène est stocké dans des réservoirs métalliques ou en matériaux composites, pressurisés entre 300 bar et 700 bar. C'est la solution la plus simple et la moins coûteuse pour stocker de l'hydrogène.
 - + Stockage sous forme liquide : l'hydrogène est stocké sous forme liquide à très basse température (-253 °C) dans des réservoirs cryogéniques.
 - + Reformage : l'hydrogène est produit à bord du véhicule par un reformeur. Un reformeur est une « mini-raffinerie » qui extrait de l'hydrogène à partir de carburants liquides hydrogénés (par exemple le méthanol).
 - + Stockage « solide » : l'hydrogène peut être stocké dans des réservoirs d'hydrure métallique. Un hydrure métallique capture les molécules d'hydrogène lorsqu'il est sous pression et les libère lorsque l'on augmente sa température. Le principal inconvénient de cette solution est la masse importante du réservoir. Le stockage d'hydrogène dans des nanostructures et des nanotubes est également rapporté dans la littérature, mais la capacité réelle d'absorption de l'hydrogène est un sujet controversé et semble éloignée des besoins de l'automobile /Guay & al. 2004/.
- Dynamique du système pile à combustible :
Un système pile à combustible ne peut pas délivrer instantanément sa puissance maximale. Sa dynamique est principalement limitée par celle du compresseur d'air /Guezennec et al. 2003/. Généralement le temps de réponse du système pile à combustible est de l'ordre de quelques secondes et peut affecter les performances dynamiques du véhicule lors de fortes accélérations.
 - Dimensionnement du système PAC et circuit de refroidissement :
Dans le cas d'un véhicule à pile à combustible sans autres sources secondaires d'énergie électrique, le système pile à combustible est dimensionné pour satisfaire les pointes de puissance du moteur électrique (lors de fortes accélérations). Pour obtenir des performances dynamiques du véhicule satisfaisantes, la puissance nominale du système PAC doit être élevée. Le refroidissement de la pile à combustible peut donc devenir délicat /Rogg et al. 2003/.

- Démarrage à froid du système PAC :

Pendant les démarrages à froid, la puissance maximale du système PAC est limitée. La pile à combustible a besoin de quelques minutes pour atteindre sa température de fonctionnement. /Markel & al. 2003/ considère que seulement 50 % de la puissance nominale est disponible pendant les 2 premières minutes. La limitation de puissance pendant un démarrage à froid sont également décrites par /Boettner et al. 2002/.

Les véhicules à pile à combustibles sans autres sources secondaires d'énergie électrique comme le véhicule prototype Hydrogen3 de General Motors, tableau 1-2, sont donc peu courants car les contraintes liées à l'environnement automobile nécessitent des développements technologiques spécifiques. Dans le cadre d'une utilisation automobile, la pile à combustible est donc généralement assistée d'une source secondaire d'énergie électrique. Ce type de véhicule est alors appelé « véhicule hybride à pile à combustible ».

Constructeur	Véhicule	Pile à combustible	Source secondaire d'énergie	Stockage de l'hydrogène	Auto-nomie	Motorisation
Honda /Honda/	FCX 	86 kW (Honda)	Super- -condensateurs	Réservoir haute pression (156,6 l, 350 bar)	430 km	80 kW
Toyota /Toyota/	Highlander FCHV* 	90 kW (Toyota)	Batteries Ni-MH	Version 3: Hydruure métallique Version 4: Réservoir haute pression Version 5: Reformeur	300 km 250 km -	80 kW
Nissan /Nissan/	X-Trail FCHV* 	90 kW (Nissan)	Batterie Li-ion	Réservoir haute pression (700 bar)	500 km	90 kW
General Motors /GM/	Zafira Hydrogen3 	94 kW	sans	Version liquide: Réservoir d'hydrogène liquide (68 l) Version gaz: Réservoir haute pression (77,4 l, 700 bar)	400 km 270 km	60 kW
Daimler-Chrysler /AFH2/	Class A F-Cell 	85 kW (Ballard)	Batteries Ni-MH	Réservoir haute pression (350 bar)	150 km	65 kW
PSA /PSA/	Partner Taxi-PAC 	5,5 kW	Batteries Ni-MH	Réservoir haute pression (300 bar)	250 km	22 kW
Michelin-PSI /Michelin/ /Büchi et al. 2007/	Hy-Light 	30 kW (PSI)	Super- -condensateurs	Réservoir d'hydrogène haute pression (200 bar) + Réservoir d'oxygène haute pression (350 bar)	500 km	2 moteurs-roues de 30 kW à l'avant.

* : Fuel Cell Hybrid Vehicle

Tableau 1-2 : Exemples de véhicules à pile à combustible.

1.4.2. Véhicule hybride à pile à combustible

Dans un véhicule à pile à combustible hybride, c'est la source de puissance qui est hybride, la motorisation restant entièrement électrique. Un véhicule à pile à combustible hybride utilise donc une source secondaire d'énergie électrique réversible en puissance (fonctionnement en charge et en décharge). Les rôles de la source secondaire d'énergie sont /Markel et al. 2003/ /Jeong et Oh 2002/ :

- Assister en puissance la pile à combustible :
La source secondaire fournit le complément de puissance lorsque la pile atteint sa puissance maximale (par exemple lors d'accélération du véhicule).
- Récupérer l'énergie cinétique lors des freinages :
La récupération de l'énergie cinétique lors des phases de freinage permet d'économiser de l'hydrogène et d'augmenter l'autonomie du véhicule.
- Introduire un degré de liberté dans la répartition des puissances :
L'hybridation permet de répartir la demande de puissance entre le système pile à combustible et la source secondaire d'énergie. Les points de fonctionnement du système PAC peuvent ainsi être déplacés vers les zones de meilleurs rendements en utilisant des stratégies de commande adaptées, ce qui permet de réduire la consommation d'hydrogène.

Au sein du groupe motopropulseur d'un véhicule à pile à combustible hybride (figure 1-11), plusieurs modes d'opérations peuvent être identifiés. Ces modes d'opérations (traction, freinage, arrêt) induisent des flux énergétiques différents (tableau 1-3).

Mode	Puissance	Schéma des flux énergétiques	Description
Traction	$P_{ME} > 0$ $P_{sysPAC} > 0$ $P_{SSE} = 0$		Le système PAC alimente seul la machine électrique.
	$P_{ME} > 0$ $P_{sysPAC} > 0$ $P_{SSE} > 0$		Le système PAC et la source secondaire alimentent ensemble la machine électrique.
	$P_{ME} > 0$ $P_{sysPAC} = 0$ $P_{SSE} > 0$		La source secondaire alimente seule la machine électrique.
	$P_{ME} > 0$ $P_{sysPAC} > 0$ $P_{SSE} < 0$		Le système PAC alimente la machine électrique et recharge la source secondaire.
Freinage	$P_{ME} < 0$ $P_{sysPAC} = 0$ $P_{SSE} < 0$		La source secondaire récupère l'énergie cinétique de freinage.
	$P_{ME} < 0$ $P_{sysPAC} > 0$ $P_{SSE} < 0$		La source secondaire récupère l'énergie cinétique de freinage et reçoit également de la puissance du système PAC.
Arrêt	$P_{ME} = 0$ $P_{sysPAC} = 0$ $P_{SSE} = 0$		Aucun flux énergétique.
	$P_{ME} = 0$ $P_{sysPAC} > 0$ $P_{SSE} < 0$		Le système PAC recharge la source secondaire.

sysPAC : système PAC.
 SSE : source secondaire d'énergie.
 ME : machine électrique.

Tableau 1-3 : Flux énergétiques au sein du groupe motopulseur.

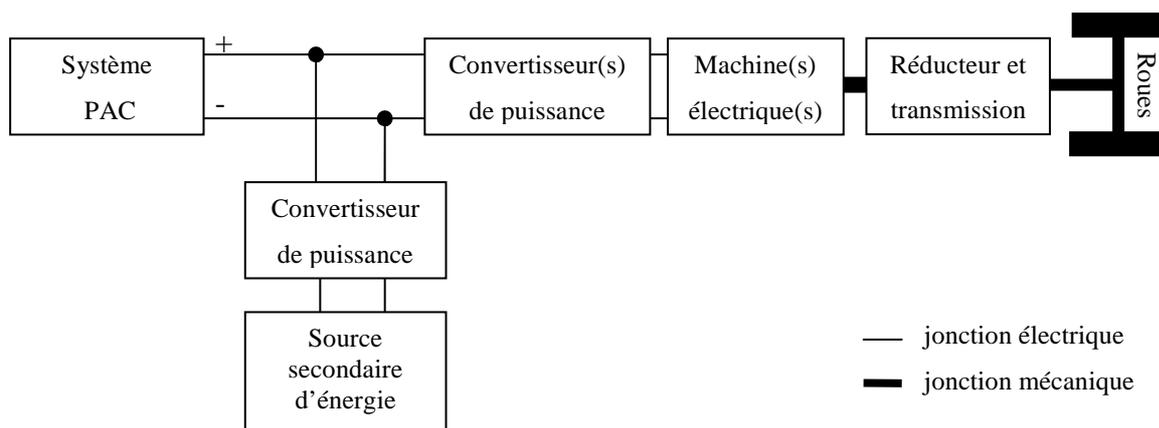


Figure 1-11 : Exemple d'architecture de véhicule à pile à combustible hybride.

1.4.3. La source secondaire d'énergie

La caractéristique principale de la source secondaire d'énergie est qu'elle est réversible en puissance. La source secondaire peut être rechargée par récupération de l'énergie cinétique ou par le système pile à combustible (tableau 1-3).

Dans un véhicule à pile à combustible hybride, deux technologies sont généralement retenues pour constituer la source secondaire d'énergie : les batteries et les supercondensateurs.

Une batterie est un convertisseur d'énergie électrochimique qui emmagasine l'énergie de manière chimique. Dans le cadre d'une utilisation pour des véhicules hybrides, les principales technologies retenues sont les batteries au plomb, les batteries Nickel Métal-Hydrure (Ni-MH) et les batteries Lithium-ion (Li-ion) /Spotnitz 2005/. La technologie Ni-MH est la plus répandue car elle offre de bonnes performances en termes de capacité, de durée de vie et de coût. La technologie Li-ion dispose d'une meilleure puissance spécifique (W/kg) et d'une meilleure capacité spécifique (Wh/kg), mais des améliorations sont toujours nécessaires concernant le coût, la sûreté de fonctionnement, la durée de vie et les performances à faibles températures. La technologie au plomb souffre d'une faible capacité spécifique du fait du poids élevée des batteries; toutefois, il s'agit d'une technologie robuste disponible à faible coût et qui bénéficie toujours de développements /Soria et al. 2006/.

Un supercondensateur (ou encore condensateur à doubles couches) stocke l'énergie de manière électrostatique en polarisant une solution électrolytique. Il n'y a pas de réaction chimique mise en jeu, ce qui permet d'obtenir des durées de vie élevées (un supercondensateur peut être chargé et déchargé des centaines de milliers de fois). Les

supercondensateurs ont une capacité spécifique extrêmement faible mais disposent d'une puissance spécifique importante. De plus, leur rendement en charge et en décharge est élevé. Dans une application hybride, les supercondensateurs sont destinés à satisfaire les fortes pointes de puissances /Barrade et Rufer 2004/.

Une pile à combustible, une batterie et un supercondensateur ont des caractéristiques électriques extrêmement différentes. Le plan de Ragone (figure 1-12) illustre les différences en termes de puissances spécifiques et de capacités spécifiques des différentes sources de puissance /Schneuwly et al. 2002/. La pile à combustible et l'hydrogène disposent de la capacité spécifique la plus élevée, suivies des batteries puis des supercondensateurs. A l'inverse, les supercondensateurs disposent de la puissance spécifique la plus importante, suivies des batteries puis de la pile à combustible.

L'un des enjeux dans le dimensionnement d'un véhicule hybride à pile à combustible est de déterminer une combinaison idéale entre le système pile à combustible et la source secondaire d'énergie pour satisfaire les performances dynamiques du véhicule tout en lui assurant une autonomie suffisante.

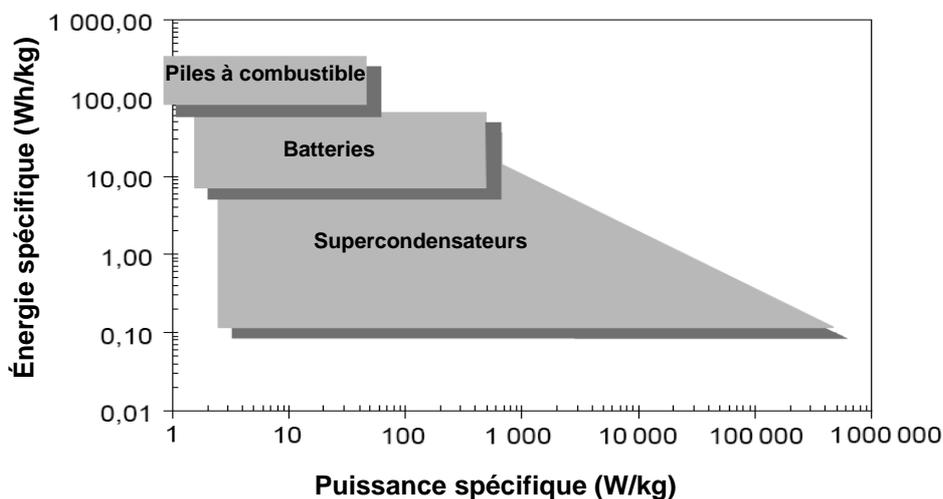


Figure 1-12 : Plan de Ragone /Schneuwly et al. 2002/.

1.5. Dimensionnement et stratégies de commande : état de l'art

1.5.1. Dimensionnement de la source de puissance hybride

Le dimensionnement de la source de puissance (système PAC et source secondaire d'énergie) a un impact essentiel à la fois sur les performances dynamiques du véhicule (agrément de conduite) et sur la consommation d'hydrogène (autonomie du véhicule). C'est un exercice particulièrement difficile qui nécessite plusieurs itérations et qui fait l'objet du chapitre 4 de ce mémoire. Il est évidemment fonction d'un cahier des charges lié à l'application. Les solutions obtenues pour ce cahier des charges peuvent être nombreuses et variées (choix de la source secondaire par exemple). Dans ce cas, pour effectuer un choix, il faut être sûr de disposer d'une stratégie de commande qui exploite au mieux les échanges énergétiques. Le choix des composants et la stratégie de commande sont donc intimement liés pour le dimensionnement. Le dimensionnement doit tenir compte de plusieurs aspects :

➤ Situations de conduite et dimensionnement :

Il n'est pas envisageable de prendre en compte toutes les situations de conduite possibles. Le cahier des charges impose donc des performances minimales pour des conditions de conduites « caractéristiques ». Pour les cas particuliers du roulage à vitesse constante et d'accélération constante du véhicule (figure 1-13) des bornes minimales peuvent être facilement calculées pour l'énergie et la puissance de la source d'énergie secondaire :

- Cas de la vitesse constante du véhicule:

Le véhicule doit pouvoir rouler à une vitesse constante V_{const} pendant une durée prolongée (typiquement sur autoroute pendant plusieurs dizaines de minutes), ce qui équivaut à une demande de puissance constante $P_{vitesse_const}$ de la motorisation. La source de puissance secondaire ayant une quantité d'énergie limitée, elle ne peut assurer une assistance en puissance prolongée au système pile à combustible. Le système PAC doit donc avoir une puissance maximale suffisante $P_{sysPAC_{max}}$ pour assurer le maintien en vitesse du véhicule /Gao 2005/ /Ahluwalia et al 2005/ /Boettner et al. 2001/ /Markel et al. 2003/.

- Cas des accélérations du véhicule :

Les accélérations du véhicule se caractérisent par des pointes de puissance P_{accel} de durée limitée de la motorisation (quelques secondes). Le système PAC n'est pas toujours en mesure d'assurer seul les accélérations du véhicule soit parce que sa dynamique est limitée, soit parce que sa puissance maximale $P_{sysPAC_{max}}$ est limitée. La puissance manquante $P_{accel} - P_{sysPAC_{max}}$ est alors fournie par la source secondaire d'énergie /Markel et al. 2003/ /Ahluwalia et al 2005/. La configuration hybride est d'ailleurs particulièrement intéressante pour pallier la dynamique limite du système PAC /Guezennec et al. 2003/ /Suh et Stefanopoulou 2006/.

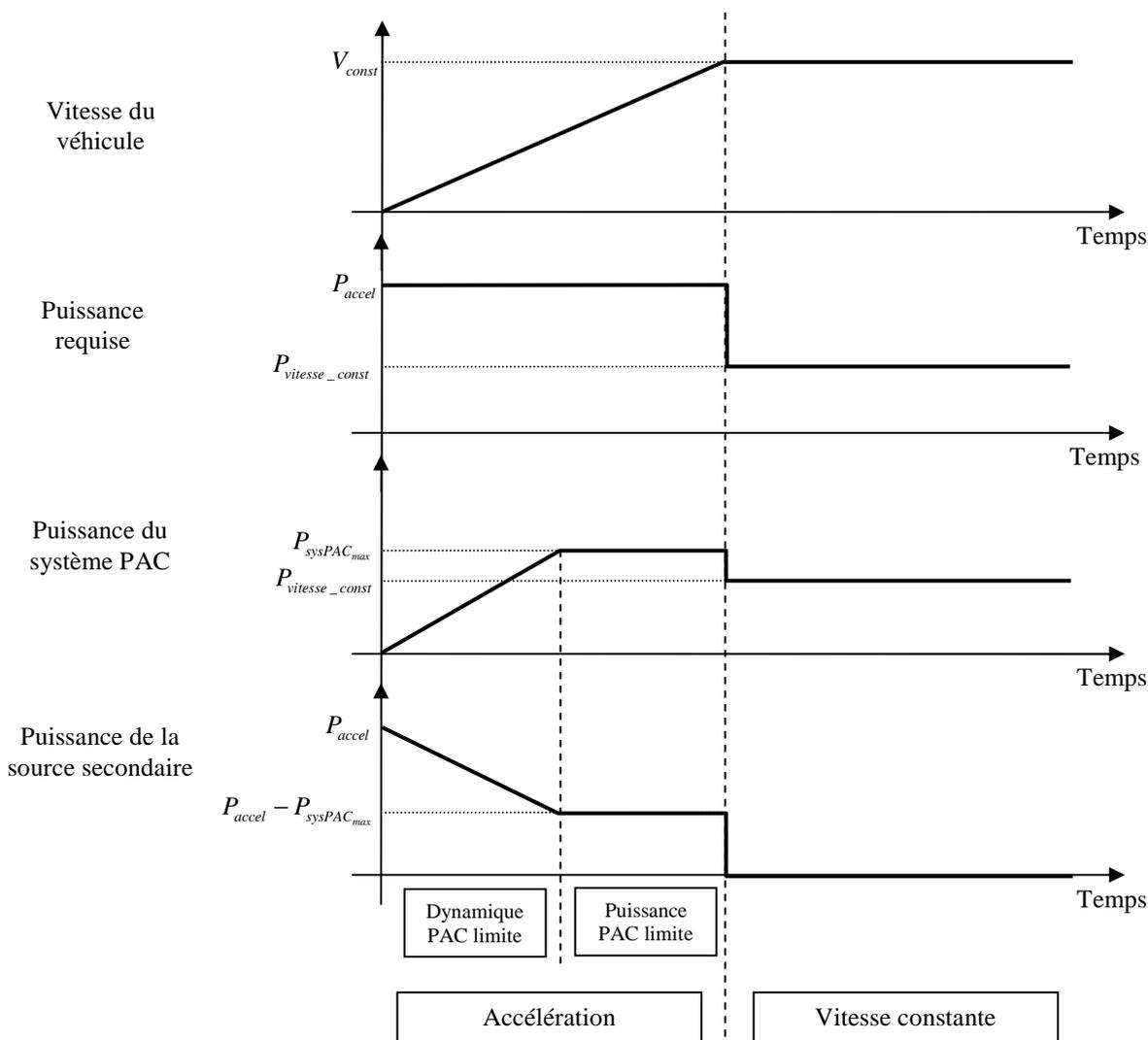


Figure 1-13 : Exemple des puissances mise en jeu en accélération et en maintien de vitesse du véhicule.

➤ **Critères énergétiques et dimensionnement :**

Une part importante d'économie d'hydrogène est obtenue par récupération de l'énergie cinétique /Jeong et Oh 2002/ /Ahluwalia et al 2005/ /Sundström et Stefanopoulou 2006b/. Le dimensionnement de la source secondaire doit donc permettre de récupérer au maximum l'énergie de freinage /Zolot et al 2004/ /Gao 2005/ /Kim et Peng 2007/. Cependant, l'énergie cinétique récupérable et la demande de puissance de la motorisation dépendent de l'utilisation envisagée du véhicule du (urbain, périurbain ou autoroutier, mixte,...). De ce fait, le dimensionnement de la source de puissance est spécifique à une application particulière /Wipke et al. 2001/ /Pede & al 2004/ /Ahluwalia et al 2005/.

➤ **Problème de la masse du véhicule**

La consommation d'hydrogène est influencée par la masse du véhicule. La masse de la source de puissance (système PAC + source secondaire d'énergie) est donc un facteur important dans le processus de dimensionnement /Wipke et al. 2001/ /Sundström et Stefanopoulou 2006a/ /Sundström et Stefanopoulou 2006b/. A la limite, le surpoids introduit peut aller jusqu'à annuler les bénéfices obtenus grâce à la source secondaire.

Du fait du poids supplémentaire introduit par la source secondaire d'énergie ainsi que l'augmentation de la complexité du groupe motopropulseur, il peut être envisagé l'utilisation d'une pile à combustible seule qui dispose naturellement d'un rendement élevé sur une large plage d'utilisation /Friedmann 1999/.

➤ **Énergie vs Puissance : batterie ou supercondensateur ?**

Il est difficile de préconiser l'emploi de batterie ou de supercondensateur, les deux technologies ayant des caractéristiques très différentes. Certains auteurs privilégient l'emploi de supercondensateur /Gao 2005/ /Pede et al. 2004/ en raison de leur efficacité énergétique et de leur puissance spécifique, mais leur faible capacité peut être un handicap. A l'inverse, les batteries sont capables de stocker une grande quantité d'énergie mais sont pénalisées par leur puissance spécifique. Une solution consiste à coupler batteries et supercondensateurs pour cumuler leurs avantages (puissance et énergie) /Schoffield et al 2005/ /Gao 2005/ /Pede et al 2004/, mais ceci augmente inévitablement la complexité et le coût de la source secondaire d'énergie.

En résumé, dans le cadre d'une utilisation automobile, s'il existe un consensus quant à l'intérêt d'un système PAC hybride, le choix de la technologie de la source secondaire reste

ouvert. De plus, il ne semble pas se dégager de tendance chez les constructeurs automobiles visant à utiliser des supercondensateurs ou une technologie précise de batteries (tableau 1-2). Des contraintes de durée de vie /Schoffield et al. 2005/ ou des critères de coût /Wu et al. 2004/ interviennent également dans le processus de dimensionnement.

1.5.2. Stratégies de commande

Comme il a été mentionné plus avant, les solutions obtenues à partir du cahier des charges seul ne peuvent suffire au dimensionnement. Parmi ces solutions, il faut dégager la (ou les) solution(s) qui répond à un critère voulu (consommation, coût, encombrement, ...). Répondre à ce problème d'optimisation nécessite de disposer d'une stratégie de commande qui exploite au mieux les échanges énergétiques.

Cette stratégie doit permettre au groupe motopropulseur de satisfaire la puissance demandée par le conducteur via la pédale d'accélérateur. Connaissant cette consigne, la stratégie de commande répartit la puissance entre le système PAC et la source d'énergie secondaire afin de minimiser un critère, généralement la consommation de carburant.

La source d'énergie secondaire jouant le rôle de « tampon » énergétique (capacité limitée en comparaison de celle disponible dans le réservoir d'hydrogène), un contrôle de son état de charge est indispensable : ni trop faible pour disposer d'une réserve d'énergie suffisante pour assurer par exemple une forte accélération du véhicule, ni trop élevé pour permettre une récupération efficace de l'énergie cinétique.

Les stratégies de commande développées pour les véhicules hybrides « traditionnels » (avec moteur à combustion interne et motorisation électrique) peuvent être adaptées à un véhicule hybride à pile à combustible. Les stratégies de commandes peuvent être classées dans 2 catégories :

➤ **Optimisation globale :**

Lorsque le parcours du véhicule est connu a priori, il est possible d'obtenir, sous certaines hypothèses, la consommation minimale d'hydrogène et la séquence de commande à appliquer au groupe motopropulseur. Ces approches sont évidemment limitées à la simulation (en temps réel le trajet du véhicule est inconnu a priori). Ces approches sont très importantes, car elles permettent de fournir :

- une « expertise » sur les commandes idéales à appliquer au groupe motopropulseur ;
- une borne de consommation minimale servant de référence pour l'évaluation des stratégies temps réel.

Des algorithmes basés sur la théorie des graphes /Scordia 2004/ ou sur la commande optimale /Delprat 2002/ permettent de résoudre ces problèmes d'optimisation globale à partir de modèles énergétiques.

➤ **Stratégie temps réel :**

En temps réel, le trajet du véhicule est, au moins partiellement, inconnu, les stratégies de commande proposées sont alors nécessairement sous-optimales. Le paramétrage des algorithmes est généralement empirique. Parmi les stratégies temps réel existantes, on peut citer :

- Stratégies basées sur l'évolution de l'état de charge /Candusso 2002/ /Boettner et al. 2001/ :

Dans ce type de stratégies, la répartition de puissance est principalement fonction de l'état de charge de la source secondaire d'énergie. Les régulateurs employés sont alors de type relais ou proportionnel (figure 1-14).

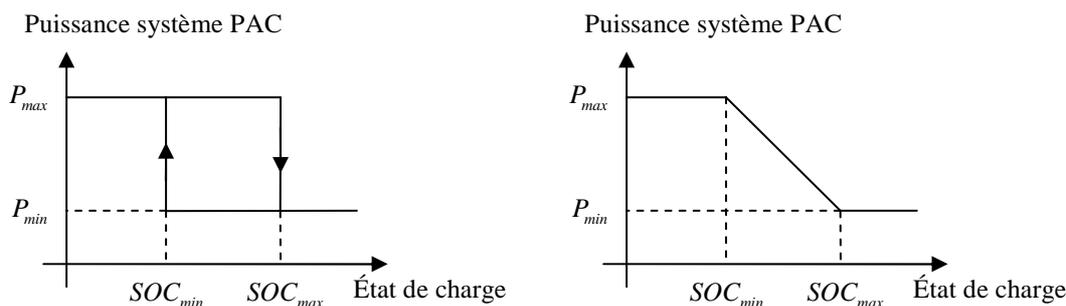


Figure 1-14 : Stratégies de commande thermostatique et proportionnelle.

- Stratégies basées sur la logique floue /Jeong et al. 2005/ :

La répartition de puissance entre le système PAC et la source secondaire d'énergie est assurée par un régulateur flou à base de règles /Sugeno 1985/. La puissance délivrée par le système PAC est fonction de l'état de charge de la source secondaire et de la

demande puissance de la motorisation. L'état de charge et de la demande de puissance et de la puissance PAC sont fuzzyfiées en utilisant des fonctions d'appartenances. La régulation de l'état de charge se fait de manière empirique via le paramétrage de la base de règles floues.

Les avantages de ce type d'algorithme sont la facilité, la simplicité et la rapidité de mise en œuvre. Les principaux inconvénients sont qu'ils ne reposent que sur la connaissance de l'expert qui a conçu la base de règles et ne qu'ils ne sont valables que dans le domaine de cette expertise.

- ECMS (Equivalent Consumption Minimization Strategy) /Paganelli et al. 2002/ /Rodatz et al. 2003/ :

Des stratégies reposent sur une analyse des échanges énergétiques au sein du groupe motopropulseur. Dans ECMS, une consommation d'hydrogène équivalente est associée à la puissance électrique fournie par la source secondaire d'énergie via l'utilisation d'un facteur d'équivalence. La consommation d'hydrogène de la source de puissance est alors la somme de la consommation réelle de la PAC et de la consommation équivalente de la source secondaire d'énergie. La répartition de puissance choisie est celle qui minimise localement la consommation totale d'hydrogène. Pour garantir un contrôle de l'état de charge, une fonction de sensibilité permet d'ajuster la valeur du facteur d'équivalence. Ce réglage reste empirique.

- Exploitation temps réel des algorithmes d'optimisation globale :

Il est possible d'envisager pour une utilisation en temps réel les algorithmes d'optimisation en relâchant certaines hypothèses et en particulier la connaissance a priori du parcours du véhicule. Les caractéristiques du trajet futur peuvent alors être estimées à partir d'observations passées /Schell et al 2005/ /Lin et al. 2006/. De manière évidente, les résultats obtenus ne sont plus optimaux pour le parcours complet.

Une autre possibilité consiste à exploiter « l'expertise » fournie par les algorithmes d'optimisation globale pour concevoir des régulateurs par apprentissage. Les réseaux de neurones, de par leurs capacités d'approximation, peuvent être utilisés dans ce contexte /Scordia 2004/. Les régulateurs obtenus n'ayant pas de capacité d'extrapolation, il est nécessaire que la base d'apprentissage recouvre l'ensemble des situations rencontrées en temps réel.

1.6. Conclusion

Ce premier chapitre a introduit l'utilisation de la pile à combustible dans un environnement automobile. La pile à combustible de type PEM (« Proton Exchange Membrane »), dont l'utilisation est privilégiée dans le secteur des transports, a été présentée en détail. Face aux contraintes de fonctionnement des systèmes pile à combustible, l'utilisation d'une source secondaire d'énergie au sein du groupe motopropulseur à PAC a été justifiée. Cette source secondaire d'énergie offre des opportunités d'optimisation dans le dimensionnement des composants et dans l'élaboration de stratégies de commande. Afin d'étudier ces deux aspects, un modèle de véhicule à PAC hybride a été développé et est présenté dans le prochain chapitre.

Chapitre 2. Modélisation d'un véhicule hybride à pile à combustible

2.1. INTRODUCTION	42
2.2. PRINCIPE DE MODÉLISATION	42
2.3. LE SYSTÈME PILE À COMBUSTIBLE	43
2.3.1. Cellule élémentaire	44
2.3.2. Les composants auxiliaires	45
2.3.3. Consommation et rendement d'un système pile à combustible	48
2.3.4. Mise à l'échelle du système PAC	50
2.4. LA BATTERIE	51
2.5. LES SUPERCONDENSATEURS	54
2.6. LE VÉHICULE ET SON GROUPE MOTOPROPULSEUR	56
2.6.1. Le véhicule	57
2.6.2. Les roues	58
2.6.3. Le réducteur et la transmission	59
2.6.4. La machine électrique	60
2.7. LES CONVERTISSEURS DE PUISSANCE	61
2.7.1. Modèle générique d'un convertisseur de puissance	61
2.7.2. Architecture électrique du véhicule	63
2.8. MODÈLE DE SIMULATION	66
2.9. CONCLUSION	71

2.1. Introduction

Ce chapitre présente les modèles utilisés pour la simulation de véhicules hybrides à pile à combustible. Ces modèles serviront à l'élaboration des stratégies de commande présentées dans le chapitre 3.

Modéliser consiste toujours à « trahir la réalité ». Dans le cas de la PAC, on peut aller de modèles décrivant les phénomènes électrochimiques /Benbouzid et al. 2004/ à des modèles purement énergétiques /Boettner et al. 2002/. Entre les deux on trouve des modèles avec des niveaux de granularité variés.

Les modèles de granularité fine de PAC, de batteries et de supercondensateurs utilisent des équations de la chimie et de la physique /You and Liu 2006/ /Newman et al. 2003/. Les temps de calcul étant généralement très longs, ces modèles servent essentiellement à la compréhension des phénomènes physiques et à l'analyse du dimensionnement structurel des composants /Berning et Djilali 2003/ sur des durées de simulations très courtes.

Dans notre cas, l'estimation de la consommation de carburant est la donnée essentielle. Ce sont donc principalement des modèles quasi-statiques qui seront utilisés /Sciarretta et Guzzella 2007/. Cela revient à dire que les dynamiques considérées rapides sont négligées ; le modèle du véhicule obtenu est dit « énergétique ». En conclusion, seules les dynamiques du véhicule et de la source secondaire d'énergie sont prises en compte.

2.2. Principe de modélisation

Sur la base de modèles existants dans la littérature, un modèle de véhicule PAC hybride a été réalisé sous l'environnement logiciel MATLAB/Simulink. Le modèle complet du véhicule est composé d'un ensemble de sous-modèles relatifs aux différents organes du groupe motopropulseur et à la dynamique du véhicule. Les sous-modèles sont basés sur l'expression des flux énergétiques (figure 2-1) /Paganelli 1999/. A titre d'exemple, un moteur électrique permet de convertir une puissance électrique (courant et tension) en puissance mécanique (vitesse de rotation et couple).

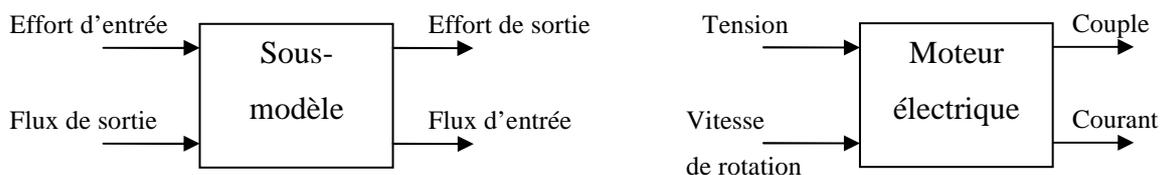


Figure 2-1 : Structure des sous-modèles (gauche) et exemple du moteur électrique (droite)

De manière évidente, les générateurs d'effort (batterie, pile à combustible) ou les récepteurs d'effort (véhicule) ne nécessitent qu'un seul signal en entrée et un seul signal en sortie, figure 2-2.

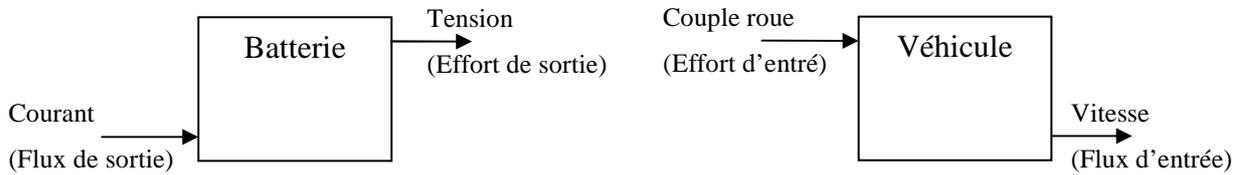


Figure 2-2 : Exemples de modèles à flux unique (batterie, à gauche, et véhicule, à droite)

2.3. Le système pile à combustible

On rappelle que les auxiliaires consomment une partie de la puissance électrique brute produite pour leur propre fonctionnement; ils induisent donc des pertes de puissance qui affectent le rendement du système pile à combustible.

Les relations du modèle sont dans un premier temps exprimées en fonction de la densité de courant i_{PAC} (A/cm²) pour une seule cellule ($N_{cell} = 1$). De ce fait, les puissances et les consommations des réactifs (oxygène et hydrogène) sont calculées par unité de surface de membrane d'une cellule A_{cell} (cm²), et se réfèrent donc à des densités (densité de puissance, densité de consommation). Ceci permet une mise à l'échelle aisée afin de simuler des systèmes pile à combustible de différentes puissances.

Les caractéristiques électriques d'un système pile à combustible dépendant des conditions d'utilisation (pression, température...), les conditions de fonctionnement retenues pour la simulation du modèle sont récapitulées dans le tableau 2-1.

Densité de courant maximale	$i_{PAC_{max}} = 1 A / cm^2$
Pression de fonctionnement	2 atm
Température de fonctionnement	80 °C
Humidité de la membrane	100%
Stoechiométrie de l'air	$\lambda_{air} = 2$
Consommation des auxiliaires	$p_{aux} = 1,05 \cdot p_{cmp}$, avec p_{cmp} la puissance du compresseur

Tableau 2-1 : Conditions de fonctionnement du système pile à combustible.

2.3.1. Cellule élémentaire

La caractéristique électrique d'une cellule est donnée par sa courbe de polarisation liant la tension de la cellule V_{cell} à sa densité de courant i_{PAC} :

$$V_{cell}(i_{PAC}) = E_{cell} - V_{act}(i_{PAC}) - V_{ohm}(i_{PAC}) - V_{conc}(i_{PAC}) \quad (2.1)$$

La tension à vide d'une cellule (E_{cell}) ainsi que les chutes de tensions (d'activation V_{act} , ohmique V_{ohm} et de concentration V_{conc}) sont calculées pour des conditions de fonctionnement données et dépendent des pressions des gaz réactifs, de la température de la pile à combustible, de l'humidité relative des gaz et du taux d'humidité de la membrane. Les modèles statiques des tensions combinent des équations physiques et empiriques /Pukrushpan et al. 2004/ (ANNEXE 1). La courbe de polarisation $V_{cell}(i_{PAC})$ et la densité de puissance brute p_{PAC} de la figure 2-3 ont été calculées pour les conditions de fonctionnement résumées dans le tableau 2-1. La densité de puissance brute p_{PAC} (W/cm²) correspond à :

$$p_{PAC}(i_{PAC}) = V_{cell}(i_{PAC}) \cdot i_{PAC} \quad (2.2)$$

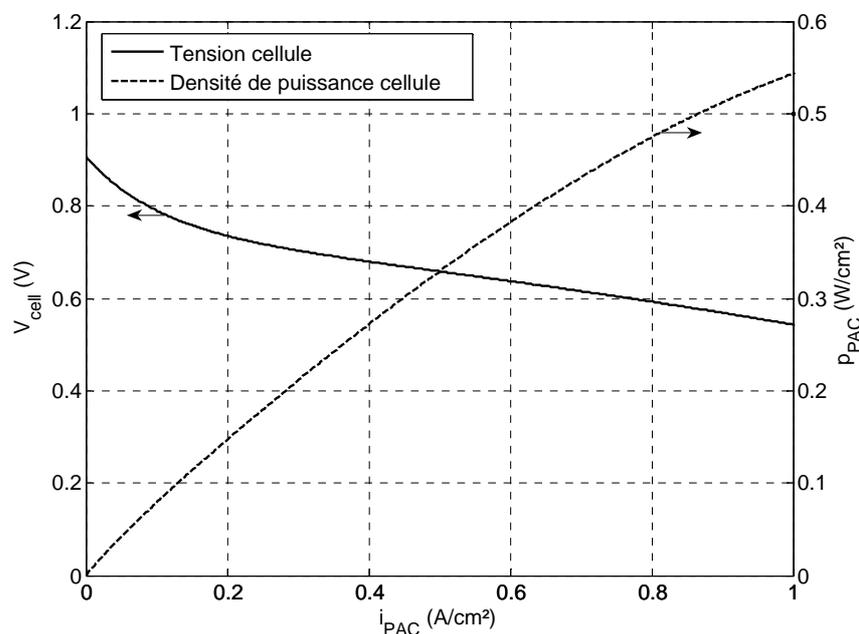


Figure 2-3 : Courbe de polarisation et puissance brute d'une cellule (température de 80°C, pression de 2 atm, 100% d'humidité dans la membrane).

2.3.2. Les composants auxiliaires

La consommation électrique des auxiliaires réduit la puissance disponible en sortie du système pile à combustible. La densité de puissance nette du système pile à combustible p_{sysPAC} est fonction de la densité de puissance brute p_{PAC} et de la consommation des auxiliaires p_{aux} :

$$p_{sysPAC}(i_{PAC}) = p_{PAC}(i_{PAC}) - p_{aux}(i_{PAC}) \quad (2.3)$$

La consommation des auxiliaires p_{aux} dans (2.3) est la somme des puissances consommées par un ensemble de petit matériels (électrovannes, pompes, capteurs, électronique de commande ...). Il est donc difficile d'obtenir un modèle générique complet d'autant plus qu'il existe un grand nombre d'actionneurs différents pouvant remplir les mêmes fonctions au sein du système. La consommation des auxiliaires est donc estimée de manière globale et la densité de puissance p_{aux} peut être obtenue de différentes façons :

- Si le système PAC réel est disponible, la cartographie $p_{aux}(i_{PAC})$ peut être obtenue par mesures sur banc d'essai.
- La consommation p_{aux} peut être considérée comme une fonction linéaire, voire polynomiale, du courant i_{PAC} ou de la puissance brute p_{PAC} , par exemple :

$$p_{aux}(i_{PAC}) = a_1 \cdot i_{PAC} + a_0 \quad \text{/Guzzella et Amstutz 1999/} \quad (2.4)$$

$$p_{aux}(p_{PAC}) = a_2 \cdot p_{PAC}^2 + a_1 \cdot p_{PAC} + a_0 \quad \text{/Mierlo et al. 2003/} \quad (2.5)$$

Les paramètres a_0 , a_1 , ... peuvent être obtenus par régression sur des données réelles ou en fonction de performances souhaitées ;

- Dans le cas d'une pile à combustible pressurisée et alimentée en air, le compresseur d'air est le principal consommateur d'énergie /Guezennec et al. 2003/ et peut être considéré seul pour l'estimation de p_{aux} /Kim et Peng 2007/.

Parmi les solutions possibles de modélisation citées ci-dessus, la dernière a été retenue. La consommation énergétique du compresseur est considérée comme prédominante ; la puissance

du compresseur p_{cmp} est augmentée d'un facteur $k_{aux} > 1$ pour tenir compte de l'ensemble des auxiliaires :

$$p_{aux}(i_{PAC}) = k_{aux} \cdot p_{cmp}(i_{PAC}) \quad (2.6)$$

La densité de puissance p_{cmp} du compresseur est exprimée par /Boettner et al. 2002/ :

$$p_{cmp}(\dot{m}_{air}^s(i_{PAC}), r_{cmp}) = \frac{\dot{m}_{air}^s(i_{PAC}) \cdot C_{p_{air}} \cdot T_{amb}}{\eta_{cmp}(\dot{m}_{air}^s(i_{PAC}), r_{cmp})} \cdot \left(r_{cmp}^{\left(\frac{k_{air}-1}{k_{air}}\right)} - 1 \right) \quad (2.7)$$

avec $C_{p_{air}}$ la chaleur spécifique de l'air (J/kg/K), T_{amb} la température ambiante (K), r_{cmp} le rapport de compression, η_{cmp} le rendement du groupe moto-compresseur et k_{air} le coefficient adiabatique de l'air.

Le débit d'air \dot{m}_{air}^s (g/s/cm²) dépend de la quantité d'oxygène $\dot{m}_{O_2}^s$ (g/s/cm²) consommée par la pile à combustible et du coefficient stœchiométrique λ_{air} . Le coefficient stœchiométrique correspond à un excès d'air fourni pour éviter l'asphyxie de la pile à combustible (manque de réactifs). En supposant que l'air est composé à 21 % d'oxygène, le débit d'air \dot{m}_{air}^s est donné par :

$$\dot{m}_{O_2}^s(i_{PAC}) = \lambda_{air} \cdot \frac{\dot{m}_{O_2}^s(i_{PAC})}{0,21} \quad (2.8)$$

La quantité d'oxygène consommée $\dot{m}_{O_2}^s$ est proportionnelle à la densité de courant débité par la pile à combustible i_{PAC} :

$$\dot{m}_{O_2}^s(i_{PAC}) = \frac{1}{2} \cdot \frac{i_{PAC} \cdot M_{O_2}}{n_{e^-} \cdot F} \quad (2.9)$$

avec M_{O_2} la masse molaire de l'oxygène (g/mol), F la constante de Faraday (C) et $n_{e^-} = 2$.

Le rendement du compresseur η_{cmp} de l'équation (2.7) est fonction du débit d'air instantané \dot{m}_{air}^s et du rapport de compression r_{cmp} . Ces données sont mesurées expérimentalement. Une courbe de rendement moyenne basée sur un compresseur pour pile à combustible (Vairex VV-7525, /Vairex/) est considérée. Afin de pouvoir prendre en compte différentes tailles de pile à

combustible, le rendement du groupe moto-compresseur est exprimé en fonction du débit d'air normalisé (figure 2-4).

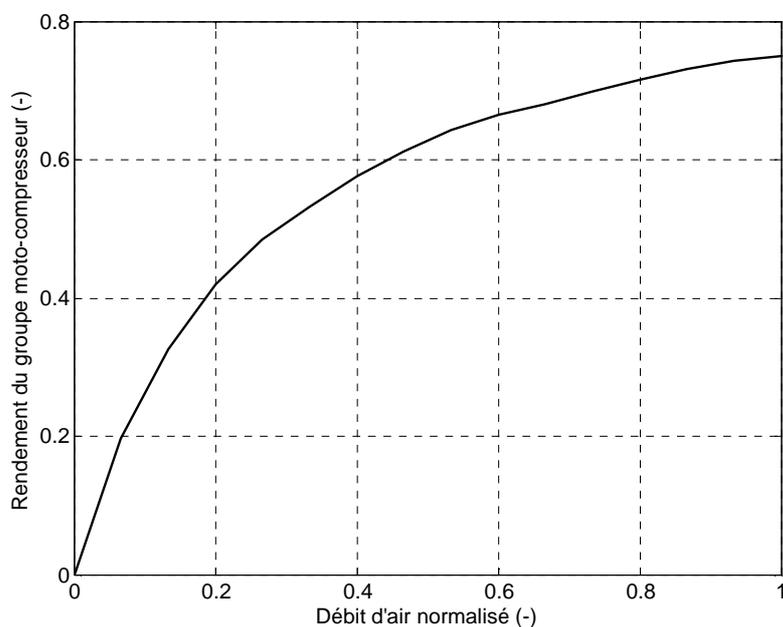


Figure 2-4 : Rendement du groupe moto-compresseur en fonction du débit d'air normalisé.

La figure 2-5 présente les densités de puissances brute et nette de la pile à combustible et la puissance consommée par les auxiliaires en considérant les conditions de fonctionnement du tableau 2-1.

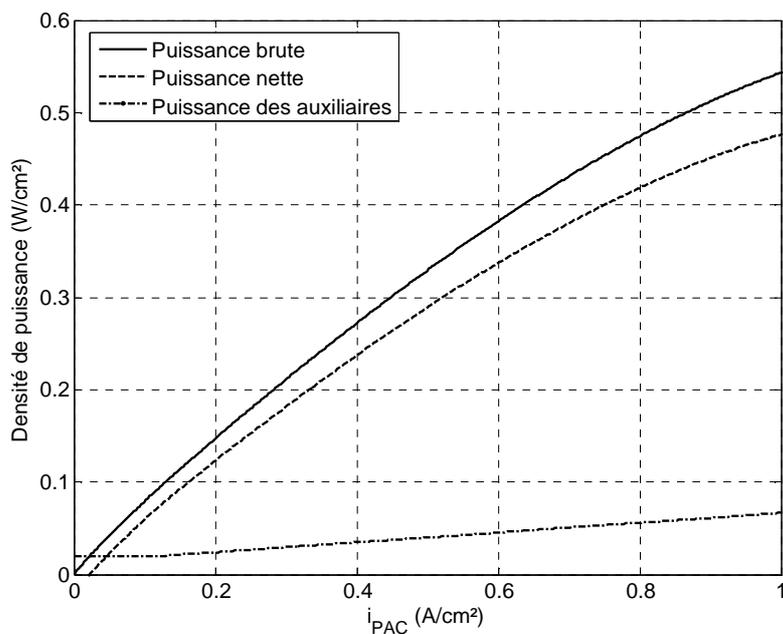


Figure 2-5 : Puissance brute et nette d'une cellule et consommation des auxiliaires.

2.3.3. Consommation et rendement d'un système pile à combustible

La consommation instantanée d'hydrogène $\dot{m}_{H_2}^s$ (g/s/cm²) est proportionnelle à la densité de courant i_{PAC} :

$$\dot{m}_{H_2}^s(i_{PAC}) = \frac{i_{PAC} \cdot M_{H_2}}{n_{e^-} \cdot F} \quad (2.10)$$

avec M_{H_2} la masse molaire de l'hydrogène (g/mol), F la constante de Faraday (C) et $n_{e^-} = 2$.

La densité de puissance utile issue de l'hydrogène p_{H_2} est fonction de la consommation instantanée d'hydrogène $\dot{m}_{H_2}^s$:

$$p_{H_2}(i_{PAC}) = \dot{m}_{H_2}^s(i_{PAC}) \cdot PCI_{H_2} \quad (2.11)$$

avec PCI_{H_2} le pouvoir calorifique inférieur de l'hydrogène (J/kg).

Le rendement de la pile à combustible η_{PAC} et le rendement du système pile à combustible η_{sysPAC} s'obtiennent en considérant la densité puissance brute p_{PAC} et nette p_{sysPAC} (2.2) et la puissance issue de l'hydrogène p_{H_2} (2.11) :

$$\eta_{sysPAC}(i_{PAC}) = \frac{p_{PAC}(i_{PAC})}{p_{H_2}(i_{PAC})} \quad (2.12)$$

$$\eta_{sysPAC}(i_{PAC}) = \frac{p_{sysPAC}(i_{PAC})}{p_{H_2}(i_{PAC})} \quad (2.13)$$

Les équations de rendements (2.12) et (2.13) sont exprimées en fonction de la densité de courant i_{PAC} . Il est toutefois possible d'exprimer les courbes de rendement en fonction de la puissance nette du système p_{sysPAC} (figure 2-5) en utilisant la relation (2.2). Avec les hypothèses retenues (tableau 2-1), la densité de puissance nette maximale est de 477 mW/cm² et le rendement maximal du système est de 50% pour 23% de la densité de puissance maximale du système PAC (figure 2-6).

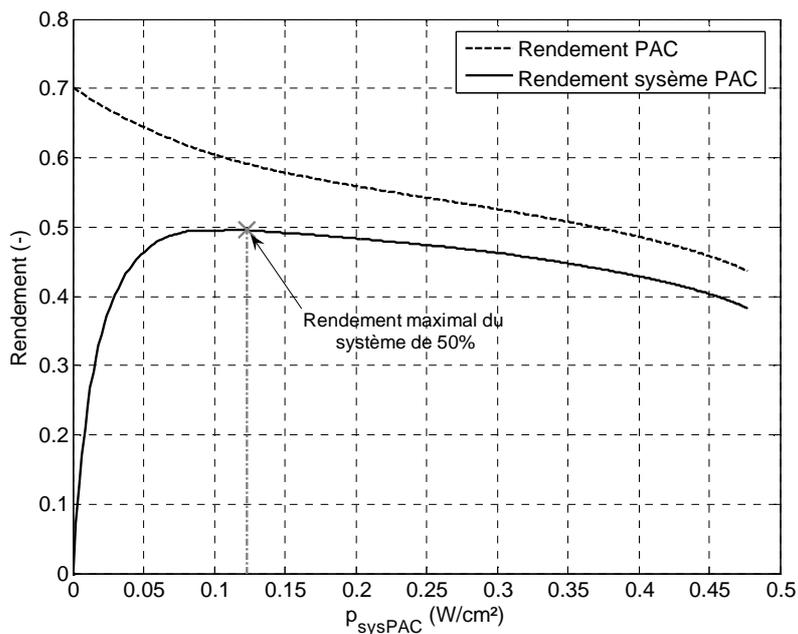


Figure 2-6 : Courbes de rendement de la pile à combustible et du système.

De même, la consommation instantanée d'hydrogène $\dot{m}_{H_2}^s$ (2.10) peut être exprimée en fonction de la densité de puissance nette p_{sysPAC} (figure 2-7). Cette cartographie est très importante car elle sert à l'élaboration de stratégies de commande visant à minimiser la consommation d'hydrogène du véhicule.

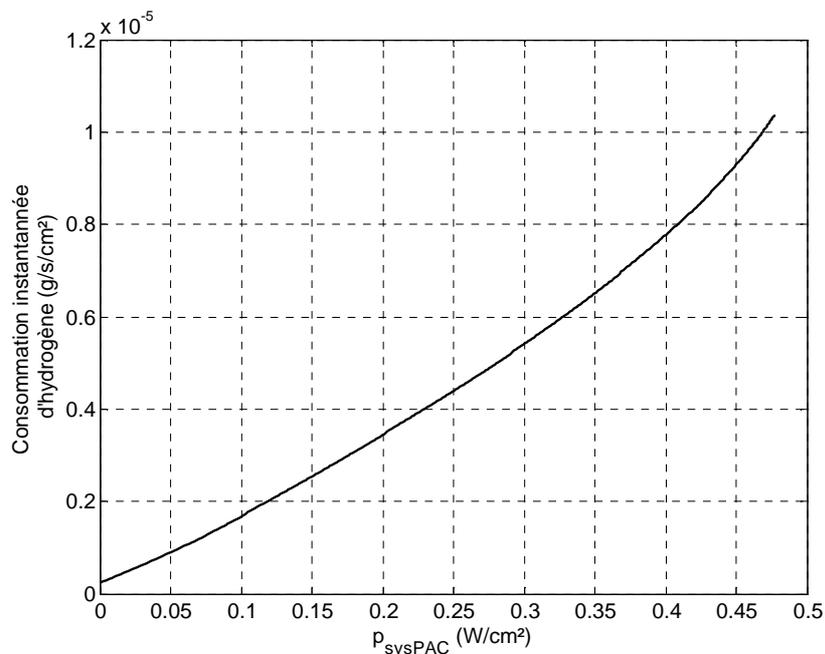


Figure 2-7 : Consommation instantanée d'hydrogène.

2.3.4. Mise à l'échelle du système PAC

Les équations (2.1) à (2.13) sont exprimées en fonction de la densité de courant i_{PAC} pour une cellule élémentaire. Une mise à l'échelle est nécessaire pour obtenir les caractéristiques souhaitées d'une pile à combustible. Les deux paramètres utilisés pour la mise à l'échelle sont la surface active de la membrane d'une cellule A_{cell} et le nombre de cellules de la pile à combustible N_{cell} . La surface active A_{cell} permet d'ajuster le courant débité par la pile :

$$I_{PAC} = A_{cell} \cdot i_{PAC} \quad (2.14)$$

Le nombre de cellules N_{cell} permet d'ajuster la tension de la pile à combustible. Les cellules sont connectées en série d'un point de vue électrique. En faisant l'hypothèse que toutes les cellules ont un comportement électrique identique, la tension totale de la pile à combustible V_{PAC} est donnée par :

$$U_{PAC}(i_{PAC}) = N_{cell} \cdot V_{cell}(i_{PAC}) \quad (2.15)$$

De la même façon, les densités de puissance et la consommation des réactifs sont mises à l'échelle selon la surface de la membrane et le nombre de cellules. Dans la suite de ce mémoire, la surface active des cellules est fixée à $A_{cell} = 200 \text{ cm}^2$. La puissance maximale du système pile à combustible est ajustée en modifiant le nombre de cellules N_{cell} . Par exemple, avec les hypothèses retenues (tableau 2-1), la densité de puissance maximale du système est de 477 mW/cm^2 (figure 2-5). Pour obtenir un système PAC de 40 kW, 420 cellules de 200 cm^2 sont nécessaires. Pour des raisons pratiques, ces 420 cellules peuvent être réparties entre plusieurs piles à combustibles (par exemple, 4 piles à combustible de 105 cellules chacune). A titre d'illustration, dans /Dietrich et al. 2003/ le système de 48 kW de puissance brute est composé de 6 piles à combustible de 8 kW chacune.

L'estimation de la masse du système PAC en fonction de la puissance nominale $P_{sysPAC_{max}}$ retenue est évidemment une donnée importante. Pour une densité massique d_{sysPAC} , la masse du système est :

$$M_{sysPAC} = P_{sysPAC_{max}} \cdot d_{sysPAC} \quad (2.16)$$

Le tableau 2-2 récapitule les caractéristiques principales du système PAC obtenues avec la modélisation proposée et les conditions de fonctionnement retenues (tableau 2-1).

Densité de courant maximale	$i_{PAC_{max}} = 1 A / cm^2$
Surface active d'une membrane	$A_{cell} = 200 cm^2$
Densité de puissance brute maximale	$p_{PAC_{max}} = 544 mW / cm^2$
Densité de puissance nette maximale	$p_{sysPAC_{max}} = 477 mW / cm^2$
Masse du système PAC	$d_{sysPAC} = 3 kg / kW$
Rendement maximal du système	50% à 23% de la puissance maximale

Tableau 2-2 : Caractéristiques du système PAC.

2.4. La batterie

Les phénomènes électrochimiques complexes intervenant dans une batterie rendent leur modélisation délicate. Des modèles détaillés existent /Newman et al. 2003/ et considèrent par exemple la concentration des réactifs ou encore l'influence de la température. Ces modèles très détaillés sont difficilement exploitables dans le contexte énergétique qui nous intéresse ici. D'autres types de modèles basés sur des schémas électriques équivalents (à base de générateurs de tension idéaux, de résistances, de condensateurs...) permettent de rendre compte plus ou moins fidèlement du comportement électrique de la batterie /Dürr et al. 2006/. Des modèles basés sur les systèmes d'ordre fractionnaire existe également /Sabatier et al. 2006/.

Le schéma électrique équivalent retenu ici est présenté à la figure 2-8. Il est composé d'un générateur de tension et d'une résistance en série /Johnson 2002/ /Mierlo et al. 2003/. La tension à vide E_{batt} et la résistance interne en charge et en décharge de la batterie R_{batt} dépendent de l'état de charge SOC (« State Of Charge »).

L'état de charge SOC (State Of Charge) est estimé par intégration du courant :

$$C_{batt}(t) = C_{batt}(0) - \int_0^t \eta_f(SOC(u), sign(I_{batt}(u))) \cdot I_{batt}(u) \cdot du \quad (2.17)$$

$$SOC(t) = \frac{C_{batt}(t)}{C_{batt_{max}}} \quad (2.18)$$

Par convention, un courant batterie positif contribue à la décharge de celle-ci, et un courant négatif contribue à sa recharge. Le rendement faradique η_f dans (2.17) traduit la quantité réelle de courant participant à la charge et à la décharge de la batterie.

On admet ici que le rendement faradique vaut 1 en décharge ; en charge, ce rendement est inférieur à 1 et peut être considéré comme dépendant de l'état de charge /Paganelli 1999/.

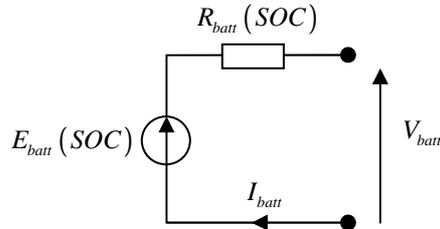


Figure 2-8 : Schéma électrique équivalent d'un élément de batterie.

La tension de la batterie V_{batt} dépend de son état de charge SOC et du courant I_{batt} qui la traverse :

$$V_{batt}(SOC, I_{batt}) = E_{batt}(SOC) - R_{batt}(SOC, \text{sign}(I_{batt})) \cdot I_{batt} \quad (2.19)$$

avec

$$R_{batt}(SOC, \text{sign}(I_{batt})) = \begin{cases} R_{charge}(SOC) & \text{si } I_{batt} \leq 0 \quad (\text{Résistance en charge}) \\ R_{decharge}(SOC) & \text{si } I_{batt} > 0 \quad (\text{Résistance en décharge}) \end{cases} \quad (2.20)$$

L'équation (2.19) fournit la tension d'un élément de batterie. Pour un pack de batteries composé de N_{batt} éléments connectés en série, la tension totale est :

$$U_{batt}(SOC, I_{batt}) = V_{batt}(SOC, I_{batt}) \cdot N_{batt} \quad (2.21)$$

Dans le cadre des simulations réalisées, des batteries de type Ni-MH ont été retenues car il s'agit actuellement de la technologie la plus mature et la plus répandue dans le cadre d'utilisation aux véhicules électriques et hybrides /Beretta et Porcelatto 2003/ /Spotnitz 2005/. Les cartographies de tension à vide E_{batt} (figure 2-9) et de résistance interne R_{batt} (figure 2-10) sont issues du logiciel Advisor /Advisor/ et correspondent à une cellule Ni-MH Ovonic de capacité nominale $C_{batt_{max}} = 28 Ah$, de rendement faradique moyen $\eta_f = 0,95$ et de masse $M_{batt} = 0,72 kg$. Le courant en charge et en décharge est limité à 250 A.

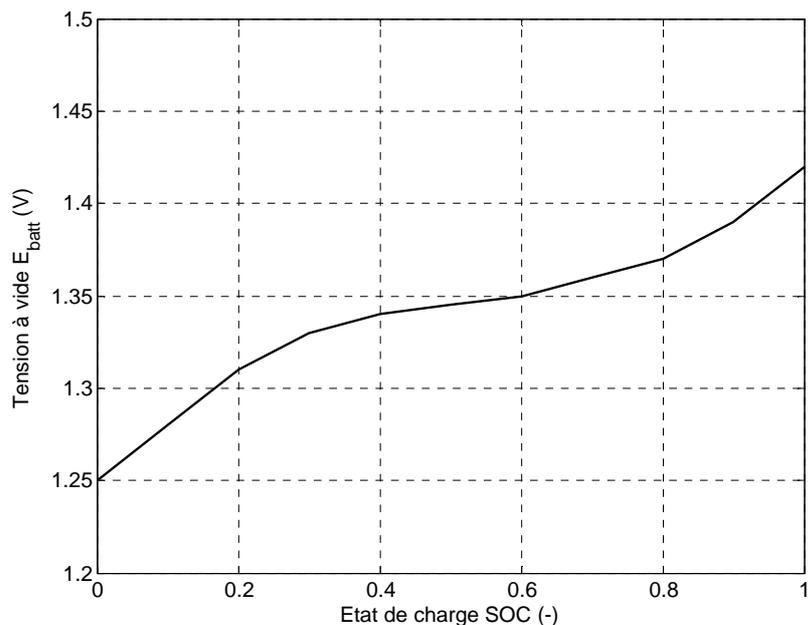


Figure 2-9 : Tension à vide d'un élément de batterie.

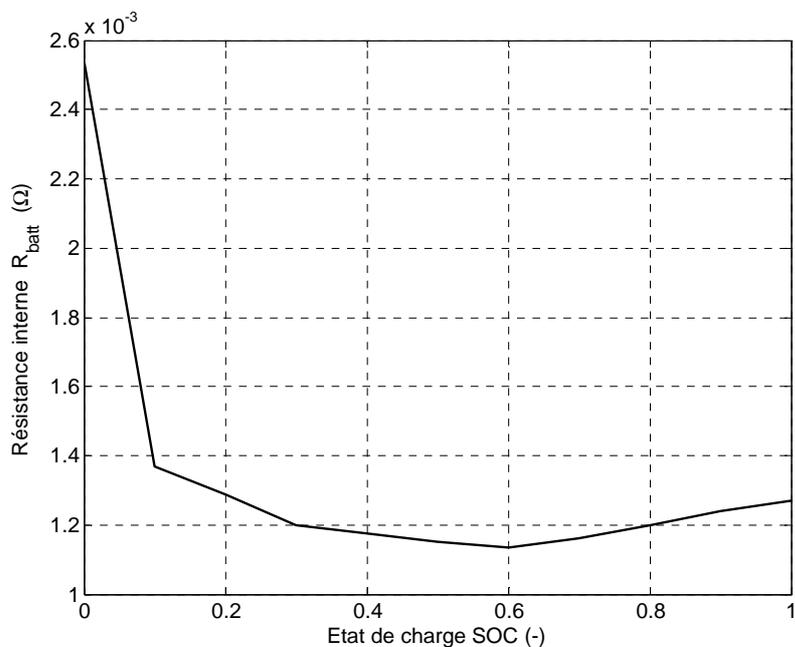


Figure 2-10 : Résistance interne d'un élément de batterie.

En fonction du taux d'hybridation voulu pour les véhicules hybrides (« small hybrid » de type alterno-démarrreur à « full hybrid »), des utilisations différentes de la batterie sont à considérer. Par exemple, lorsque le véhicule dispose d'une batterie de grande capacité (« full hybrid »), la stratégie de commande peut favoriser une décharge importante des batteries (on parle alors de stratégies à « charge depleting »). Pour des applications de type « small ou mild hybrid » la capacité des batteries est généralement limitée. Les batteries sont alors considérées comme des tampons énergétiques. Dans ce cas, leur état de charge doit rester sensiblement constant autour d'une valeur donnée (stratégies à « charge sustaining »).

Dans la suite de nos travaux, c'est plutôt le deuxième cas qui sera considéré (stratégies à « charge sustaining »). Dans ce cas, il est évidemment capital de savoir, en fonction de la technologie de batterie utilisée, la plage d'état de charge présentant le meilleur compromis entre puissance disponible, rendement et durée de vie. Dans le cas de batteries Ni-MH, les consignes d'état de charge retenues dans la littérature se situent entre 50 % et 70 % /Pisu et Rizzoni 2005/ /Serrao et al. 2005/ /He et Yang 2006/ /Kuhn et al. 2004/. Un état de charge moyen visé de 60 % a donc été retenu mais, dans le cadre d'une application réelle, l'utilisation possible et souhaitable des batteries doit être déterminée avec le constructeur.

2.5. Les supercondensateurs

Le modèle des supercondensateurs est issu de /Barrade et Rufer 2004/ et se compose d'un condensateur idéal connecté en série avec une résistance (Figure 2-11). Un modèle similaire est proposé dans /Mierlo et al. 2003/. Les valeurs de la capacité du condensateur C_{SC} et de la résistance R_{SC} interne sont supposées constantes. La tension à vide E_{SC} du supercondensateur est l'image de son état de charge SOC . Des modèles avec plusieurs « branches RC » et des valeurs de capacité fonction de la tension du supercondensateur sont aussi proposés dans la littérature /Marie-Francoise et al. 2005/. Néanmoins, la précision supplémentaire apportée étant faible, leur utilisation n'est pas justifiée dans notre cas.

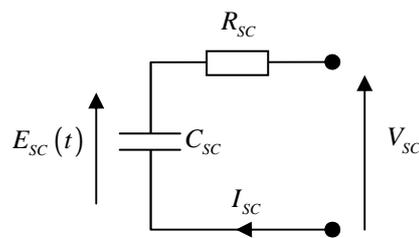


Figure 2-11 : Schéma électrique équivalent d'un supercondensateur.

La tension aux bornes d'un supercondensateur est donnée par :

$$V_{SC}(E_{SC}, I_{SC}) = E_{SC} - R_{SC} \cdot I_{SC} \quad (2.22)$$

Comme la batterie, le condensateur se comporte comme un intégrateur de courant. La tension à vide E_{SC} est calculée de la manière suivante :

$$E_{SC}(t) = E_{SC}(0) - \frac{1}{C_{SC}} \cdot \int_0^t I_{SC}(u) \cdot du \quad (2.23)$$

L'énergie contenue dans le supercondensateur X_{SC} est fonction de sa tension à vide E_{SC} . De ce fait, l'énergie maximale $X_{SC_{max}}$ est obtenue pour la tension à vide maximale $E_{SC_{max}}$:

$$X_{SC}(E_{SC}) = \frac{1}{2} \cdot C_{SC} \cdot E_{SC}^2 \quad (2.24)$$

Par définition, l'état de charge SOC correspond au rapport entre l'énergie contenue dans le supercondensateur et l'énergie maximale admissible :

$$SOC(t) = \frac{X_{SC}(t)}{X_{SC_{max}}} \quad (2.25)$$

Nb : Dans le cadre d'une application réelle, la tension à vide E_{SC} étant mesurable de manière fiable, il est relativement simple d'estimer $SOC(t)$ à partir de (2.24).

Les constructeurs préconisent généralement d'utiliser les supercondensateurs sur la moitié de leur plage de tension (entre $E_{SC_{max}}/2$ et $E_{SC_{max}}$), ce qui correspond à une utilisation de 75 % de l'énergie totale :

$$\Delta SOC_{max} = \frac{X_{SC_{max}} - X_{SC}\left(\frac{E_{SC_{max}}}{2}\right)}{X_{SC_{max}}} = \frac{X_{SC_{max}} - \frac{1}{2} \cdot C_{SC} \cdot \frac{E_{SC_{max}}^2}{4}}{X_{SC_{max}}} = \frac{X_{SC_{max}} - \frac{1}{4} \cdot X_{SC_{max}}}{X_{SC_{max}}} = 0,75 \quad (2.26)$$

De ce fait, lors de l'utilisation de supercondensateur, il est souhaitable de veiller à limiter l'évolution de l'état de charge SOC entre 25% et 100%.

Pour satisfaire aux besoins en puissance et en énergie d'une application donnée, un assemblage de plusieurs supercondensateurs est utilisé. Lorsque N_{SC} supercondensateurs sont connectés en série, la tension du pack U_{SC} et la capacité équivalente C_{SC}^{eq} sont données par :

$$U_{SC}(E_{SC}, I_{SC}) = V_{SC}(E_{SC}, I_{SC}) \cdot N_{SC} \quad (2.27)$$

$$C_{SC}^{eq} = \frac{C_{SC}}{N_{SC}} \quad (2.28)$$

Pour les simulations réalisées, des éléments de capacité $C_{SC} = 2600 F$, de tension maximale $E_{SC_{max}} = 2,5V$, de résistance interne de $R_{SC} = 0,7 m\Omega$ et de masse de $M_{SC} = 500 g$ ont été utilisés ; le courant maximal (charge et décharge) est limité à 320A pour garantir un rendement énergétique minimal de 90% /Barrade et Rufer 2004/.

Le tableau 2-3 résume les caractéristiques principales des éléments de batterie et de supercondensateur.

Type	Batterie Ni-MH	Supercondensateur
Tension nominale	1,2V	2,5V
Résistance interne	1,3mΩ (moyenne)	0,7mΩ
Capacité nominale	28 Ah	2600 F
Limite de courant	250 A	320 A
Limites de l'état de charge	[25%,100%]	[25%,100%]
Consigne état de charge moyen	60%	80%
Masse	0,72 kg	0,5 kg
Puissance spécifique	350W / kg	1120W / kg
Énergie spécifique	47Wh / kg	4,5Wh / kg

Tableau 2-3 : Caractéristique des éléments de la source secondaire d'énergie.

2.6. Le véhicule et son groupe motopulseur

La chaîne de traction est décomposée en 4 sous-modèles : la machine électrique, l'ensemble réducteur/transmission, les roues et le véhicule (figure 2-12). L'ensemble des paramètres du véhicule retenu sont donnés dans le tableau 2-4.

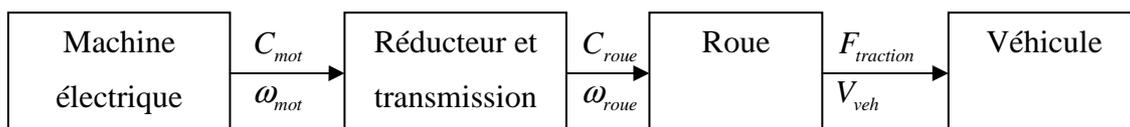


Figure 2-12 : Schéma de la chaîne de traction.

Le modèle du véhicule est longitudinal (modèle 1D). Les mouvements latéraux et les mouvements de caisse (suspensions) ne sont pas considérés. De plus, seule la résultante de l'effort généré par les pneumatiques est prise en compte.

2.6.1. Le véhicule

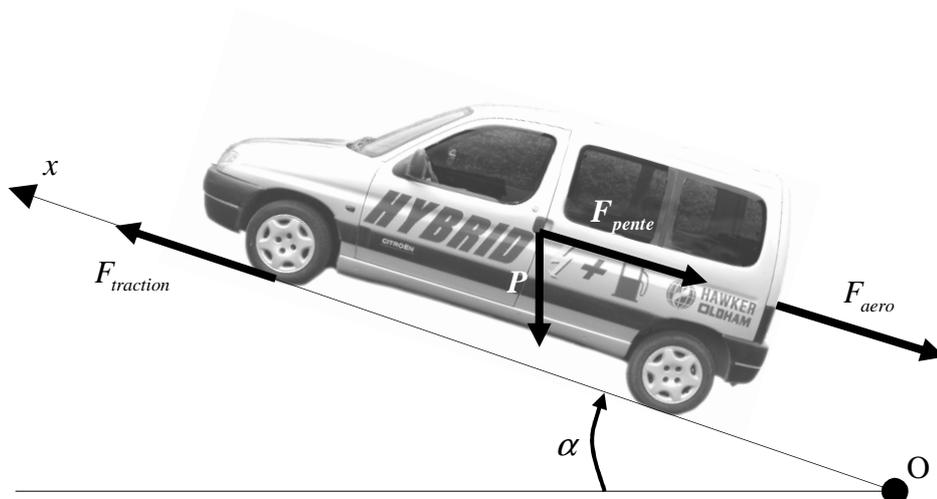


Figure 2-13 : Bilan des forces s'exerçant sur le véhicule.

Le véhicule est considéré comme un solide ponctuel en déplacement soumis à 3 efforts selon l'axe longitudinal $[Ox)$, figure 2-13 :

1. L'effort de traction $F_{traction}$ résulte de l'action des roues motrices sur la chaussée ;
2. L'effort de résistance aérodynamique F_{aero} provient des frottements de l'air sur la caisse :

$$F_{aero}(t) = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot A_f \cdot C_x \cdot V_{veh}(t)^2 \quad (2.29)$$

avec ρ_{air} la densité de l'air (kg/m^3), A_f la surface frontale (m^2) et C_x le coefficient de résistance aérodynamique (-).

3. La résistance de montée en cote F_{pente} est :

$$F_{pente}(t) = M_{veh} \cdot g \cdot \sin(\alpha(t)) \quad (2.30)$$

avec α la pente (rad) et M_{veh} la masse totale du véhicule (kg).

Le principe fondamental de la dynamique lie les forces et les accélérations d'un solide :

$$M_{veh} \cdot \dot{V}_{veh}(t) = F_{traction}(t) - F_{aero}(t) - F_{pente}(t) \quad (2.31)$$

La vitesse du véhicule s'obtient par intégration de (2.31):

$$V_{veh}(t) = \frac{1}{M_{veh}} \cdot \int_0^t (F_{traction}(u) - F_{aero}(u) - F_{pente}(u)) \cdot du \quad (2.32)$$

La masse totale M_{veh} du véhicule dépend de sa masse à vide M_{veh}^0 , la masse du système pile à combustible M_{sysPAC} , la masse de la source secondaire d'énergie M_{SSE} (batteries ou supercondensateurs) ainsi que la masse équivalente M_{eq} des éléments en rotation (roues et machine électrique) ramenée à la caisse :

$$M_{veh} = M_{veh}^0 + M_{sysPAC} + M_{SSE} + M_{eq} \quad (2.33)$$

2.6.2. Les roues

Les roues sont des convertisseurs d'efforts mécaniques. Les couples délivrés par le groupe motopropulseur (en rotation) sont « transformés » en forces appliquées à la caisse du véhicule (en translation).

Il existe de nombreux modèles décrivant l'interaction pneu/chaussée de manière détaillée /El Hadri 2001/ /Canudas-de-Wit 2003/ mais ils reposent généralement sur la modélisation du glissement du pneumatique sur la chaussée, phénomène trop rapide pour être pris en compte dans un modèle énergétique. Le modèle considéré est donc un modèle simplifié ne prenant en compte que la résultante des efforts générés par les 4 pneumatiques. Une unique roue virtuelle est donc suffisante pour représenter le comportement *moyen* des 4 roues.

Cette roue virtuelle permet de générer, à partir du couple C_{roue} délivré par le groupe motopropulseur, une force motrice $F_{mot}(t)$:

$$F_{mot}(t) = \frac{C_{roue}(t)}{R_{roue}} \quad (2.34)$$

avec R_{roue} le rayon de la roue.

L'interface entre le pneumatique et la chaussée est le siège de forces de frottement $F_{roul}(t)$ s'opposant à l'avancée du véhicule :

$$F_{roul}(t) = M_{veh} \cdot g \cdot C_r(V_{veh}(t)) \cdot \cos(\alpha(t)) \quad (2.35)$$

avec M_{veh} la masse totale du véhicule (kg), g la constante de gravité (m/s^2), C_r le coefficient de frottement des pneumatiques et α la pente de la chaussée (rad).

Le coefficient de frottement C_r dépend de la vitesse du véhicule V_{veh} . Pour des conditions d'usage (température, humidité,...) données et dans le cadre d'un modèle énergétique, une fonction quadratique est suffisante /Wong 2001/ :

$$C_r(V_{veh}) = C_r^0 + k_{C_r} \cdot V_{veh}^2 \quad (2.36)$$

avec C_r^0 et k_{C_r} des coefficients pouvant être déterminés expérimentalement.

Finalement, la force $F_{traction}$ appliquée à la caisse s'écrit:

$$F_{traction}(t) = F_{mot}(t) - F_{roul}(t) \quad (2.37)$$

Le glissement entre la chaussée et le pneumatique étant supposé négligeable, la relation liant la vitesse linéaire du véhicule V_{veh} à la vitesse de rotation de la roue ω_{roue} est donnée par :

$$\omega_{roue}(t) = \frac{V_{veh}(t)}{R_{roue}} \quad (2.38)$$

Enfin, la masse équivalente M_{eq} des éléments en rotation (roues et arbre moteur) ramenée à la caisse est fonction de leurs inerties /Paganelli 1999/ :

$$M_{eq} = \frac{1}{R_{roue}^2} (J_{GMP} + 4 \cdot J_{roue}) \quad (2.39)$$

avec J_{roue} l'inertie d'une roue ($kg.m^2$) et J_{GMP} l'inertie du groupe-motopropulseur ramenée aux roues ($kg.m^2$).

2.6.3. Le réducteur et la transmission

Le réducteur permet l'adaptation des vitesses de rotation et des couples entre l'arbre de la machine électrique (ω_{mot} et C_{mot}) et les roues motrices (ω_{roue} et C_{roue}). La transmission est composée principalement du bloc différentiel chargé de répartir équitablement le couple de sortie du réducteur aux roues motrices. Un rapport de réduction globale $r_{red} > 1$ est considéré entre l'arbre de la machine électrique et la roue. Le rendement η_{red} de l'ensemble

réducteur/transmission est supposé constant. Selon les hypothèses retenues, les relations entre les couples et les vitesses sont données par :

$$C_{mot}(t) = \frac{C_{roue}(t)}{\eta_{red}^{sign(C_{roue}(t))} \cdot r_{red}} \quad (2.40)$$

$$\omega_{mot}(t) = \omega_{roue}(t) \cdot r_{red} \quad (2.41)$$

L'inertie groupe motopropulseur J_{GMP} correspond à l'inertie de l'arbre moteur J_{mot} ramenée à la roue :

$$J_{GMP} = \frac{J_{mot}}{r_{red}^2} \quad (2.42)$$

2.6.4. La machine électrique

Les dynamiques de la machine électrique et son électronique de puissance et de contrôle associée sont très rapides, généralement de quelques millisecondes à quelques centièmes de secondes. Dans le cadre d'une modélisation énergétique, ces dynamiques sont négligées et le modèle statique de la machine électrique repose principalement sur sa cartographie de rendement η_{mot} . La puissance requise par la machine électrique P_{mot} dépend de sa vitesse de rotation ω_{mot} et de son couple C_{mot} :

$$P_{mot}(t) = \frac{\omega_{mot}(t) \cdot C_{mot}(t)}{\eta_{mot}(\omega_{mot}(t), C_{mot}(t))^{sign(C_{mot}(t))}} \quad (2.43)$$

La machine électrique est limitée en couple :

$$C_{mot_{min}}(\omega_{mot}) \leq C_{mot} \leq C_{mot_{max}}(\omega_{mot}) \quad (2.44)$$

avec $C_{mot_{min}}(\omega_{mot})$ le couple minimal en fonctionnement génératrice et $C_{mot_{max}}(\omega_{mot})$ le couple maximal en fonctionnement moteur.

2.7. Les convertisseurs de puissance

2.7.1. Modèle générique d'un convertisseur de puissance

Les convertisseurs de puissances permettent d'adapter les courants et tensions entre 2 organes électriques. Les différents types de convertisseurs sont classés selon les types (alternatif ou continu) et les caractéristiques des énergies électriques manipulées /Pinard 2007/ :

- hacheurs pour la conversion continu-continu ;
- onduleurs pour la conversion continu-alternatif ;
- redresseurs pour la conversion alternatif-continu ;
- ...

De plus, selon le sens des courants et des tensions, les convertisseurs peuvent comporter un ou plusieurs quadrants de fonctionnement selon les réversibilités en courant et en tension requises.

Enfin, les convertisseurs disposent d'une commande locale qui intègre généralement des limitations en courant, tension et/ou puissance, assurant ainsi une partie de la protection des organes auquel il est relié.

Un modèle simplifié ne fait intervenir que des relations entre la puissance d'entrée P_{conv}^{entree} et la puissance de sortie P_{conv}^{sortie} (figure 2-14).

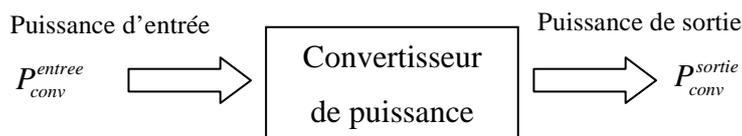


Figure 2-14 : Schéma simplifié du convertisseur de puissance.

Il ne tient pas compte de l'architecture du convertisseur ni de son mode de fonctionnement.

Deux hypothèses ont été retenues :

- L'électronique de gestion du convertisseur consomme en permanence une puissance constante P_{conv_const} ;
- Les pertes (essentiellement par commutation) sont proportionnelles à la puissance transmise P_{conv}^{sortie} . Le rendement direct η_{conv_const} , c'est-à-dire sans considérer la consommation de l'électronique de gestion, est donc constant.

Avec les hypothèses retenues, la relation entre la puissance d'entrée P_{conv}^{entree} et la puissance de sortie P_{conv}^{sortie} est donnée par :

$$\begin{cases} P_{conv}^{entree} = \frac{P_{conv}^{sortie}}{\eta_{conv_const}} + P_{conv_const} & \text{si } P_{conv}^{sortie} \geq 0 \\ P_{conv}^{entree} = P_{conv}^{sortie} \cdot \eta_{conv_const} + P_{conv_const} & \text{si } P_{conv}^{sortie} < 0 \end{cases} \quad (2.45)$$

avec $P_{conv_const} > 0$ et $0 < \eta_{conv_const} < 1$

Le rendement global du convertisseur η_{conv} est le rapport entre la puissance sortante et la puissance entrante :

$$\begin{cases} \eta_{conv} = \frac{P_{conv}^{sortie}}{P_{conv}^{entree}} & \text{si } P_{conv}^{sortie} \geq 0 \\ \eta_{conv} = \frac{P_{conv}^{entree}}{P_{conv}^{sortie}} & \text{si } P_{conv}^{sortie} < 0 \end{cases} \quad (2.46)$$

A titre d'exemple, le rendement du convertisseur de la figure 2-15 a été calculé en considérant un rendement de base η_{conv_const} de 95% et une consommation minimale P_{conv_const} égale à 1% de la puissance maximale de sortie. Ce modèle énergétique simple de convertisseur de puissance permet d'obtenir un faible rendement pour les faibles puissances et un rendement maximal pour les hautes puissances.

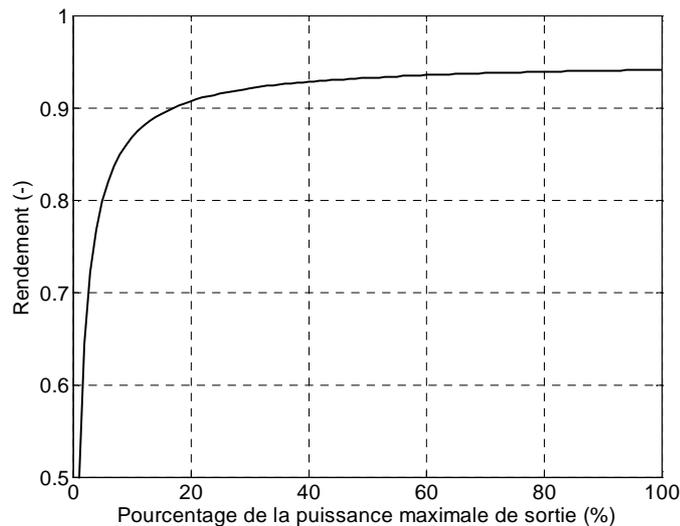


Figure 2-15 : Rendement d'un convertisseur de puissance ($\eta_{conv_const} = 95\%$ et consommation minimale égale à 1% de la puissance maximale de sortie).

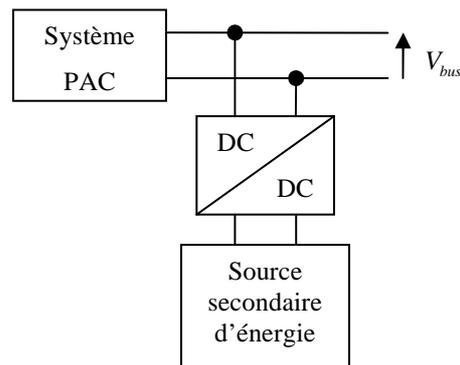
2.7.2. Architecture électrique du véhicule

Le véhicule comporte trois principaux organes électriques de puissance: La machine électrique, la source d'énergie secondaire et le système pile à combustible. Afin de connecter ces éléments sur un (ou plusieurs) bus, il est nécessaire de définir une architecture électrique.

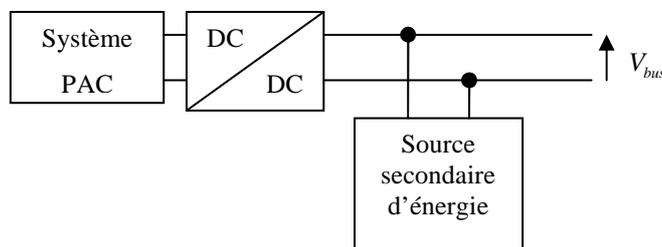
La machine électrique est systématiquement équipée d'un convertisseur pour permettre une commande en couple de celle-ci. Le convertisseur est réversible en puissance pour permettre de fournir l'énergie nécessaire lors des phases de traction et restituer l'énergie produite par la machine électrique lors des phases de freinage du véhicule.

Au niveau de la source de puissance, l'un des rôles principaux du ou des convertisseurs de puissance est de contrôler la répartition de puissance entre le système PAC et la source secondaire d'énergie. De plus sa commande locale permet généralement de limiter le courant, la tension et/ou la puissance transmise de manière à assurer la sécurité des organes auquel il est relié. Principalement, trois architectures électriques hybrides sont considérées /Saisset et al. 2004/ :

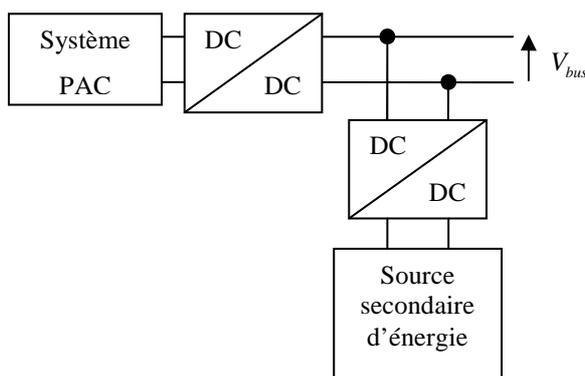
1. Le système PAC est connecté directement au bus électrique et lui impose sa tension. Un convertisseur DC/DC réversible en puissance est utilisé entre la source secondaire et le bus :



2. La source secondaire est connectée directement et impose sa tension au bus électrique. Un convertisseur DC/DC non-réversible en puissance est utilisé entre le système PAC et le bus :



3. Le système PAC et la source secondaire sont connectées tout deux via des convertisseurs DC/DC. Dans ce cas, la tension du bus peut être choisie librement (dans la plage de fonctionnements possibles des convertisseurs utilisés) :



L'utilisation d'un seul convertisseur au niveau de la source de puissance hybride (architectures n°1 et n°2 ci-dessus) présente des avantages et des inconvénients /Saïssset et al. 2004/ :

- Avantages :
 - Les pertes sont réduites ;
 - L'architecture est simple à commander car il n'y a qu'un seul degré de liberté ;
 - Le coût de l'installation est réduit.
- Inconvénient :
 - Le composant connecté directement sur le bus de puissance ne possède pas de limitation en courant ce qui peut affecter la sécurité de l'installation. L'utilisation d'un second convertisseur permet évidemment de remédier à ce problème.

Dans le cadre des simulations réalisées, une multitude de dimensionnements de la source de puissance hybride ont été considérés. L'architecture n°3 a été retenue car elle permet de s'adapter à tous les niveaux de tension et de courant (figure 2-16).

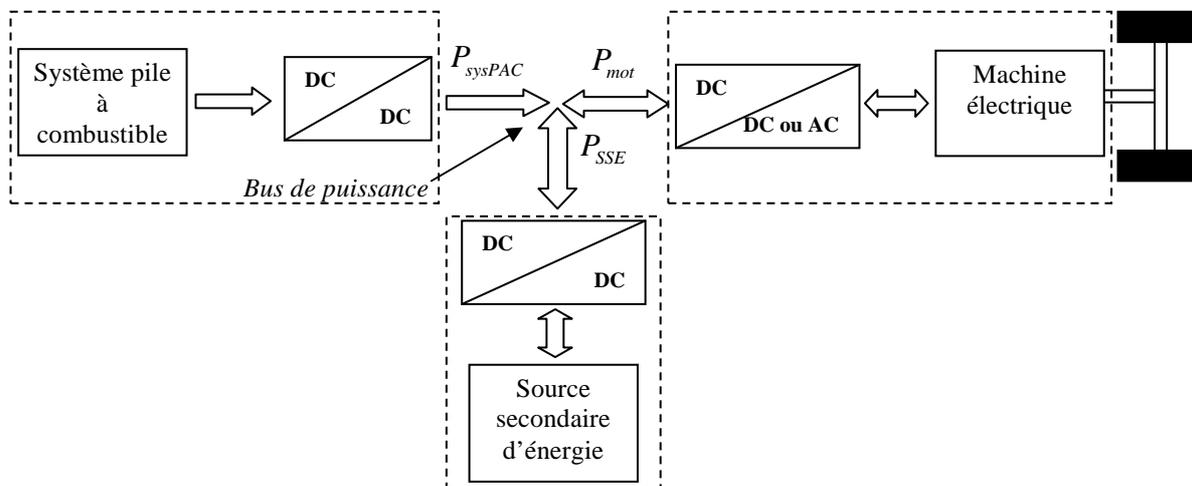


Figure 2-16 : Schéma de puissance du groupe motopropulseur.

Pour des raisons de lisibilité et de commodité, les puissances P_{sysPAC} , P_{SSE} et P_{mot} se réfèrent aux flux énergétiques échangés au niveau du nœud électrique (figure 2-16). La relation liant les trois puissances est donc :

$$P_{mot}(t) = P_{sysPAC}(t) + P_{SSE}(t) \quad (2.47)$$

2.8. Modèle de simulation

Le schéma complet du véhicule PAC hybride considéré pour la simulation est donné figure 2-17. Il met en œuvre l'intégralité des équations (2.1) à (2.47).

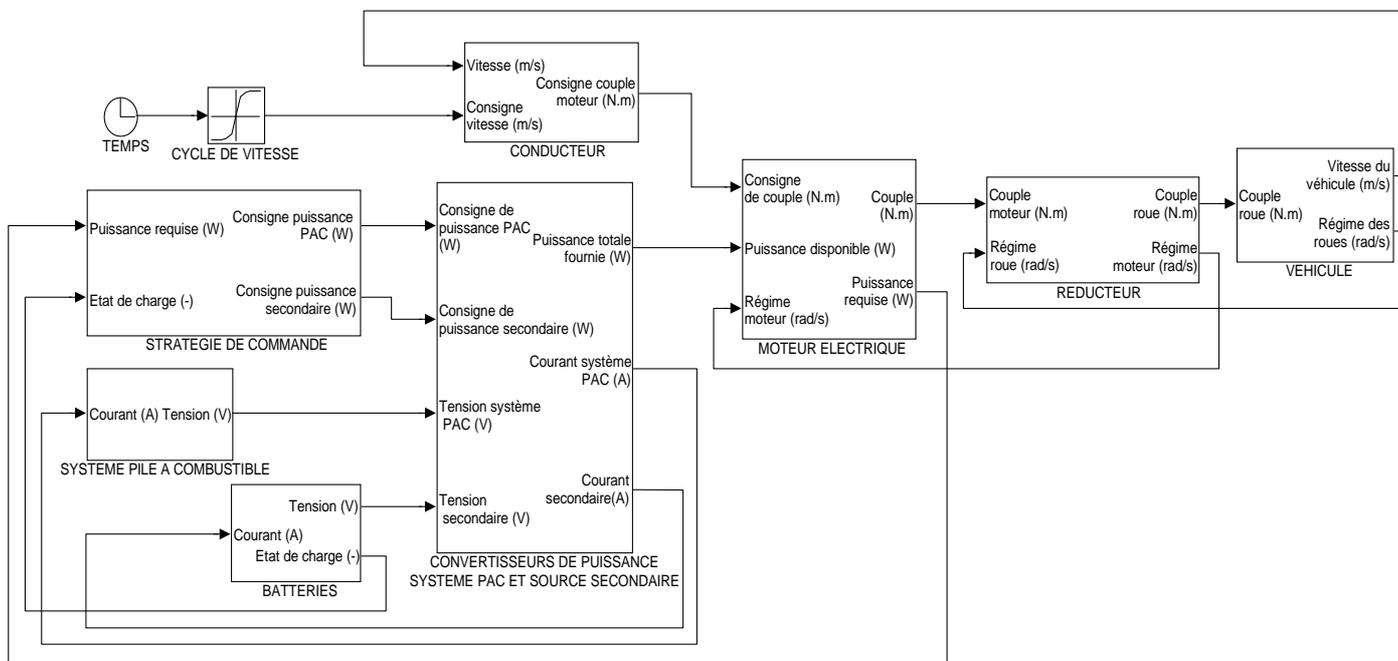


Figure 2-17 : Schéma d'un véhicule PAC hybride avec batteries.

Dans la suite de ce mémoire, le véhicule retenu pour les simulations est un Citroën Berlingo dont les caractéristiques sont données dans le tableau 2-4 /Paganelli 1999/. Sa propulsion est assurée par une machine électrique de 75 kW (figure 2-20) /Advisor/.

Outre les paramètres de modélisation nécessaires pour la simulation du véhicule, un cycle de vitesse doit être choisi. Il définit l'évolution de la consigne de vitesse du véhicule en fonction du temps ; on distingue 2 catégories de cycle :

- des cycles de vitesse normalisés (par exemple, le Cycle Européen Normalisé, figure 2-18) : il s'agit de profils de vitesse simplistes ne représentant pas un comportement réaliste du véhicule. Cependant, leur simplicité permet une interprétation aisée des résultats.

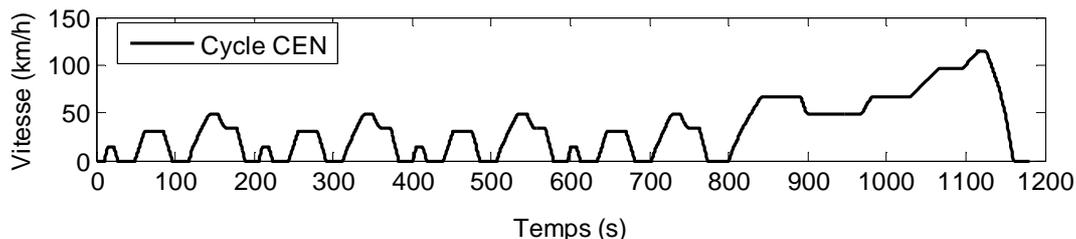


Figure 2-18 : Cycle Européen Normalisé.

➤ des cycles de vitesse issus de mesures réelles (figure 2-19) : ils ont été enregistrés lors de campagnes d'essais. Les projets Européens Hyzem et Artémis /André et al. 2006/ ont permis la création de cycles de vitesse caractéristiques de l'usage réel de véhicules dans des situations de conduite données (urbain, périurbain ou autoroutier, en conduite fluide ou dense).

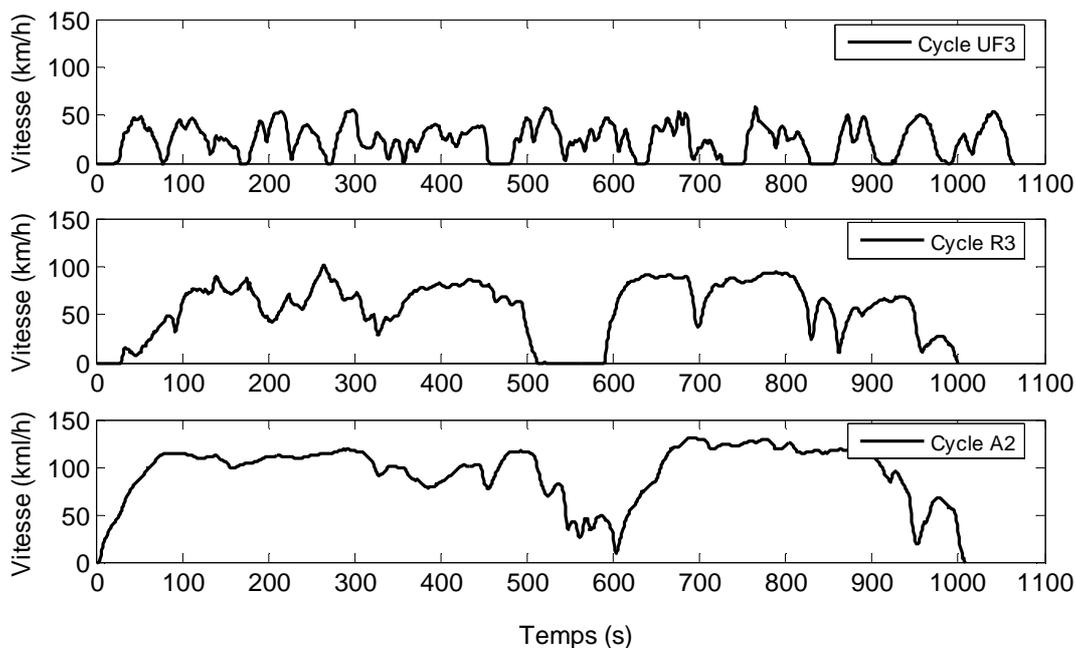


Figure 2-19 : Exemples de cycle de vitesse réels (UF3 : Cycle Urbain Fluide n°3, R3, Cycle Routier n°3, A2 : Cycle Autoroutier n°2).

Remarque : de façon implicite on suppose disposer du couple moteur permettant d'assurer chacun des cycles de vitesse. Pour les simulations, on utilise un correcteur permettant ce suivi de consigne moyennant une erreur maximale autorisée. Ce correcteur agit évidemment sur la dynamique de la boucle fermée, donc sur les performances de consommation. Par rapport à des essais réels, on peut l'assimiler à un conducteur. Pour minimiser son effet, un compromis a

été effectué ; ce compromis permet un bon suivi pour les cycles considérés et évidemment, il reste fixé pour l'ensemble des comparaisons.

A titre d'illustration, des exemples de résultats obtenus avec le modèle de la figure 2-17 sont fournis (figure 2-21) pour le véhicule Berlingo équipé d'un système PAC de 40 kW et d'un ensemble de 200 éléments de batteries Ni-MH. Le cycle CEN (Cycle Européen Normalisé) est considéré. La consommation obtenue est de 100 g pour parcourir 11 km, soit 0,9 kg/100 km. La variation d'état de charge est de -18%.

Disposer d'une source de puissance hybride implique l'utilisation d'une stratégie de commande qui définisse la répartition des puissances entre le système PAC et la source secondaire d'énergie. Dans l'exemple de la figure 2-21, la stratégie retenue est extrêmement basique : la demande de puissance lors des phases de traction est répartie équitablement entre le système PAC et les batteries. La stratégie de commande ne tenant pas compte de l'état de charge des batteries pour calculer la répartition de puissance, il n'y a aucune garantie que sur un cycle plus long, l'état de charge n'atteigne pas sa limite inférieure ou supérieure.

De manière évidente, il est nécessaire de mettre en œuvre des stratégies mieux adaptées qui minimisent un ou plusieurs critères, par exemple la consommation d'hydrogène, tout en respectant un ensemble de contraintes (puissances limites, état de charge borné...).

 <p>Le Berlingo Hybride a été développé par le LAMIH en partenariat avec PSA Peugeot-Citroën et avec le support financier du FEDER, de l'ADEME et de la région Nord Pas-de-Calais.</p>	Masse du véhicule seul avec ½ charge.	$M_{veh}^0 = 1400\text{ kg}$
	Rayon des roues	$R_{roue} = 0,29\text{ m}$
	Inertie d'une roue	$J_{roue} = 0,65\text{ kg.m}^2$
	Coefficient de résistance aérodynamique	$C_x = 0,37$
	Surface frontale	$A_f = 2,59\text{ m}^2$
	Coefficient de résistance au roulement	$C_r(V_{veh}) = C_r^0 + k_{C_r} \cdot V_{veh}^2$ $C_r^0 = 0,0136, k_{C_r} = 5,184 \times 10^{-7}$
	Puissance mécanique de la machine électrique	75 kW (figure 2-20)
	Inertie de l'arbre du moteur	$J_{mot} = 0,103\text{ kg.m}^2$
	Rapport de réduction du réducteur	$r_{red} = 8$
	Rendement du réducteur	$\eta_{red} = 0,95$
	Convertisseurs de puissance moteur, système pile à combustible et batteries/supercondensateurs	rendement $\eta_{conv_const} = 95\%$ et P_{conv_const} égale à 1% de la puissance maximale de sortie.

Tableau 2-4 : Caractéristiques du véhicule considéré.

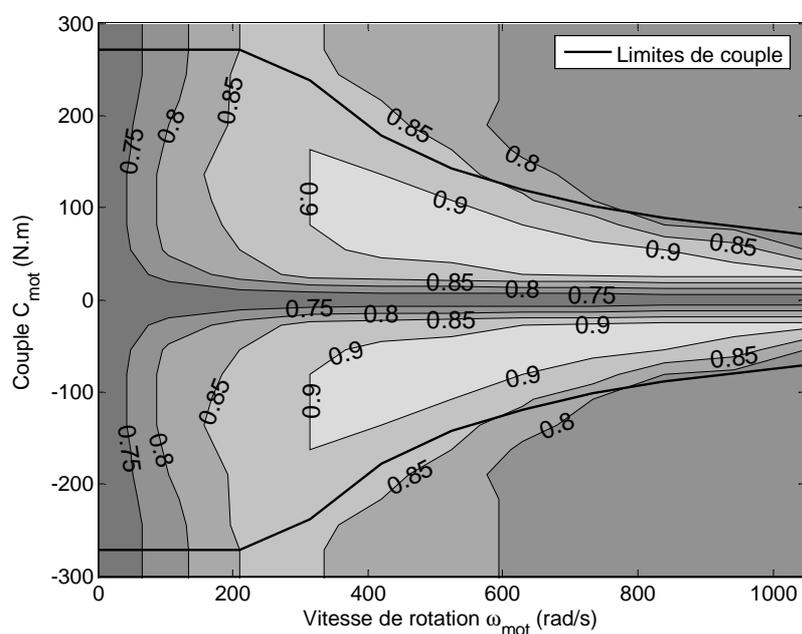


Figure 2-20 : Cartographie de rendement de la machine électrique.

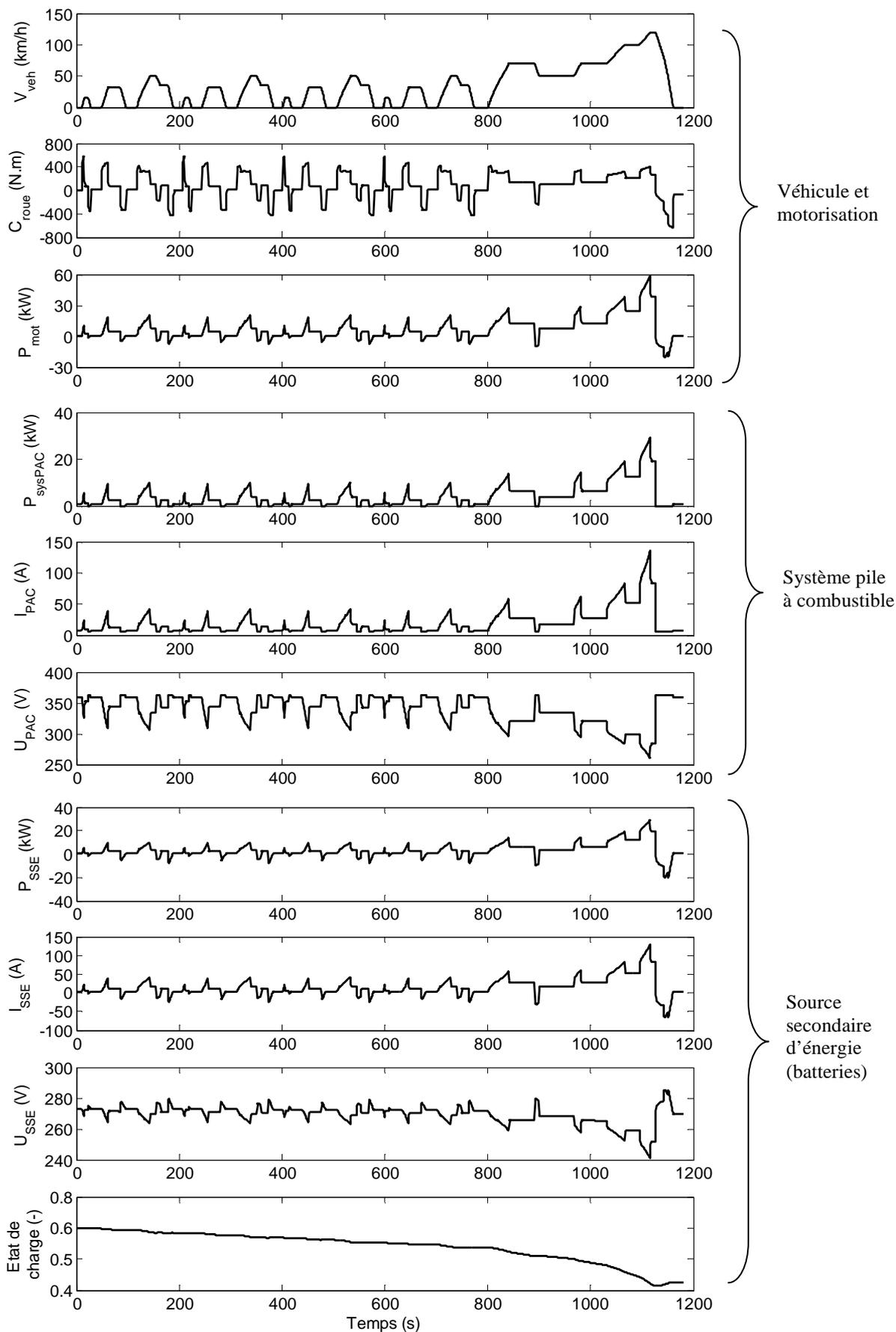


Figure 2-21 : Exemple de résultats pour le Cycle CEN.

2.9. Conclusion

Un modèle de véhicule à pile à combustible hybride a été présenté. L'objectif était de disposer d'un modèle modulaire permettant de tester facilement différents dimensionnements de système pile à combustible et de source secondaire d'énergie. De plus, sa modularité permet de modéliser simplement une architecture hybride comprenant des batteries ou des supercondensateurs.

La source de puissance étant hybride, pour fournir une puissance donnée à la machine électrique, il est nécessaire de déterminer la répartition de puissance entre le système PAC et la source secondaire d'énergie. Les algorithmes utilisés s'appellent « stratégies de commande » et sont l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 3. Stratégies de commande : de l'optimisation globale à la commande temps réel

3.1. INTRODUCTION	74
3.2. FORMULATION DU PROBLÈME D'OPTIMISATION GLOBALE	74
3.2.1. Hypothèses sur le fonctionnement du système PAC.....	74
3.2.2. Première formulation.....	75
3.2.3. Réécriture du Problème n°1	79
3.3. APPROCHE PAR LA PROGRAMMATION DYNAMIQUE.....	80
3.3.1. Principe.....	80
3.3.2. Résultats	83
3.4. APPROCHE PAR LA THÉORIE DE LA COMMANDE OPTIMALE	86
3.4.1. Formulation du Hamiltonien et conditions d'optimalité	86
3.4.2. Influence de la condition initiale $\lambda(0)$	89
3.4.3. Algorithme de résolution du problème d'optimisation globale	91
3.4.4. Prise en compte de la contrainte sur l'état de charge	94
3.4.5. Prise en compte de la dynamique du système PAC	99
3.5. STRATÉGIE DE COMMANDE TEMPS RÉEL BASÉE SUR LA COMMANDE OPTIMALE.....	102
3.5.1. Approche utilisée.....	103
3.5.2. Estimation du paramètre de Lagrange $\hat{\lambda}$ sur un cycle a priori connu	103
3.5.3. Proposition d'une stratégie prédictive : λ_{pred}	110
3.6. CONCLUSION	114

3.1. Introduction

Dans un véhicule à pile à combustible hybride, la répartition de puissance entre le système PAC et la source secondaire d'énergie doit satisfaire la demande de puissance du moteur électrique et respecter des contraintes de fonctionnement (puissances PAC et secondaire limitées, état de charge de la source secondaire borné...).

La stratégie de commande permet de définir cette répartition de puissance. Rappelons que deux types d'algorithmes sont envisageables :

- Optimisation globale :

Si le parcours routier est connu a priori, il est possible d'utiliser des stratégies hors-ligne d'optimisation globale : la répartition de puissance est alors idéale au sens de la minimisation de la consommation d'hydrogène. Cette approche n'est envisageable qu'en simulation.

- Stratégie temps réel :

En temps réel, le parcours routier n'est pas connu a priori. Les stratégies de commande utilisées sont nécessairement sous-optimales.

Dans ce chapitre, le problème d'optimisation globale est formulé. Sous certaines hypothèses, le problème est résolu soit en utilisant une approche par programmation dynamique, soit par une approche basée sur la commande optimale. Ensuite, une proposition de stratégie temps réel basée sur les résultats d'optimisation globale est formulée.

3.2. Formulation du problème d'optimisation globale

3.2.1. Hypothèses sur le fonctionnement du système PAC

La première hypothèse concerne le démarrage à froid du système PAC. Dans l'approche proposée il est supposé que la pile à combustible a déjà atteint sa température nominale de fonctionnement ($T_{PAC} = 80^{\circ}C$) au début du cycle (démarrage à chaud). Cependant il convient de garder à l'esprit que la puissance du système PAC est réduite lors de son démarrage si elle n'a pas atteint sa température de fonctionnement nominale. Dans le cadre d'une application à un véhicule hybride, /Müller et al. 2007/ propose un système (ajout d'un radiateur) et une

stratégie de commande qui accélère la montée en température du système PAC et garantit le maintien de l'état de charge des batteries. La stratégie de commande est basée sur la théorie de la commande optimale.

La deuxième hypothèse concerne le fonctionnement marche/arrêt du système PAC. Un fonctionnement par intermittence de la pile à combustible est imaginable dans le but de réduire la consommation hydrogène, le véhicule n'utilisant alors que l'énergie issue de la source secondaire pour sa propulsion. Il est cependant difficile d'estimer le coût en termes de consommation de carburant lors d'un arrêt et d'un redémarrage complet du système PAC /Markel et al. 2003/. De plus, pour des durées d'arrêts prolongées, la pile à combustible va se refroidir et sa puissance sera limitée lors de son redémarrage. Enfin, si un arrêt complet du système PAC est envisageable dans le cas d'un véhicule hybride avec batteries, il devient difficile voire impossible d'employer ce mode de fonctionnement avec des supercondensateurs. En effet, l'énergie présente dans les supercondensateurs ne peut assurer la propulsion du véhicule que pendant quelques secondes seulement. Pour ces raisons, dans le cadre de cette étude, le système PAC n'est jamais arrêté et fonctionne au ralenti si aucune puissance ne lui est demandée. Le fonctionnement au ralenti entraîne une consommation minimale d'hydrogène nécessaire pour alimenter les composants auxiliaires.

3.2.2. Première formulation

Le problème d'optimisation est formulé de manière discrète. La période d'échantillonnage est notée T_e , les échantillons k , et le cycle de vitesse de durée t_f est composé de $N+1$ échantillons ($k \in \{0 \dots N\}$).

Le schéma énergétique considéré est donnée à la figure 3-1. Ce schéma simplifié ne fait pas apparaître les convertisseurs de puissance dont les pertes sont considérées de manière implicite dans les rendements du moteur électrique, de la pile à combustible et de la source secondaire d'énergie.

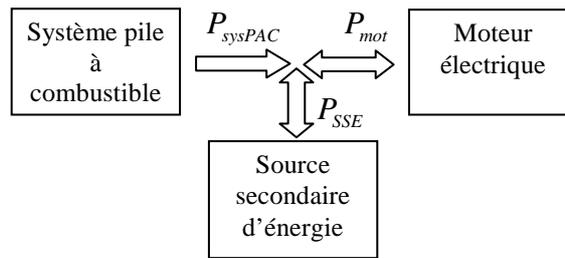


Figure 3-1 : schéma énergétique simplifié du groupe motopropulseur.

La consommation instantanée d'hydrogène \dot{m}_{H_2} est fonction de la puissance fournie par le système pile à combustible P_{sysPAC} . Le critère à minimiser est la consommation totale d'hydrogène pour un cycle donné :

$$J = \sum_{k=0}^N \dot{m}_{H_2} (P_{sysPAC}(k)) \cdot T_e \quad (3.1)$$

Dans (3.1), la puissance du système PAC P_{sysPAC} est limitée :

$$P_{sysPAC_{min}} \leq P_{sysPAC}(k) \leq P_{sysPAC_{max}} \quad (3.2)$$

La source secondaire d'énergie est considérée comme un intégrateur de puissance. Par convention, une puissance positive P_{SSE} contribue à diminuer l'énergie X contenue dans la source secondaire alors qu'une puissance négative l'augmentera :

$$X(k+1) = X(k) + Q(P_{SSE}(k), X(k)) \cdot T_e \quad (3.3)$$

Remarque sur la notion d'état de charge : l'état de charge SOC s'écrit :

$$SOC(k) = \frac{X(k)}{X_{max}} \quad (3.4)$$

avec X_{max} l'énergie maximale. Notons que dans le cas d'une batterie, la relation (3.4) est une approximation.

Par souci de clarté, la variable X sera appelée de manière abusive « état de charge ». La variable X désigne en fait la quantité d'énergie en Joule contenue dans la source secondaire.

La fonction non linéaire Q (fonction de la puissance apparente P_{SSE} et de l'état de charge X figure 3-2 et figure 3-3) présente dans (3.3) intègre les pertes de puissance en charge et en décharge de la source secondaire. Ces pertes sont induites par les résistances internes des batteries ou des supercondensateurs, par le rendement faradique et par le convertisseur de

puissance. En d'autres termes, pour une puissance apparente P_{SSE} positive, la puissance réellement prélevée sera plus importante ($|Q| > |P_{SSE}|$) ; pour une puissance P_{SSE} négative, la puissance réellement reçue sera plus faible ($|Q| < |P_{SSE}|$).

Les contraintes sur cette puissance s'écrivent :

$$P_{SSE_{min}}(X(k)) \leq P_{SSE}(k) \leq P_{SSE_{max}}(X(k)) \tag{3.5}$$

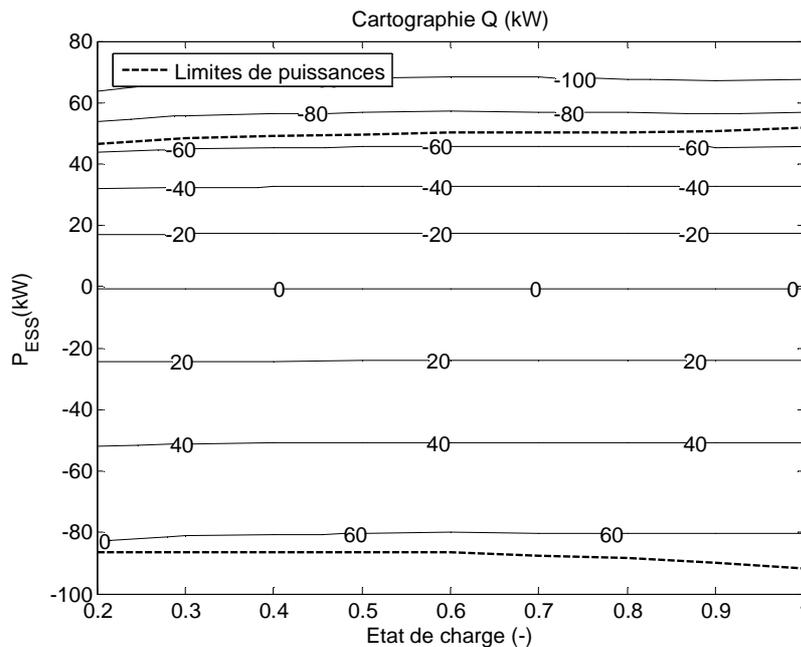


Figure 3-2 : Cartographie Q pour 200 éléments de batteries Ni-MH.

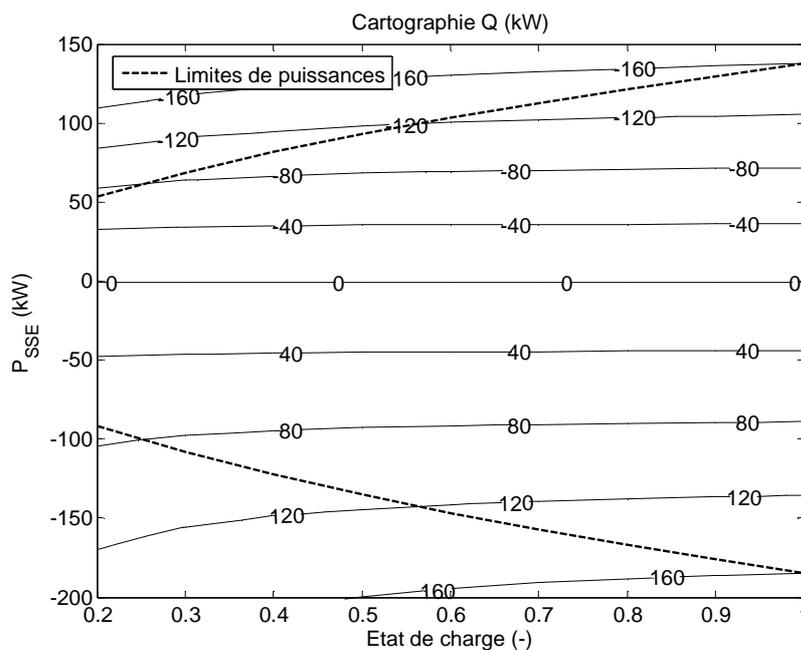


Figure 3-3 : Cartographie Q pour 200 supercondensateurs.

Afin de garantir l'intégrité de la source secondaire d'énergie, son état de charge doit être maintenu entre deux bornes :

$$X_{min} \leq X(k) \leq X_{max} \quad (3.6)$$

La variation globale d'état de charge sur un cycle représente la quantité d'énergie consommée dans la source secondaire d'énergie. Elle s'obtient en sommant (3.3) :

$$\Delta X = \sum_{k=0}^N Q(P_{SSE}(k), X(k)) \cdot T_e \quad (3.7)$$

Le cycle de vitesse étant connu a priori, l'objectif est de trouver la trajectoire qui minimise la consommation d'hydrogène et qui amène le système d'un état initial $X(0)$ donné à un état final $X(N)$ donné. L'évolution de l'état est donc contrainte par :

$$\Delta X = X(N) - X(0) \quad (3.8)$$

Enfin, le nœud électrique schématisé figure 3-1 impose la conservation des puissances :

$$P_{mot}(k) = P_{sysPAC}(k) + P_{SSE}(k) \quad (3.9)$$

Le problème d'optimisation globale s'écrit :

Problème n°1 :

- Critère :

$$J = \sum_{k=0}^N \dot{m}_{H_2}(P_{sysPAC}(k)) \cdot T_e \quad \text{Consommation d'hydrogène}$$

- Modèle :

$$X(k+1) = X(k) + Q(P_{SSE}(k), X(k)) \cdot T_e \quad \text{Dynamique de la source secondaire}$$

$$P_{mot}(k) = P_{sysPAC}(k) + P_{SSE}(k) \quad \text{Nœud électrique}$$

- Contraintes :

$$P_{sysPAC_{min}} \leq P_{sysPAC}(k) \leq P_{sysPAC_{max}} \quad \text{Limites de puissance du système PAC}$$

$$P_{SSE_{min}}(X(k)) \leq P_{SSE}(k) \leq P_{SSE_{max}}(X(k)) \quad \text{Limites de puissance au secondaire}$$

$$X_{min} \leq X(k) \leq X_{max} \quad \text{Limites de l'état de charge}$$

$$\Delta X = X(N) - X(0) \quad \text{Variation globale de l'état de charge}$$

3.2.3. Réécriture du **Problème n°1**

L'égalité (3.9) permet de ramener l'écriture du problème à une variable de décision : celle choisie est la puissance du système pile à combustible P_{sysPAC} .

La valeur de P_{mot} étant connue pour tout le cycle de vitesse, $Q(P_{SSE}(k), X(k))$ peut être exprimée à chaque instant k en fonction de la variable de décision P_{sysPAC} :

$$\tilde{Q}(P_{sysPAC}(k), X(k)) = Q(P_{SSE}(k), X(k)) = Q(P_{mot}(k) - P_{sysPAC}(k), X(k)) \quad (3.10)$$

La dynamique du système (3.3) est réécrite en considérant (3.10):

$$X(k+1) = X(k) + \tilde{Q}(P_{sysPAC}(k), X(k)) \cdot T_e \quad (3.11)$$

Pour une variable, un tilde \sim représente son écriture à l'aide de la variable de décision P_{sysPAC} .

La contrainte (3.2) sur la puissance P_{sysPAC} se réécrit directement :

$$\tilde{P}_{sysPAC_{min}}(k) \leq P_{sysPAC}(k) \leq \tilde{P}_{sysPAC_{max}}(k) \quad (3.12)$$

avec

$$\tilde{P}_{sysPAC_{min}}(k) = \max(P_{sysPAC_{min}}, P_{mot}(k) - P_{SSE_{max}}(X(k))) \quad (3.13)$$

$$\tilde{P}_{sysPAC_{max}}(k) = \min(P_{sysPAC_{max}}, P_{mot}(k) - P_{SSE_{min}}(X(k))) \quad (3.14)$$

La réécriture du **Problème 1** en fonction de P_{sysPAC} s'écrit alors :

Problème n°2 :

- Critère :

$$J = \sum_{k=0}^N \dot{m}_{H_2}(P_{sysPAC}(k)) \cdot T_e \quad \text{Consommation d'hydrogène}$$

- Système :

$$X(k+1) = X(k) + \tilde{Q}(P_{sysPAC}(k), X(k)) \cdot T_e \quad \text{Dynamique de la source secondaire}$$

- Contraintes :

$$\tilde{P}_{sysPAC_{min}}(k) \leq P_{sysPAC}(k) \leq \tilde{P}_{sysPAC_{max}}(k) \quad \text{Limites de puissance du système PAC}$$

$$X_{min} \leq X(k) \leq X_{max} \quad \text{Limites de l'état de charge}$$

$$\Delta X = X(N) - X(0) \quad \text{Variation globale de l'état de charge}$$

Pour résoudre le **Problème n°2**, deux approches ont été utilisées : la programmation dynamique et la théorie de la commande optimale.

3.3. Approche par la programmation dynamique

La programmation dynamique a été utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation globale de gestion des échanges énergétiques au sein de véhicules hybrides /Brahma et al. 2000/ /Scordia 2004/. Les algorithmes utilisés reposent sur le principe d'optimalité de Bellman /Bellman 1957/.

3.3.1. Principe

L'état initial $X(0)$ et l'état final $X(N)$ du système sont imposés. De plus les puissances minimales et maximales pouvant être imposées à la source secondaire d'énergie sont connues pour tout le cycle de vitesse. Il est donc possible de calculer les limites des trajectoires admissibles du système, figure 3-4.

Les deux trajectoires \bar{X}_f et \underline{X}_f (f « forward ») figure 3-4, sont obtenues en considérant la dynamique du système (3.11) de $k=0$ à $k=N-1$, à partir de l'état initial $X(0)$ et les valeurs minimales et maximales admissibles pour la variable de décision P_{sysPAC} :

$$\bar{X}_f(k+1) = \bar{X}_f(k) + \tilde{Q}(\tilde{P}_{sysPAC_{max}}(k), \bar{X}_f(k)) \cdot T_e \quad (3.15)$$

$$\underline{X}_f(k+1) = \underline{X}_f(k) + \tilde{Q}(\tilde{P}_{sysPAC_{min}}(k), \underline{X}_f(k)) \cdot T_e \quad (3.16)$$

De plus, (3.11) peut s'écrire :

$$X(k) = X(k+1) - \tilde{Q}(P_{sysPAC}(k), X(k)) \cdot T_e \quad (3.17)$$

Les deux trajectoires \bar{X}_b et \underline{X}_b (b « backward ») figure 3-4, sont calculées en utilisant (3.17) rétroactivement de l'état final $X(N)$ à l'instant $k=N$ jusqu'à l'instant $k=0$. En considérant les puissances minimales et maximales pouvant être prélevées sur la source secondaire d'énergie on obtient :

$$\bar{X}_b(k) = \bar{X}_b(k+1) - \tilde{Q}(\tilde{P}_{sysPAC_{min}}(k), \bar{X}_b(k)) \cdot T_e \quad (3.18)$$

$$\underline{X}_b(k) = \underline{X}_b(k+1) - \tilde{Q}(\tilde{P}_{sysPAC_{max}}(k), \underline{X}_b(k)) \cdot T_e \quad (3.19)$$

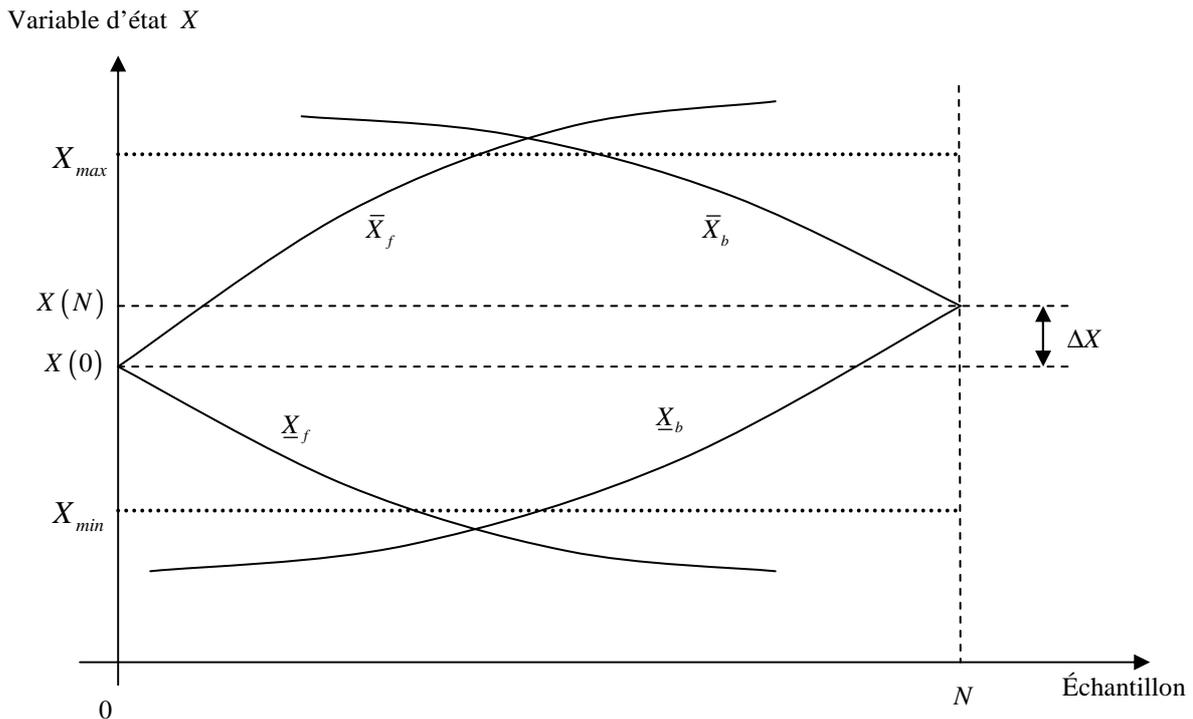


Figure 3-4 : Définition de l'espace d'état pour la programmation dynamique.

Finalement, les quatre trajectoires \bar{X}_f , \underline{X}_f , \bar{X}_b et \underline{X}_b délimitent l'espace admissible des trajectoires du système vis-à-vis des contraintes spécifiées dans le problème d'optimisation :

$$\underline{X}(k) \leq X(k) \leq \bar{X}(k) \quad (3.20)$$

avec

$$\underline{X}(k) = \max(\underline{X}_f(k), \underline{X}_b(k), X_{min}) \quad (3.21)$$

$$\bar{X}(k) = \min(\bar{X}_f(k), \bar{X}_b(k), X_{max}) \quad (3.22)$$

A chaque instant d'échantillonnage k , la variable d'état $X(k)$ est quantifiée avec δx le pas de quantification. Les états considérés appartiennent :

- aux sommets d'une grille $X_i(k) = (\delta x \cdot i, T_e \cdot k)$ avec $i \in \mathbb{N}$ et $k \in \{0 \dots N\}$
- à l'espace d'état admissible défini en (3.20).

Soit Ω_k , l'ensemble des valeurs de $X(k)$ possibles à chaque instant k :

$$X(k) \in \Omega_k, \quad \Omega_k = \{X_i(k) \in [\underline{X}(k), \bar{X}(k)]\} \quad (3.23)$$

La grille des valeurs admissibles à chaque instant étant définies par l'ensemble des Ω_k $k \in \{1 \dots N\}$, il reste à déterminer une trajectoire optimale de $X(0)$ à $X(N)$ minimisant le critère (3.1).

Le problème d'optimisation se ramène donc à un problème de parcours de graphe, le sommet initial et le sommet final étant imposés. Le principe de l'algorithme est illustré à la figure 3-5 avec les définitions suivantes :

- $S(X_i(k))$ représente le coût total pour amener l'état d'une valeur $X_i(k) \in \Omega_k$ à la valeur finale $X(N)$.
- $C_{i \rightarrow j}(k)$ représente le coût pour amener l'état d'une valeur $X_i(k) \in \Omega_k$ à une valeur $X_j(k-1) \in \Omega_{k-1}$.

La consommation minimale de carburant associée à la trajectoire allant de l'état $X_j(k-1) \in \Omega_{k-1}$ à l'instant $k-1$ à l'état $X(N)$ à l'instant N s'obtient par récurrence :

$$S(X_j(k-1)) = \min_{j \in \{1, \dots, \text{card}(\Omega_{k-1})\}} (S(X_i(k)) + C_{i \rightarrow j}(k)) \quad (3.24)$$

En utilisant (3.24) rétroactivement de $k=N$ à $k=1$, il est donc possible de calculer la trajectoire qui minimise la consommation d'hydrogène sur le cycle de vitesse considéré.

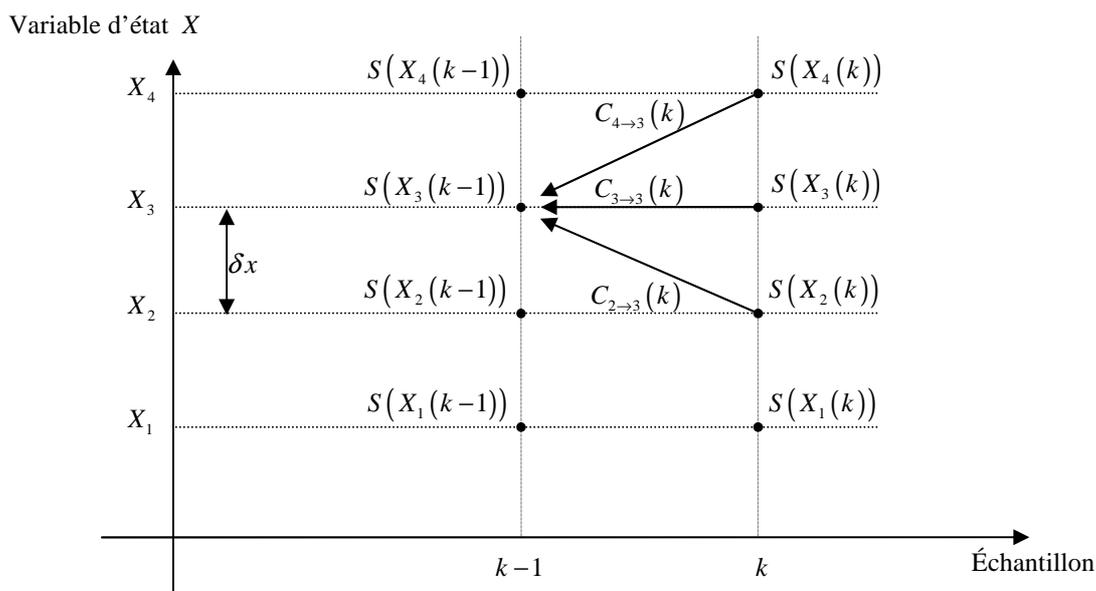


Figure 3-5 : Principe de l'algorithme de programmation dynamique.

Les principaux paramètres de réglages sont :

- le choix de la période d'échantillonnage T_e
- le pas de quantification δx . Ce paramètre a une incidence forte sur le temps de calcul et la précision de la trajectoire obtenue.

L'algorithme utilisé a une complexité linéaire par rapport au nombre d'échantillons du cycle et exponentielle vis-à-vis de $\text{card}(\Omega_k)$. Un compromis doit donc être trouvé entre précision et temps de calcul.

3.3.2. Résultats

Pour illustrer le dilemme « précision/temps de calcul », l'algorithme de programmation dynamique est utilisé sur un cycle de vitesse court :

Configuration CVI :

Cycle ECE (figure 3-6)

Véhicule Berlingo

Système PAC de 15 kW

50 supercondensateurs (25 kW – 113 Wh)

Le temps de résolution et la consommation sont tracés en fonction de la quantification de la grille choisie δx , figure 3-7.

Nb : Les calculs ont été effectués sur une machine équipée d'un processeur AMD Athlon 64 3,2 GHz équipé de 1Go de mémoire vive.

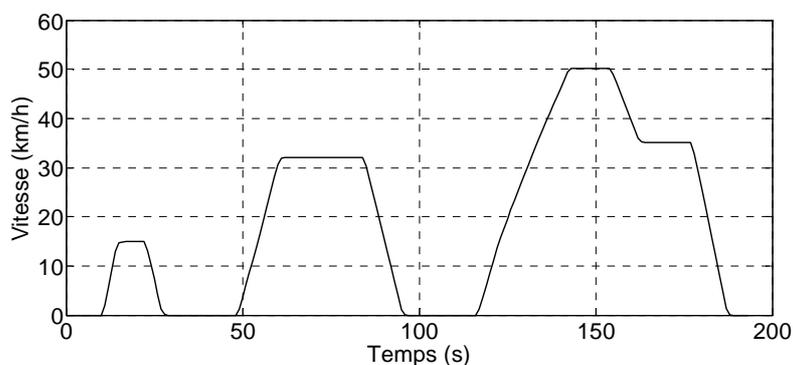


Figure 3-6 : Cycle de vitesse ECE.

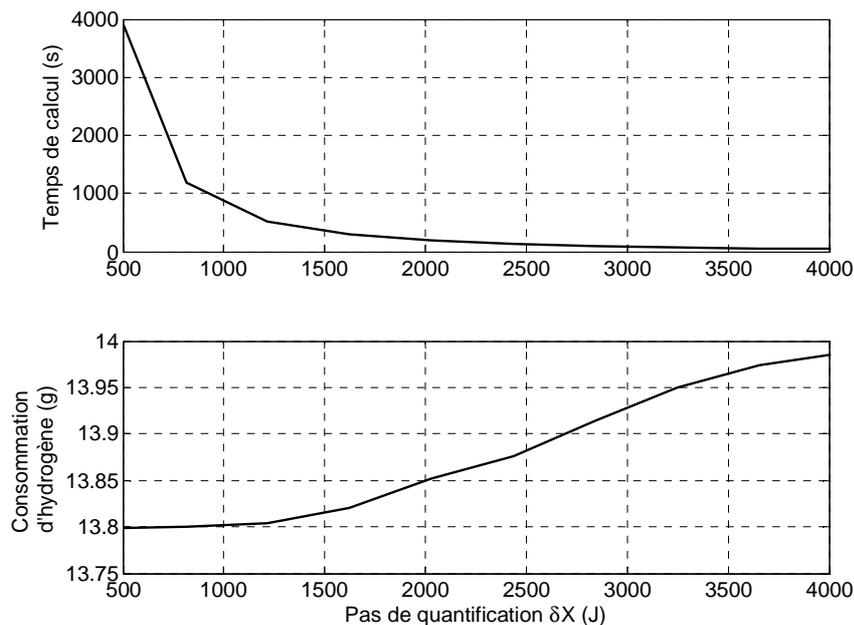


Figure 3-7 : Temps de calcul et consommation d'hydrogène en fonction de la précision sur l'état de charge (*configuration CV1*).

L'exemple illustre l'augmentation exponentielle du temps de calcul avec la diminution du pas de quantification δx . Même si la source secondaire d'énergie n'était composée que de 50 supercondensateurs de capacité totale $X_{\max} = 406 \text{ kJ}$, et le cycle de vitesse était relativement court (180 s), la durée des calculs est déjà très importante : une demi-heure pour un pas de calcul de $\delta x = 740 \text{ J}$. De manière évidente, pour des δx identiques, la durée dépend également de la capacité de la source d'énergie secondaire et, pour les configurations avec batterie, ils deviennent rapidement prohibitifs.

A titre d'illustration, les résultats de la figure 3-8 sont donnés pour la configuration suivante du véhicule :

Configuration CV2 :

Cycle CEN

Véhicule Berlingo

Système PAC de 40 kW

200 éléments de batterie Ni-MH (50 kW - 6,7 kWh)

Le paramétrage de l'algorithme de programmation dynamique est le suivant :

- période d'échantillonnage : $T_e = 1 s$;
- pas de quantification : $\delta x = 2366 J$.

Sur le même ordinateur que précédemment, la durée des calculs est supérieure à une journée. L'état de charge initial est de 60 % et la variation d'état de charge globale est $\Delta X = 0$. La consommation d'hydrogène obtenue est de 1,625 kg/100 km.

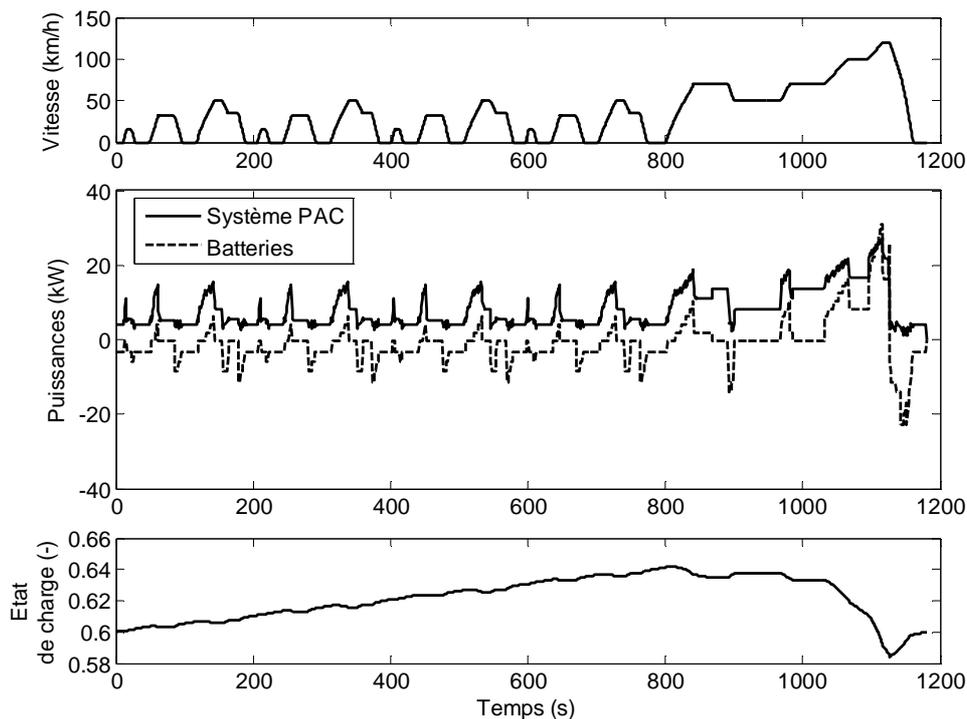


Figure 3-8 : Solution obtenue par programmation dynamique (*configuration CV2*).

Le principal inconvénient de la programmation dynamique reste le temps de calcul important pour obtenir une solution. Ce temps de calcul peut être réduit en diminuant la précision sur l'état (discrétisation moins fine), mais ceci entraîne une baisse de précision de la solution. Un compromis doit être fait entre précision des résultats et temps de calcul. La programmation dynamique reste toutefois une méthode de résolution numérique simple et facile à mettre en œuvre.

3.4. Approche par la théorie de la commande optimale

La théorie de la commande optimale a été utilisée pour la résolution de problème d'optimisation globale de véhicules hybrides /Delprat 2002/ /Sciarretta et Guzzella 2007/. On propose ici d'appliquer les principes de la commande optimale pour un véhicule à pile à combustible hybride.

3.4.1. Formulation du Hamiltonien et conditions d'optimalité

Dans un premier temps, afin de faciliter les explications, la contrainte (3.6) sur l'état de charge n'est pas prise en compte. Le problème d'optimisation considéré s'écrit donc :

Problème n°3 :

- Critère : Consommation d'hydrogène

$$J = \sum_{k=0}^N \dot{m}_{H_2} (P_{sysPAC} (k)) \cdot T_e \quad \text{Consommation d'hydrogène}$$

- Système :

$$X (k + 1) = X (k) + \tilde{Q} (P_{sysPAC} (k), X (k)) \cdot T_e \quad \text{Dynamique de la source secondaire}$$

- Contraintes :

$$\tilde{P}_{sysPAC_{min}} (k) \leq P_{sysPAC} (k) \leq \tilde{P}_{sysPAC_{max}} (k) \quad \text{Limites de puissance du système PAC}$$

$$\Delta X = X (N) - X (0) \quad \text{Variation globale de l'état de charge}$$

Classiquement, la contrainte égalitaire (3.11) décrivant la dynamique de la source secondaire d'énergie est introduite dans le critère (3.1) avec le paramètre de Lagrange λ pour former le Hamiltonien H /Borne et al 1990/ :

$$\forall k \in \{0 \dots N\}$$

$$H (k) = \dot{m}_{H_2} (P_{sysPAC} (k)) \cdot T_e - \lambda (k + 1) \cdot [X (k) + \tilde{Q} (P_{sysPAC} (k), X (k)) \cdot T_e] \quad (3.25)$$

Les conditions d'optimalités au premier ordre sont données par les dérivées partielles du Hamiltonien $\forall k \in \{0 \dots N\}$:

$$\frac{\partial H(k)}{\partial X(k)} = -\lambda(k) \quad (3.26)$$

$$\frac{\partial H(k)}{\partial P_{\text{sysPAC}}(k)} = 0 \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial^2 H(k)}{\partial P_{\text{sysPAC}}(k)^2} \geq 0 \quad (3.28)$$

La condition (3.26) fournit une expression du paramètre de Lagrange λ :

$$\lambda(k+1) = \lambda(k) \cdot \left(1 + \frac{\partial \tilde{Q}(P_{\text{sysPAC}}(k), X(k))}{\partial X(k)} \cdot T_e \right)^{-1} \quad (3.29)$$

Le paramètre de Lagrange $\lambda(\cdot)$ est exprimé par l'équation de récurrence (3.29), ce qui implique que la solution du problème d'optimisation dépend de la condition initiale $\lambda(0)$.

Pour évaluer le terme dérivé $\frac{\partial \tilde{Q}(P_{\text{sysPAC}}(k), X(k))}{\partial X(k)}$ de (3.29), la cartographie $Q(P_{\text{SSE}}, X)$ est

interpolée par des morceaux de paraboles /Delprat 2002/. Ces paraboles passent par les points de la cartographie :

$$\hat{Q}(P_{\text{SSE}}, X) = a_i \cdot X^2 + b_i \cdot X + c_i \quad (3.30)$$

d'où on obtient une expression de $\frac{\partial Q(P_{\text{SSE}}, X)}{\partial X}$ avec :

$$\frac{\partial \hat{Q}(P_{\text{SSE}}, X)}{\partial X} = 2 \cdot a_i \cdot X + b_i \quad (3.31)$$

A titre d'exemple, la figure 3-9 représente une « tranche » de la cartographie $Q(P_{\text{SSE}}, X)$ pour

une puissance batteries $P_{\text{SSE}} = 30 \text{ kW}$ et la dérivée $\frac{\partial \hat{Q}(P_{\text{SSE}}, X)}{\partial X}$ correspondante.

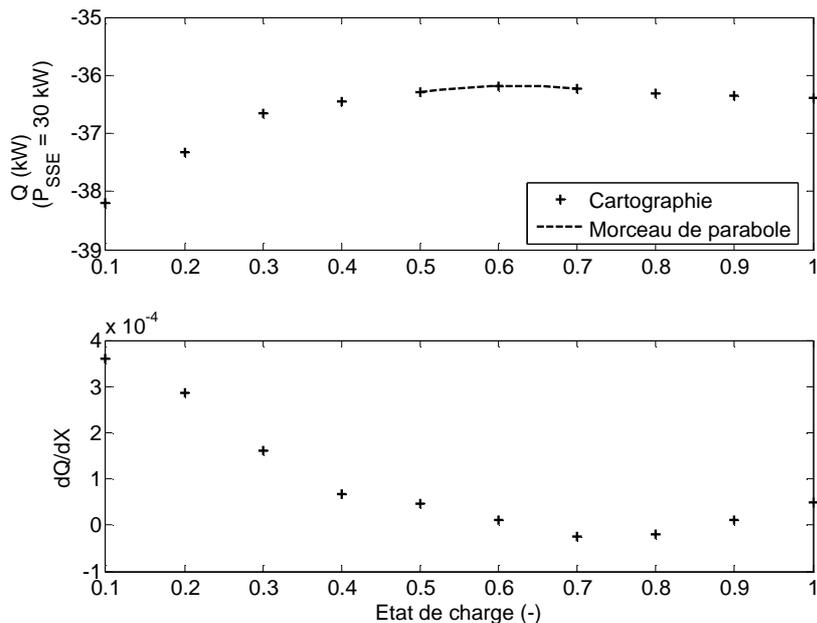


Figure 3-9 : Cartographie $Q(\cdot)$ pour $P_{SSE} = 30$ kW (haut) et résultat de la dérivée partielle $\frac{\partial \hat{Q}(\cdot)}{\partial X}$ (bas).

Avec cette méthode, une cartographie complète de la dérivée $\frac{\partial \hat{Q}(P_{SSE}, X)}{\partial X}$ est calculée. La

cartographie $\frac{\partial \tilde{Q}(P_{sysPAC}, X)}{\partial X}$ est finalement obtenue par changement de variables. Nous ne

changerons pas de notation dans ce cas (\hat{Q} devant remplacer en toute rigueur \tilde{Q}), étant donné qu'il n'y a pas d'ambiguïtés. En utilisant (3.9) :

$$\frac{\partial \tilde{Q}(P_{sysPAC}, X)}{\partial X} = \frac{\partial Q(P_{SSE}, X)}{\partial X} = \frac{\partial Q(P_{mot} - P_{sysPAC}, X)}{\partial X} \quad (3.32)$$

La valeur initiale $\lambda(0)$ fixée, $\lambda(k+1)$ peut être calculée par (3.29) et la commande optimale est obtenue numériquement par minimisation du Hamiltonien H à chaque instant d'échantillonnage $\forall k \in \{0 \dots N\}$:

$$P_{sysPAC}(k) = \underset{\tilde{P}_{sysPAC_{min}}(k) \leq P_{sysPAC}(k) \leq \tilde{P}_{sysPAC_{max}}(k)}{\operatorname{argmin}} (H(k)) \quad (3.33)$$

3.4.2. Influence de la condition initiale $\lambda(0)$

Les solutions optimales ne dépendent plus que d'un seul paramètre : la valeur initiale du paramètre de Lagrange $\lambda(0)$ /Delprat et al. 2004/. On se ramène donc à un problème d'optimisation dans \mathbb{R} . Pour étudier l'influence de $\lambda(0)$, la **configuration CV2** est utilisée et l'état de charge initial des batteries est fixé à 60 %.

Nb : Dans tout ce chapitre, les résultats de simulations sont obtenus en appliquant au modèle complet de simulation décrit au chapitre n°2 les commandes calculées par l'algorithme de commande optimale.

La figure 3-10 présente la répartition de puissance optimale et l'évolution de l'état de charge pour une « faible » valeur de $\lambda(0) = 1,2 \times 10^{-5}$ (faible s'entend ici au sens du cycle utilisé et du modèle choisi). L'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule provient majoritairement du pack de batterie, ce qui amène une diminution globale de l'état de charge au cours du cycle (décharge de 32,5 %). Le système pile à combustible est peu sollicité et la consommation d'hydrogène est faible (0,42 kg/100 km).

La figure 3-11 présente la répartition de puissance optimale et l'évolution de l'état de charge pour une valeur « élevée » de $\lambda(0) = 2,3 \times 10^{-5}$. Le système pile à combustible assure majoritairement la propulsion du véhicule et la recharge des batteries, ce qui amène à une augmentation globale de l'état de charge au cours du cycle (recharge de 34 %). La consommation d'hydrogène est élevée (3,41 kg/100 km).

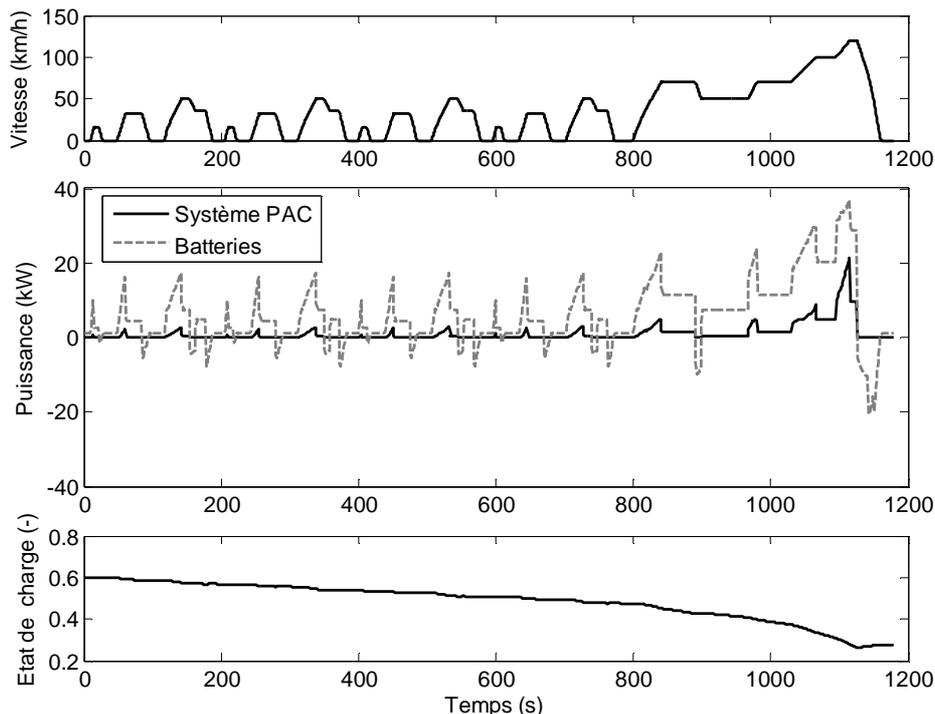


Figure 3-10 : Solution de la commande optimale avec $\lambda(0) = 1,2 \times 10^{-5}$ (configuration CV2).

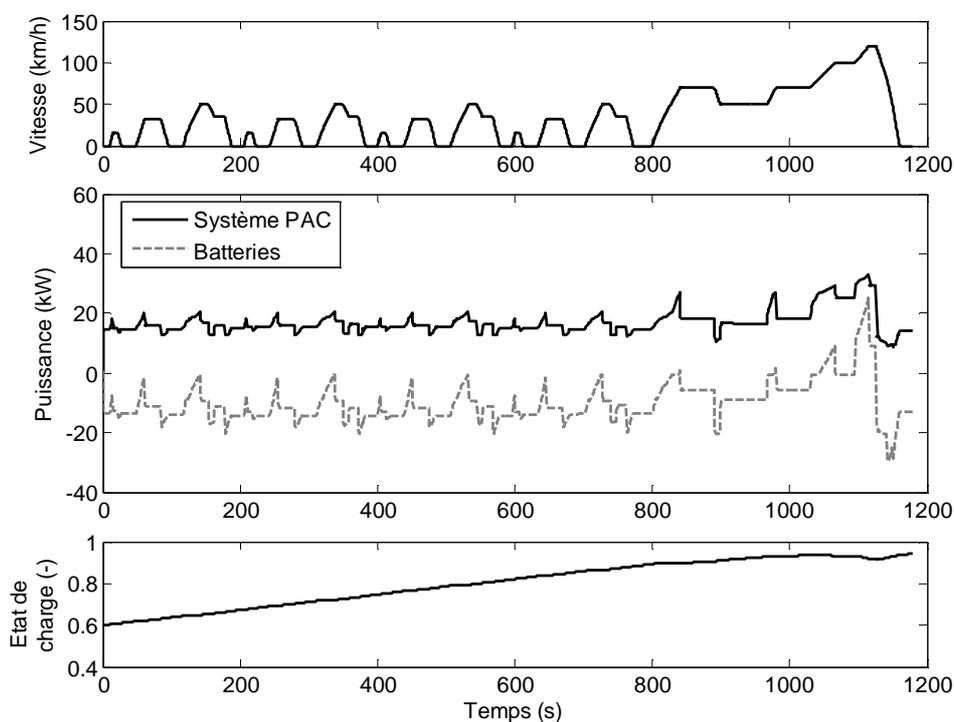


Figure 3-11 : Solution de la commande optimale avec $\lambda(0) = 2,3 \times 10^{-5}$ (configuration CV2).

De manière générale, la valeur de la condition initiale $\lambda(0)$ influence la variation globale de l'état charge ΔX en sollicitant plus ou moins le système pile à combustible. La variation

globale de l'état de charge ΔX et la consommation d'hydrogène en fonction de $\lambda(0)$ sont tracés figure 3-12.

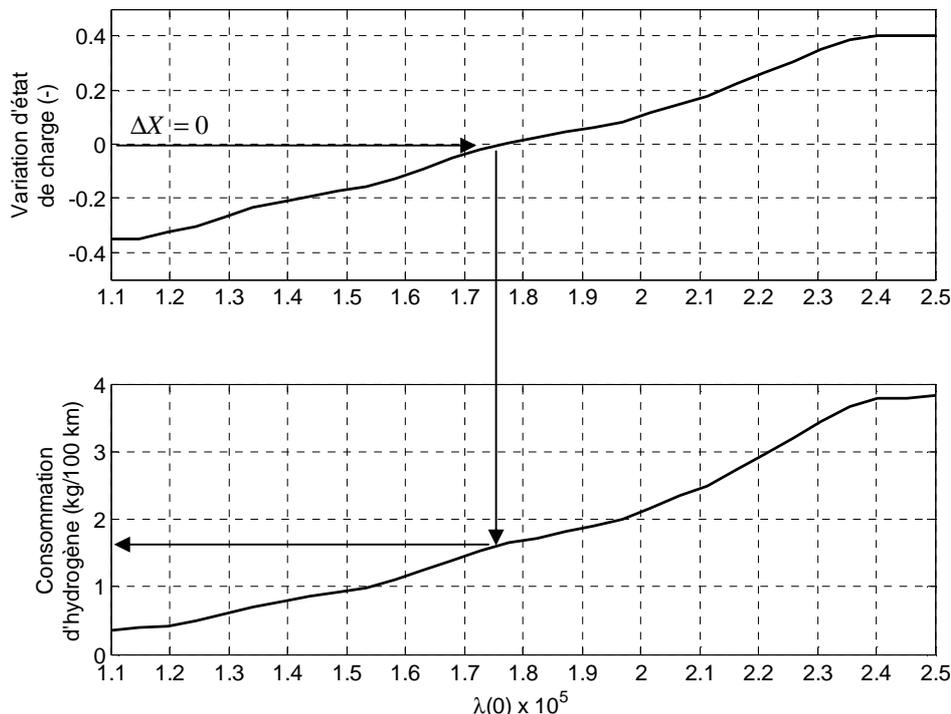


Figure 3-12 : Variation de l'état de charge et consommation d'hydrogène en fonction de $\lambda(0)$.

Une solution remarquable est obtenue pour une variation globale de l'état de charge nulle $\Delta X = 0$, figure 3-12. Effectivement, dans ce cas, la source secondaire est utilisée en tant que tampon énergétique. L'énergie nécessaire à la propulsion du véhicule est alors globalement fournie par l'hydrogène et la consommation d'hydrogène peut être comparée, par exemple, à celle d'un véhicule à pile à combustible (non-hybride).

3.4.3. Algorithme de résolution du problème d'optimisation globale

Pour résoudre complètement le **Problème n° 3**, il ne reste plus qu'à déterminer la valeur de $\lambda(0)$ telle que la contrainte sur l'état de charge (3.8) soit satisfaite. Cependant, il n'est pas possible d'obtenir une expression analytique de $\lambda(0)$ à partir des conditions d'optimalité (3.26) et (3.27). Une recherche de $\lambda(0)$ par dichotomie est utilisée ; le critère d'arrêt de l'algorithme, figure 3-13, fait intervenir un seuil de précision ε :

$$|X(N) - X(0) - \Delta X| \leq \varepsilon \quad (3.34)$$

La convergence d'un algorithme aussi simple ne demande alors généralement qu'une dizaine d'itération pour une précision ε « acceptable ».

La dichotomie se justifie dans notre cas dans la mesure où toutes les fonctions $\Delta X = f(\lambda(0))$ sont monotones croissantes. Néanmoins, il n'y a pas de preuve mathématique que ces fonctions $f(\cdot)$ aient toujours cette « sympathique » propriété. Dans le cas d'une fonction à plusieurs minimums locaux, il faudrait évidemment avoir recours à une technique d'optimisation plus « sophistiquée ». Notons qu'une optimisation dans \mathbb{R} présente de toute façon un avantage considérable par rapport au problème initial dans \mathbb{R}^N , N étant le nombre d'échantillons pour un cycle de vitesse donné.

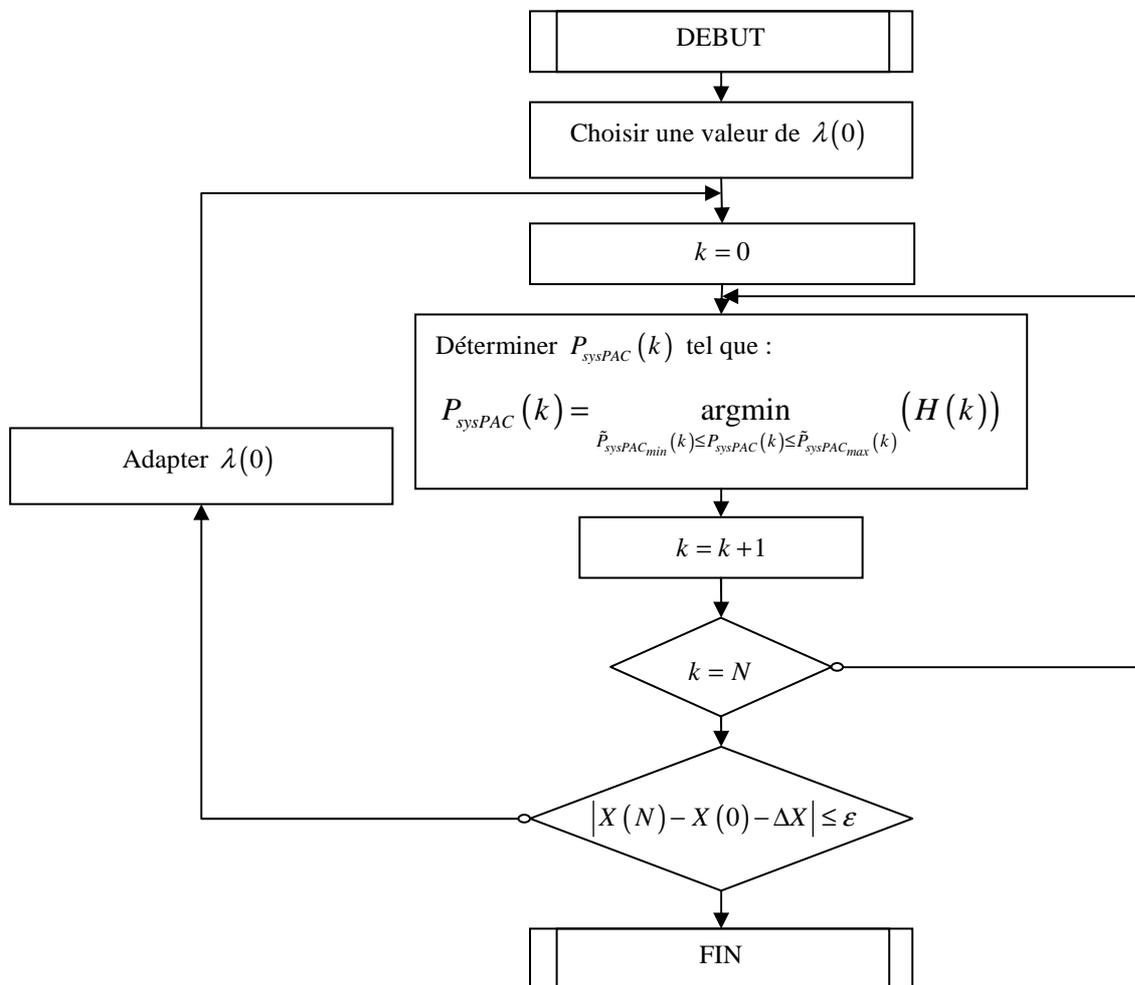


Figure 3-13 : Algorithme de résolution du problème d'optimisation.

Les résultats de la figure 3-14 ont été calculés pour la **configuration CV2** du véhicule, une variation globale d'état de charge $\Delta X = 0$ et une précision ε de 0,1 %. La consommation d'hydrogène est de 1,62 kg/100 km. Le temps de calcul est $t_{calcul} \approx 30$ s.

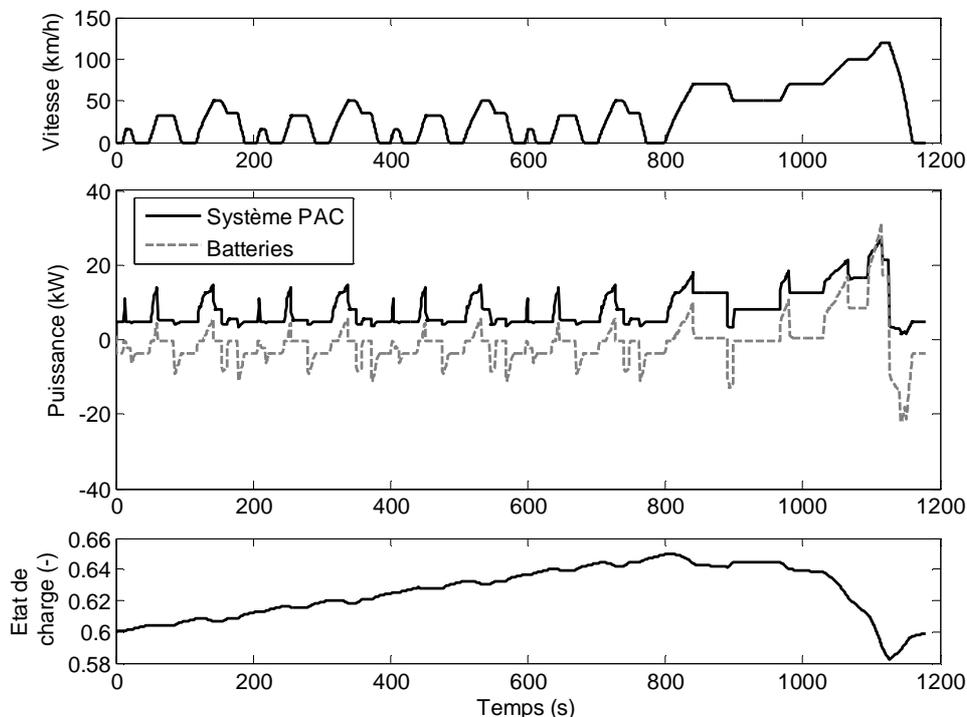


Figure 3-14 : Solution de la commande optimale pour $\Delta X = 0$ et une précision ε de 0,1 % (**configuration CV2**).

Dans la résolution du problème d'optimisation globale, la contrainte sur les limites de l'état de charge (3.6) n'a pas été considérée. Dans les exemples précédents figure 3-10, figure 3-11 et figure 3-14, il apparaît que cette contrainte n'est jamais activée car la batterie dispose d'une réserve d'énergie importante par rapport au cycle. Toutefois, si ce n'est pas le cas, par exemple, sur des cycles aussi courts, en considérant une source secondaire de quantité d'énergie plus faible (par exemple des supercondensateurs) ces bornes peuvent être facilement atteintes. A titre d'illustration, un véhicule équipé d'un ensemble de 200 supercondensateurs est considéré :

Configuration CV3 :

Cycle CEN

Véhicule Berlingo

Système PAC de 40 kW

200 supercondensateurs (100 kW - 451 Wh)

Du fait de la faible énergie que peuvent contenir les supercondensateurs, ceux-ci atteignent rapidement leur charge maximale figure 3-15 et le freinage récupératif n'est plus possible. Dans ce cas, afin de ne pas les détériorer, il est nécessaire de saturer les commandes appliquées. La consommation d'hydrogène obtenue (1,77 kg/100 km) n'est alors plus optimale. Il est nécessaire d'introduire la contrainte (3.6) dans le **Problème n°3**.

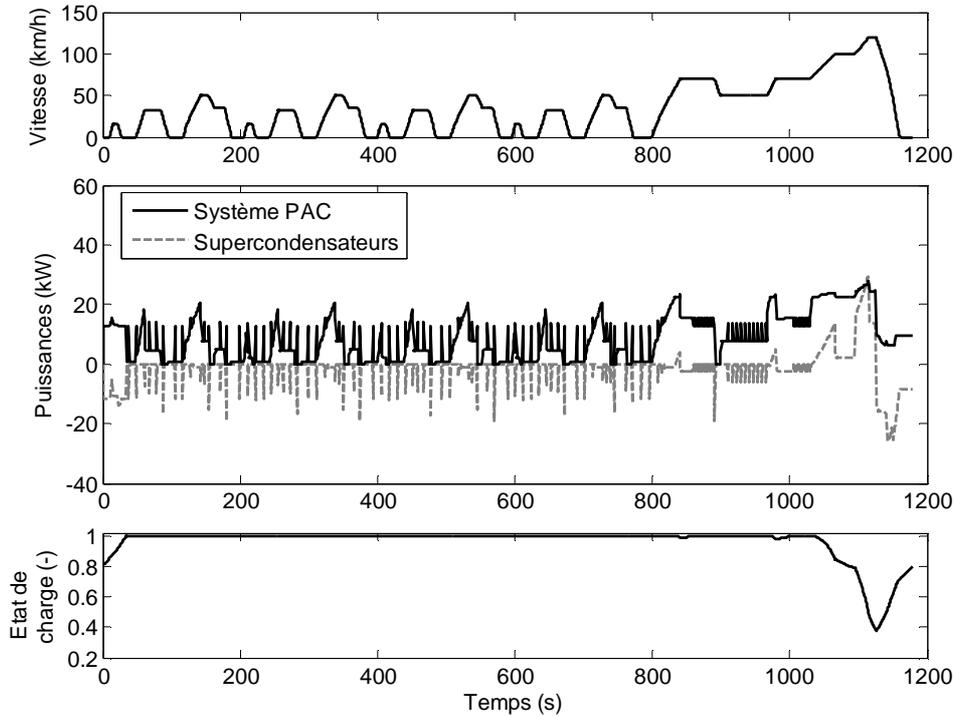


Figure 3-15 : Solution de la commande optimale pour une variation d'état de charge nulle (*configuration CV3*). La contrainte sur l'état n'est pas considérée dans le problème d'optimisation.

3.4.4. Prise en compte de la contrainte sur l'état de charge

Une manière simple d'introduire la contrainte sur l'état est d'utiliser une fonction de pénalité $p(X)$ /Bergonioux 2001/ /Trélat 2005/ dans le critère à minimiser (3.1) via un coefficient de pondération r :

$$J' = \sum_{k=0}^N \left[\dot{m}_{H_2} (P_{sysPAC}(k)) \cdot T_e + r \cdot p(X(k)) \right] \quad (3.35)$$

La fonction de pénalité introduit une consommation d'hydrogène additionnelle « virtuelle » lorsque l'état de charge s'approche de ses bornes, figure 3-16. Ainsi, les valeurs d'état X proches des valeurs limites X_{min} ou X_{max} ont tendance à être rejetées par l'algorithme

d'optimisation globale. La fonction de pénalité est de classe C^1 . Parmi l'ensemble des fonctions envisageables, une fonction quadratique par morceaux est utilisée :

$$p(X) = \begin{cases} \left[\frac{X(k) - (X_{min} + \delta)}{X_{max}} \right]^2 & \text{si } X(k) < (X_{min} + \delta) \\ \left[\frac{X(k) - (X_{max} - \delta)}{X_{max}} \right]^2 & \text{si } X(k) > (X_{max} - \delta) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.36)$$

Dans (3.36) et (3.42), le paramètre δ permet d'ajuster la zone d'influence de la fonction de pénalité. L'état de charge des supercondensateurs est borné entre 25 % et 100 % et le paramètre δ est fixé à 5 %, ce qui signifie que la fonction de pénalité n'a pas d'effet entre 30 % et 95 % d'état de charge. La fonction de pénalité résultante est donnée figure 3-16.

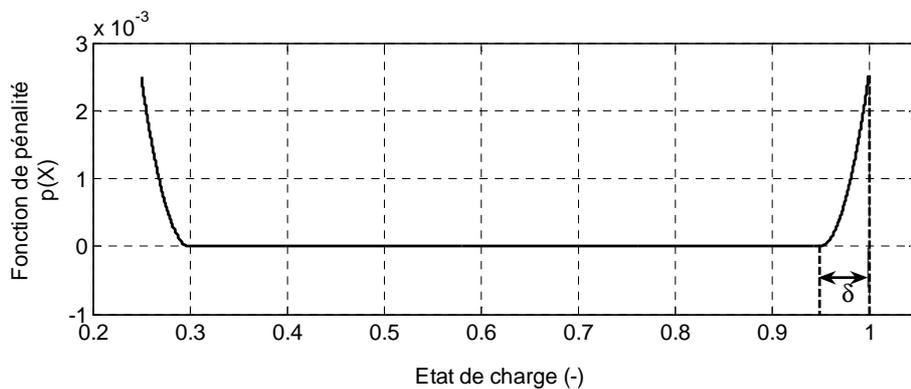


Figure 3-16 : Fonction de pénalité $p(X)$.

Le nouveau problème d'optimisation est donc :

Problème n°4 :

- Critère :

$$J' = \sum_{k=0}^N \left[\dot{m}_{H_2} (P_{sysPAC}(k)) \cdot T_e + r \cdot p(X(k)) \right] \quad \text{Consommation d'hydrogène + pénalité}$$

- Système :

$$X(k+1) = X(k) + \tilde{Q}(P_{sysPAC}(k), X(k)) \cdot T_e \quad \text{Dynamique de la source secondaire}$$

- Contraintes :

$$\tilde{P}_{sysPAC_{min}}(k) \leq P_{sysPAC}(k) \leq \tilde{P}_{sysPAC_{max}}(k) \quad \text{Limites de puissance du système PAC}$$

$$\Delta X = X(N) - X(0) \quad \text{Variation globale de l'état de charge}$$

Le nouveau Hamiltonien s'écrit $\forall k \in \{0 \dots N\}$:

$$H'(k) = \dot{m}_{H_2}(P_{\text{sysPAC}}(k)) \cdot T_e + r \cdot p(X(k)) - \lambda(k+1) \cdot [X(k) + \tilde{Q}(P_{\text{sysPAC}}(k), X(k)) \cdot T_e] \quad (3.37)$$

Les nouvelles conditions d'optimalité sont $\forall k \in \{0 \dots N\}$:

$$\frac{\partial H'(k)}{\partial X(k)} = -\lambda(k) \quad (3.38)$$

$$\frac{\partial H'(k)}{\partial P_{\text{sysPAC}}(k)} = 0 \quad (3.39)$$

$$\frac{\partial^2 H'(k)}{\partial P_{\text{sysPAC}}(k)^2} \geq 0 \quad (3.40)$$

Avec (3.38), l'équation de récurrence du paramètre de Lagrange $\lambda(k+1)$ devient :

$$\lambda(k+1) = \left(\lambda(k) + r \cdot \frac{\partial p(X(k))}{\partial X(k)} \right) \cdot \left(1 + \frac{\partial \tilde{Q}(P_{\text{sysPAC}}(k), X(k))}{\partial X(k)} \cdot T_e \right)^{-1} \quad (3.41)$$

La dérivée partielle de la fonction de pénalité est :

$$\frac{\partial p(X)}{\partial X} = \begin{cases} 2 \cdot \left(\frac{X(k) - (X_{\min} + \delta)}{X_{\max}^2} \right) & \text{si } X(k) < (X_{\min} + \delta) \\ 2 \cdot \left(\frac{X(k) - (X_{\max} - \delta)}{X_{\max}^2} \right) & \text{si } X(k) > (X_{\max} - \delta) \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.42)$$

Le paramètre de Lagrange étant défini par (3.41), la commande optimale peut être calculée par minimisation du Hamiltonien $\forall k \in \{0 \dots N\}$:

$$P_{\text{sysPAC}}(k) = \underset{\tilde{P}_{\text{sysPAC}_{\min}}(k) \leq P_{\text{sysPAC}}(k) \leq \tilde{P}_{\text{sysPAC}_{\max}}(k)}{\text{argmin}} (H'(k)) \quad (3.43)$$

L'algorithme de résolution de l'optimisation globale reste similaire à celui présenté sans contrainte sur l'état figure 3-13. Il est nécessaire de déterminer une valeur adéquate du coefficient de pondération r . Pour la **configuration CV3** du véhicule, au vu de la figure 3-17, il apparaît que la consommation d'hydrogène atteint une valeur minimale pour $r \geq 0,4$. On observe également dans ce cas, que la quantité d'énergie cinétique récupérée est maximale. Même si des valeurs élevées du coefficient $r \geq 0,4$ semblent garantir une consommation

d'hydrogène minimale, des problèmes de stabilité numérique peuvent apparaître pour des valeurs trop importantes, en particulier la convergence de l'algorithme de sélection de $\lambda(0)$ peut devenir relativement lente.

La méthode de réglage empirique proposée consiste à fixer $r=0$ puis à l'augmenter progressivement tant que la quantité d'énergie cinétique récupérée sur le cycle complet augmente.

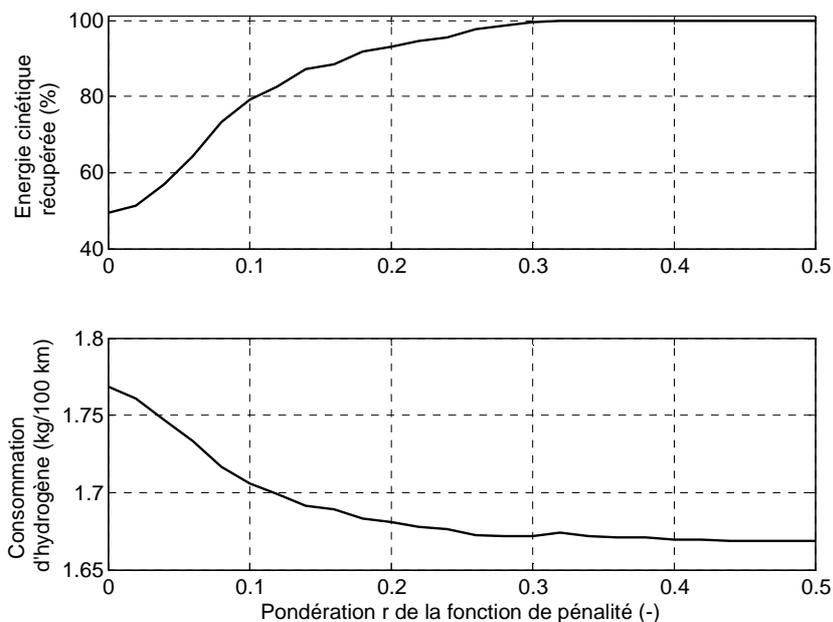


Figure 3-17 : Énergie cinétique récupérée et consommation d'hydrogène en fonction de la pondération r (*configuration CV3*).

Les résultats de la figure 3-18 ont été calculés pour la *configuration CV3* du véhicule, une variation globale d'état de charge $\Delta X = 0$ et une pondération $r = 0,4$. L'état de charge n'est plus saturé au cours du cycle ce qui permet une meilleure récupération de l'énergie cinétique lors des freinages. La consommation d'hydrogène est de 1,67 kg/100 km contre 1,77 kg/100 km, ce qui représente un gain de 6 %.

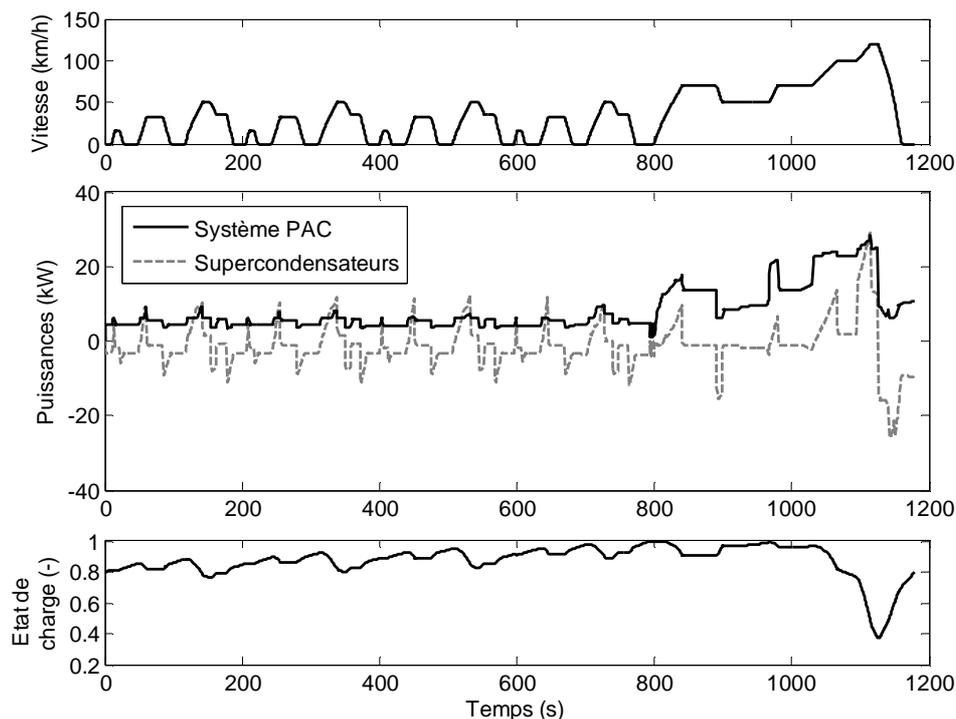


Figure 3-18 : Solution de la commande optimale pour variation d'état de charge nulle (*configuration CV3*). La contrainte sur l'état est considérée dans l'algorithme d'optimisation.

Afin de valider les résultats obtenus en utilisant la commande optimale avec contraintes sur l'état, la programmation dynamique est appliquée à la même configuration du véhicule (*configuration CV3*). Les écarts observés entre les deux algorithmes sur la variable de décision et l'état de charge sont donnés dans le tableau 3-1.

	Écart moyen	Écart efficace (RMS)		Temps de calcul
Variable de décision P_{sysPAC}	14,8 W	845 W	Programmation dynamique	> 1 journée
État de charge	1,7 %	2 %	Commande optimale	< 1min

Tableau 3-1 : Écarts obtenus par programmation dynamique et commande optimale (*configuration CV3*).

La consommation d'hydrogène est de 1,6686 kg/100km en utilisant l'algorithme de programmation dynamique et est de 1,6685 kg/100km en utilisant l'algorithme de commande optimale, soit un écart inférieur à 0,006 %. Les résultats obtenus confortent la validité de l'approche par commande optimale avec une fonction de pénalité. Par contre, au niveau temps de calculs les chiffres tableau 3-1 parlent d'eux-mêmes.

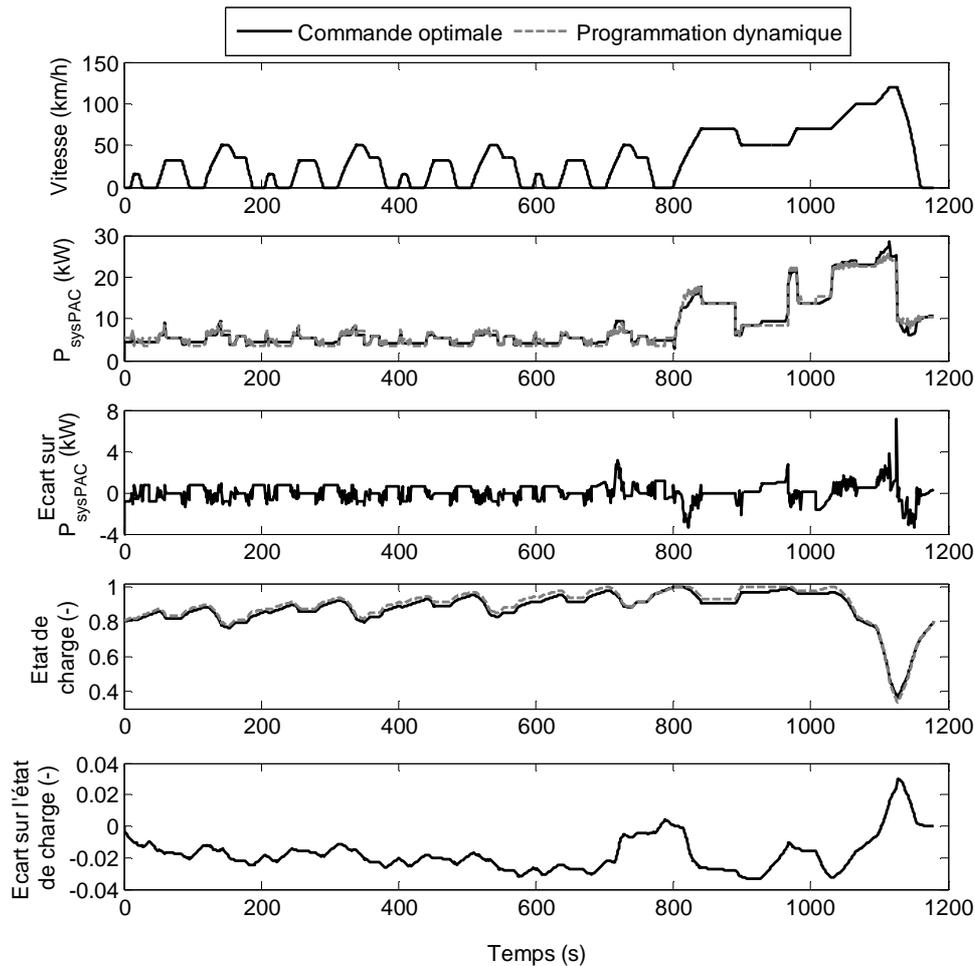


Figure 3-19 : Comparaison des résultats obtenus avec la programmation dynamique et la commande optimale (*configuration CV3*).

3.4.5. Prise en compte de la dynamique du système PAC

La modélisation utilisée repose principalement sur des modèles statiques et il est supposé que seuls la source secondaire d'énergie et le véhicule ont des dynamiques significatives dans un contexte d'étude énergétique. Cependant, un système pile à combustible n'est pas capable de délivrer instantanément sa puissance maximale principalement en raison du temps de réponse de son circuit d'alimentation en air et des problèmes d'asphyxie de la PAC en oxygène.

Les performances dynamiques moyennes des systèmes pile à combustible sont généralement caractérisées par leur temps de montée $T_{10\% \rightarrow 90\%}$ minimum. Le temps $T_{10\% \rightarrow 90\%}$ correspond à la durée nécessaire au système PAC pour évoluer de 10% à 90% de sa puissance maximale. Une manière simple de prendre en compte cette limite consiste à limiter le taux de variation $\Delta P_{\text{sysPAC}}(k)$ de la puissance du système PAC :

$$-\overline{\Delta P}_{\text{sysPAC}} \leq \Delta P_{\text{sysPAC}}(k) \leq \overline{\Delta P}_{\text{sysPAC}} \quad (3.44)$$

avec le taux de variation de la puissance :

$$\Delta P_{\text{sysPAC}}(k) = \frac{P_{\text{sysPAC}}(k) - P_{\text{sysPAC}}(k-1)}{T_e} \quad (3.45)$$

$$\text{et } \overline{\Delta P}_{\text{sysPAC}} = \frac{90\% \cdot P_{\text{sysPAC}_{\text{max}}} - 10\% \cdot P_{\text{sysPAC}_{\text{max}}}}{T_{10\% \rightarrow 90\%}} \quad (3.46)$$

Il est possible d'intégrer la contrainte (3.44) dans le problème d'optimisation globale en limitant à chaque itération l'espace des valeurs admissibles pour la variable de décision

$P_{\text{sysPAC}}(k)$:

$$P_{\text{sysPAC}}(k-1) - \overline{\Delta P}_{\text{sysPAC}} \cdot T_e \leq P_{\text{sysPAC}}(k) \leq P_{\text{sysPAC}}(k-1) + \overline{\Delta P}_{\text{sysPAC}} \cdot T_e \quad (3.47)$$

Les solutions obtenues dans ce cas ne sont plus optimales. L'algorithme de résolution reste identique à l'exception de (3.33) qui devient :

$$\forall k \in \{0 \dots N\},$$

$$P_{\text{sysPAC}}(k) = \arg \min_{P_{\text{sysPAC}}(k) \in \Upsilon_k} (H(k)) \quad (3.48)$$

$$\text{avec } \Upsilon_k = \left[\tilde{P}_{\text{sysPAC}_{\text{min}}}(k), \tilde{P}_{\text{sysPAC}_{\text{max}}}(k) \right] \cap \left[P_{\text{sysPAC}}(k-1) - \overline{\Delta P}_{\text{sysPAC}} \cdot T_e, P_{\text{sysPAC}}(k-1) + \overline{\Delta P}_{\text{sysPAC}} \cdot T_e \right]$$

Pour illustrer l'influence de la dynamique du système PAC, la **configuration CV2** du véhicule est considérée. La figure 3-20 et la figure 3-21 donnent les résultats de la commande optimale dans deux cas :

- le premier en ne considérant pas le taux de variation limite de la puissance (3.46) ;
- l'autre en considérant un temps de montée $T_{10\% \rightarrow 90\%}$ de 60 s. La valeur a été volontairement exagérée pour « caricaturer » l'effet de la dynamique.

Il apparaît un effet « filtrant » sur la valeur de la variable de décision P_{sysPAC} (figure 3-20) ; l'allure globale du profil des puissances reste identique tout comme l'évolution de l'état de charge.

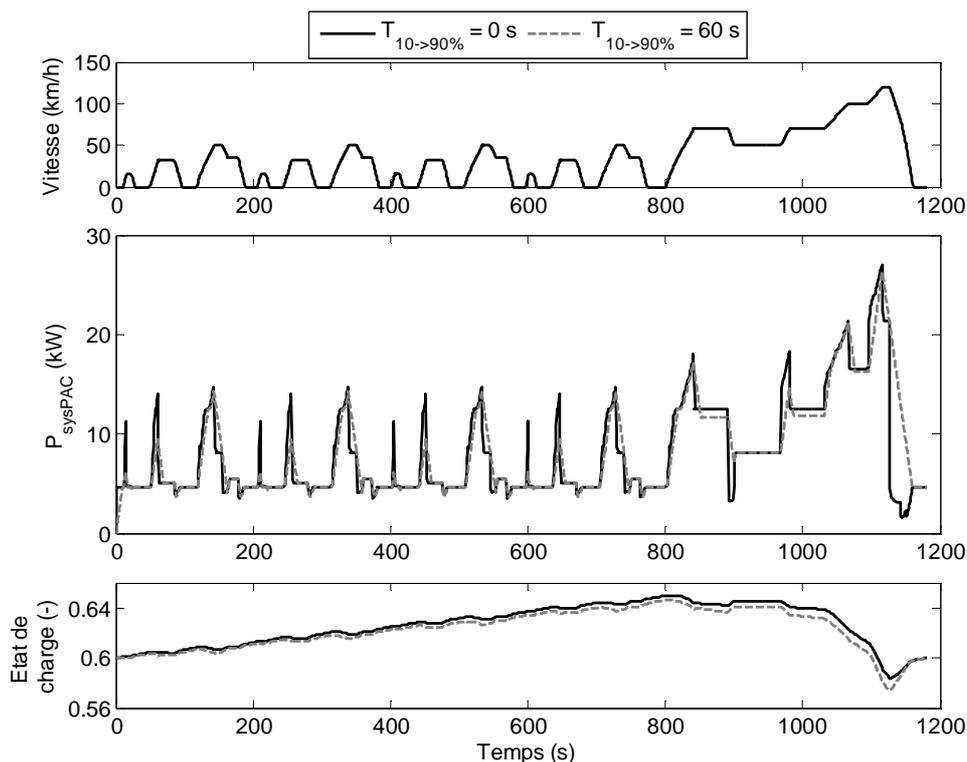


Figure 3-20 : Solution de la commande optimale pour $\Delta X = 0$ pour $T_{10\% \rightarrow 90\%} = 0\text{ s}$ et $T_{10\% \rightarrow 90\%} = 60\text{ s}$ (*configuration CV2*).

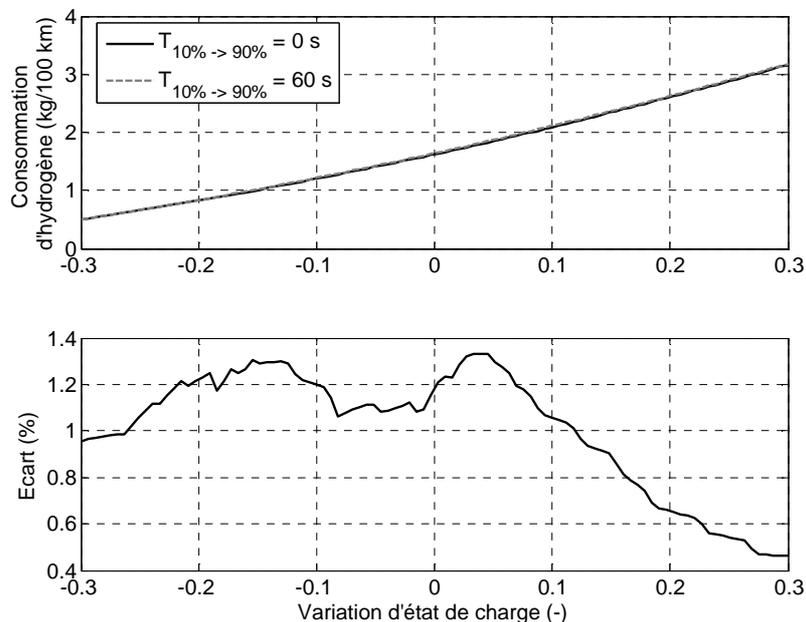


Figure 3-21 : Consommation d'hydrogène en fonction de la variation globale d'état de charge pour $T_{10\% \rightarrow 90\%} = 0\text{ s}$ et $T_{10\% \rightarrow 90\%} = 60\text{ s}$ (*configuration CV2*).

Sous la contrainte (3.47), la consommation d'hydrogène n'est détériorée que de 1,3 % au maximum sur le cycle CEN (figure 3-21). Des résultats similaires ont été obtenus sur d'autres cycles de vitesse. En résumé, dans une configuration hybride, la limitation du temps de montée

en puissance système PAC semble avoir peu d'influence sur la consommation d'hydrogène (comme observé dans /Suh et Stefanopoulou 2006/). Ceci s'explique car la dynamique du système PAC est beaucoup plus rapide que celles considérées. En toute rigueur, seule une résolution exacte du **Problème n°1** d'optimisation globale utilisant la contrainte (3.47) (paramètres de Lagrange) peut confirmer cette remarque.

3.5. Stratégie de commande temps réel basée sur la commande optimale

NB : La configuration CV2 est retenue pour les illustrations de cette section.

Les résultats obtenus par les algorithmes de commande optimale sont limités à la simulation car il est nécessaire de connaître l'intégralité du cycle de vitesse pour pouvoir résoudre les problèmes d'optimisation. Les algorithmes précédents peuvent être modifiés pour le pilotage en temps réel d'un véhicule, cependant les résultats obtenus ne seront plus optimaux. Deux aspects sont à considérer pour aboutir à une stratégie temps réel :

- Contrôle de l'état de charge :

Ce dernier doit rester « éloigné » de ses limites. D'une part, la source secondaire doit disposer en permanence d'une réserve d'énergie suffisante pour assister efficacement le système PAC ; d'autre part l'état de charge ne doit pas être trop élevé pour permettre de récupérer l'énergie cinétique de freinage. Généralement, l'état de charge est régulé autour d'une valeur de consigne constante.

- Prise en compte du parcours routier :

L'intégralité du parcours routier doit être connue pour effectuer le calcul de la solution optimale. Dans une application temps réel, il est donc nécessaire de pouvoir « prédire l'avenir ». Cette prédiction de l'évolution temporelle de la demande de puissance sur un horizon défini est difficile voire impossible. Dans le cas où aucune connaissance n'est disponible a priori, une solution est alors de « prédire », via une extrapolation, uniquement les caractéristiques minimales nécessaires aux calculs.

Par exemple, /Lin et al. 2004/ proposent, en fonction des états actuels et passés du véhicule, d'estimer si le véhicule est plutôt en usage urbain, périurbain ou autoroutier et d'adapter la commande en conséquence.

3.5.1. Approche utilisée

Dans l'algorithme d'optimisation globale, pour un cycle de vitesse et un état de charge initial donnés, la valeur du paramètre de Lagrange $\lambda(0)$ est déterminée en fonction de l'état de charge final souhaité X_c . On rappelle que cette dernière permet alors de déterminer l'ensemble de la solution optimale.

Dans le cas d'une application temps réel, le parcours futur du véhicule est inconnu, l'état final également et donc le problème ne peut être résolu. Pour une valeur $\lambda(0)$ fixée, rien ne garantit que l'état de charge n'atteigne pas sa limite maximale ou minimale.

Pour éviter une dérive trop importante de l'état de charge, une solution sous-optimale consiste alors à adapter le paramètre de Lagrange $\hat{\lambda}$ en temps réel, figure 3-22. La minimisation du Hamiltonien H devient locale et ne se fait plus sur l'ensemble du cycle.

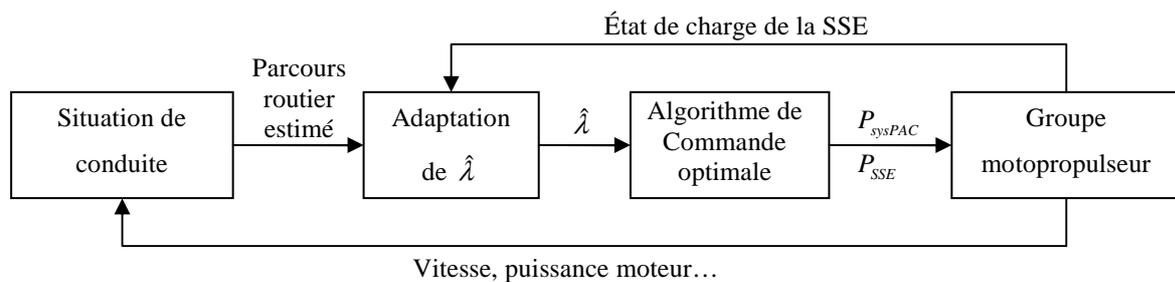


Figure 3-22 : Schéma de principe de la stratégie de commande temps réel basée sur la commande optimale.

3.5.2. Estimation du paramètre de Lagrange $\hat{\lambda}$ sur un cycle a priori connu

L'objectif de cette section est d'aboutir à une solution simplifiée du problème d'optimisation globale. L'idée est de définir les informations minimales nécessaires pour déterminer la valeur de $\hat{\lambda}(0)$ permettant d'atteindre un état de charge final souhaité X_c . De plus, la durée des calculs est primordiale car il faudra à un moment donné évoluer vers une résolution « en ligne » pour la stratégie de commande temps réel. Deux hypothèses sont successivement retenues.

Hypothèse 1 : La cartographie $Q(P_{SSE}(k), X(k))$ utilisée pour le calcul de l'état de charge (3.3) est calculée pour un état de charge moyen X_{moy} . Ceci revient à considérer que le rendement en charge en décharge de la source secondaire d'énergie est « globalement » indépendant de l'état de charge.

Selon l'**Hypothèse 1**, on remplace (3.3) par :

$$X(k+1) = X(k) + Q|_{X_{moy}}(P_{SSE}(k)) \cdot T_e \quad (3.49)$$

où $Q|_{X_{moy}}(P_{SSE}(k))$ représente $Q(P_{SSE}(k), X(k))$ restreinte à $X(k) = X_{moy}$ ($X_{moy} = 60\% \times X_{max}$ pour les batteries Ni-MH) et $\tilde{Q}|_{X_{moy}}(P_{sysPAC}(k))$ son expression par rapport à la variable de décision P_{sysPAC} .

Le Hamiltonien est réécrit :

$$\forall k \in \{0 \dots N\}, H(k) = \dot{m}_{H_2}(P_{sysPAC}(k)) \cdot T_e - \hat{\lambda}(k+1) \cdot \left[X(k) + \tilde{Q}|_{X_{moy}}(P_{sysPAC}(k)) \cdot T_e \right] \quad (3.50)$$

avec les conditions d'optimalité :

$$\frac{\partial H(k)}{\partial X(k)} = -\hat{\lambda}(k) \quad (3.51)$$

$$\frac{\partial H(k)}{\partial P_{sysPAC}(k)} = 0 \quad (3.52)$$

$$\frac{\partial^2 H(k)}{\partial P_{sysPAC}(k)^2} \geq 0 \quad (3.53)$$

(3.51) implique que le paramètre Lagrange est constant sur l'intégralité du cycle de vitesse :

$$\hat{\lambda}(k) = \hat{\lambda}(0) \quad (3.54)$$

Avec la condition (3.54), l'argument minimum du Hamiltonien (3.50) correspond à l'argument minimum de la quantité suivante :

$$L(k) = \dot{m}_{H_2}(P_{sysPAC}(k)) - \hat{\lambda}(0) \cdot \tilde{Q}|_{X_{moy}}(P_{sysPAC}(k)) \quad (3.55)$$

Les valeurs de la variable de décision $\hat{P}_{sysPAC}(k)$ sont donc obtenues par minimisation de (3.55) :

$$\forall k \in \{0 \dots N\}, \hat{P}_{sysPAC}(k) = \underset{\tilde{P}_{sysPACmin}(k) \leq P_{sysPAC}(k) \leq \tilde{P}_{sysPACmax}(k)}{\operatorname{argmin}} (L(k)) \quad (3.56)$$

On remarque que dans la formulation (3.55), la variable de décision $\hat{P}_{sysPAC}(k)$ est uniquement fonction de la puissance moteur $P_{mot}(k)$ et du paramètre $\hat{\lambda}(0)$ et indépendante de son évolution passée. Il est donc possible d'obtenir une cartographie de l'argument minimum de (3.56). Elle est notée $\Pi(P_{mot}(k), \hat{\lambda}(0)) = \underset{\tilde{P}_{sysPACmin}(k) \leq P_{sysPAC}(k) \leq \tilde{P}_{sysPACmax}(k)}{\operatorname{argmin}} (L(k))$. On a alors de façon

directe :

$$\hat{P}_{sysPAC}(k) = \Pi(P_{mot}(k), \hat{\lambda}(0)) \quad (3.57)$$

Une illustration de la fonction non linéaire $\Pi(P_{mot}(k), \hat{\lambda}(0))$ est fournie figure 3-23.

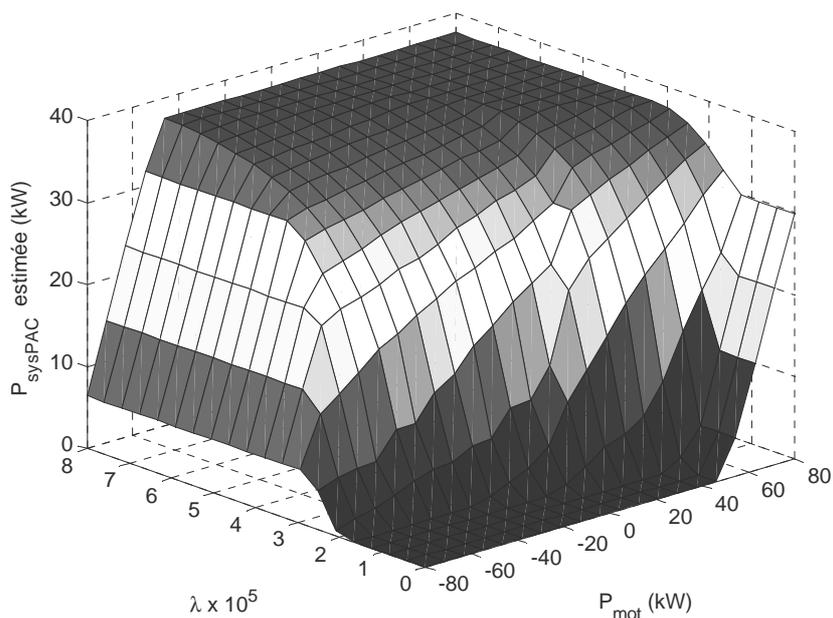


Figure 3-23 : $\Pi(P_{mot}(k), \hat{\lambda}(0))$ (configuration CV2).

Afin de valider l'**hypothèse 1**, deux cas sont considérés :

- Le **Cas 1** correspond au problème complet déjà résolu. Les commandes obtenues sont appliquées sur le modèle de simulation du véhicule.

Cas 1 (algorithme de commande optimal complet appliqué au modèle de simulation) :

- choisir $\lambda(0)$ initial
- Répéter

- $\forall k \in \{0 \dots N\}$,

$$P_{\text{sysPAC}}(k) = \underset{\tilde{P}_{\text{sysPAC}_{\min}}(k) \leq P_{\text{sysPAC}}(k) \leq \tilde{P}_{\text{sysPAC}_{\max}}(k)}{\text{argmin}} (H(k))$$

$$\text{avec } H(k) = \dot{m}_{H_2}(P_{\text{sysPAC}}(k)) \cdot T_e - \lambda(k+1) \cdot [X(k) + \tilde{Q}(P_{\text{sysPAC}}(k), X(k)) \cdot T_e]$$

$$\text{et } \lambda(k+1) = \lambda(k) \cdot \left(1 + \frac{\partial \tilde{Q}(P_{\text{sysPAC}}(k), X(k))}{\partial X(k)} \cdot T_e \right)^{-1}$$

- adapter $\lambda(0)$ (dichotomie par exemple)

tant que $|X(N) - X_c| < \varepsilon$

- Dans le **Cas 2**, la variable de décision $\hat{P}_{\text{sysPAC}}(k)$ est obtenue directement par $\Pi(P_{\text{mot}}(k), \hat{\lambda}(0))$. La valeur de $\hat{\lambda}(0)$ est initialisée par le $\lambda(0)$ du **Cas 1**. On rappelle que le **Cas 2** est utilisé que pour vérifier l'**hypothèse 1**. Sans la connaissance de $\lambda(0)$ initial issu du **Cas 1**, il est toujours possible de réaliser la même boucle (avec une dichotomie par exemple) que celle effectuée pour l'algorithme précédent.

Cas 2 (hypothèse 1 prise en compte)

- $\hat{\lambda}(0) = \lambda(0)$
- $\forall k \in \{0 \dots N\}$,

$$\hat{P}_{\text{sysPAC}}(k) = \Pi(P_{\text{mot}}(k), \hat{\lambda}(0))$$

$$\hat{X}(k+1) = \hat{X}(k) + \tilde{Q}|_{X_{\text{moy}}}(\hat{P}_{\text{sysPAC}}(k)) \cdot T_e$$

Les *Cas 1* et *Cas 2* sont comparés pour un état de charge initial de 60 % et une variation d'état de charge nulle ($X(N) = X(0)$) figure 3-24. Très peu d'écarts sont à noter entre les résultats :

- Les profils des variables de décision $P_{sysPAC}(k)$ et $\hat{P}_{sysPAC}(k)$ sont quasiment identiques : l'écart moyen est de 50W et l'écart efficace (RMS) est de 195 W ;
- Les consommations d'hydrogène sont très proches (1,620 kg/100 km pour le *Cas 1* et 1,615 kg/100 km pour le *Cas 2*) ;
- L'écart entre les états de charge n'excède pas 0,35 %.

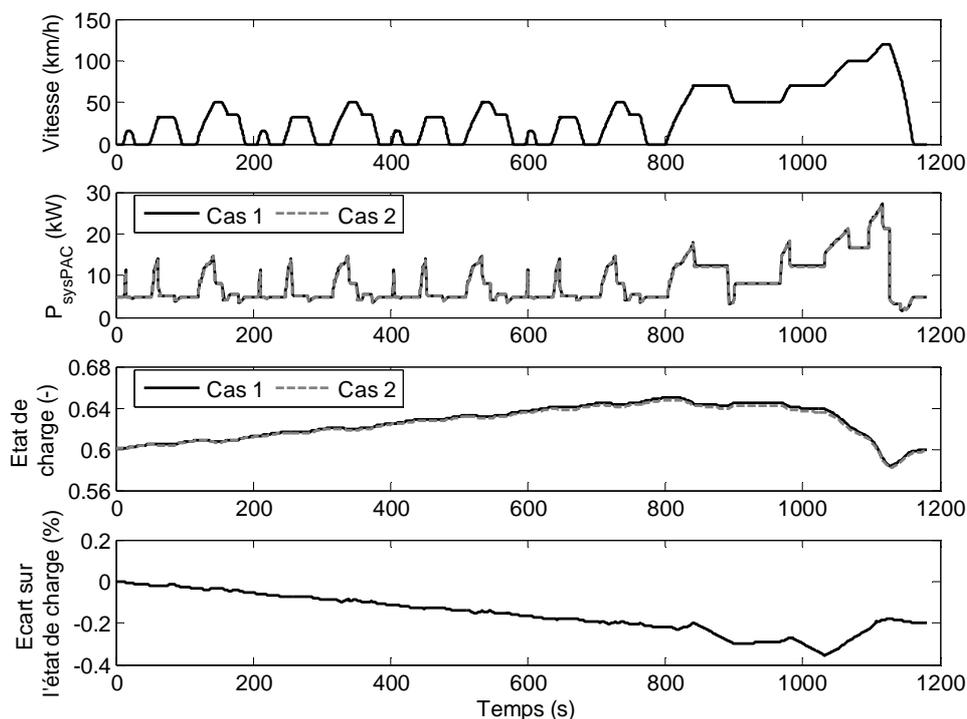


Figure 3-24 : Comparaison de la solution optimale des *Cas 1* et *Cas 2* pour $\lambda(0)=\hat{\lambda}(0)=1,7595 \times 10^{-5} \Leftrightarrow \Delta X = 0$ (configuration CV2).

Les variations d'état de charge des *Cas 1* et *Cas 2* sont comparées figure 3-25. L'écart maximal observé est de 1,5 %. Dans le *Cas 2*, la variation d'état de charge est calculée en

utilisant (3.57), $\tilde{Q}|_{X_{moy}}(\hat{P}_{sysPAC}(k)) = \tilde{Q}|_{X_{moy}}(\Pi(P_{mot}(k), \hat{\lambda}(0)))$:

$$\hat{X}(N) - X(0) = T_e \cdot \sum_{k=0}^N \left(\tilde{Q}|_{X_{moy}} \circ \Pi \right) (P_{mot}(k), \hat{\lambda}(0)) \quad (3.58)$$

◦ représentant l'opérateur de composition de fonctions.

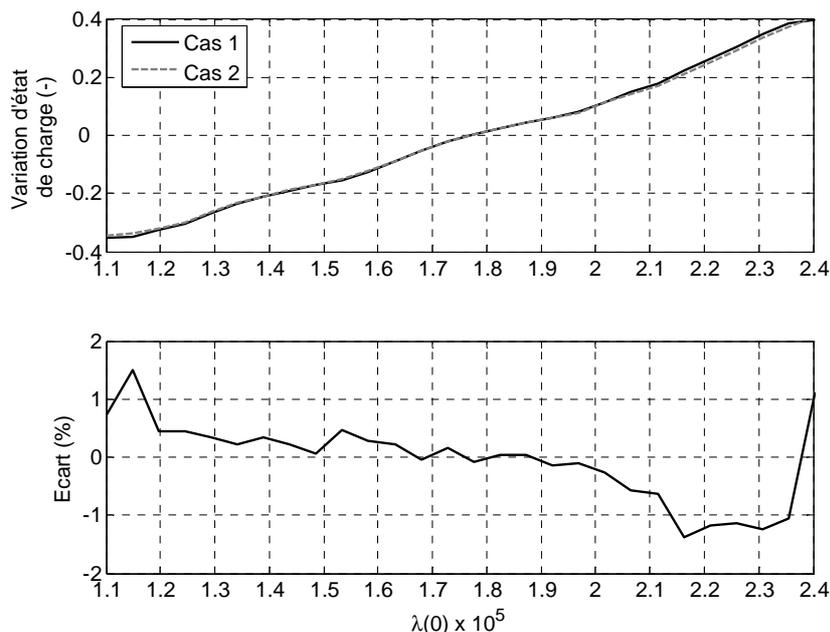


Figure 3-25 : Variations d'état de charge ΔX en fonction de $\lambda(0)$ pour le *Cas 1* et $\hat{\lambda}(0)$ pour le *Cas 2* (configuration CV2).

En résumé, si le profil de puissance moteur $P_{mot}(k)$, $k \in \{0 \dots N\}$ est totalement connu (i.e. le cycle de vitesse est connu), l'équation (3.58) relie « simplement » la valeur de $\hat{\lambda}(0)$ à l'état de charge final désiré X_c . On remarque que la connaissance du parcours du véhicule ne repose que sur le terme $P_{mot}(k)$. En d'autres termes ce n'est pas le moment où cette puissance a été demandée qui est « important » mais sa fréquence. On propose maintenant de réduire la connaissance du parcours routier en introduisant l'**Hypothèse 2**.

Hypothèse 2 : Seule la distribution des puissances moteur P_{mot} est connue. L'intégralité du profil de demande de puissance n'est pas disponible.

On considère la distribution des puissances moteur sur l'intégralité du cycle de vitesse considéré, figure 3-26. On pose :

- M le nombre de classes considérées ;
- P_{mot}^i le centre de la classe i ;
- n_i l'effectif de la classe i .

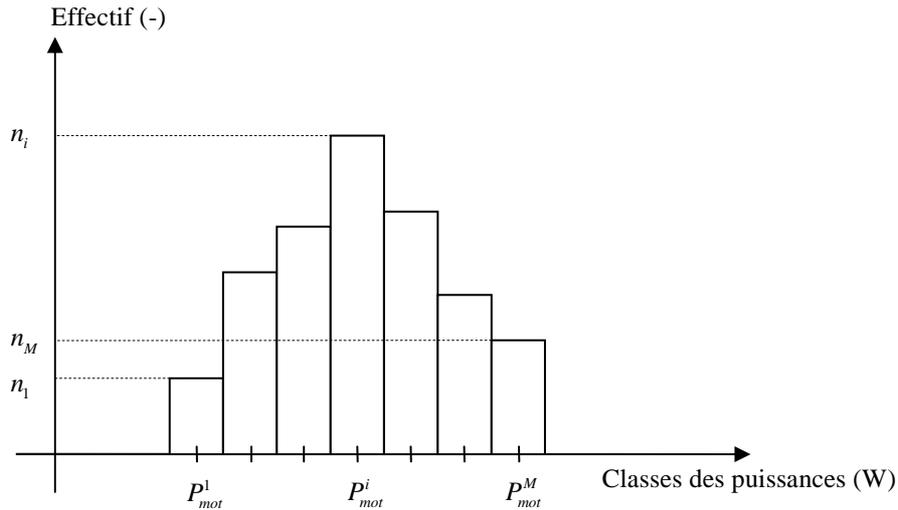


Figure 3-26 : Histogramme des demandes de puissance $P_{mot}(k)$.

En considérant la distribution des puissances moteur $P_{mot}(k)$, l'estimation de la variation d'état de charge est donnée par :

$$\hat{X}(N) - X(0) = T_e \cdot \sum_{i=0}^M n_i \cdot \left(\tilde{Q} \Big|_{X_{moy}} \circ \Pi \right) \left(P_{mot}^i, \hat{\lambda}(0) \right) \quad (3.59)$$

De façon évidente, si on choisit autant de classes que de valeurs de puissances moteur $P_{mot}(k)$, (3.59) et (3.58) coïncident parfaitement. Plus le nombre de classes M est réduit et plus le résultat issu de (3.59) sera éloigné de (3.58). A titre d'illustration avec $M = 33$, dans les mêmes conditions d'essais que précédemment (figure 3-25), la variation d'état de charge estimé $\Delta \hat{X}$ n'excède pas 1,8 %.

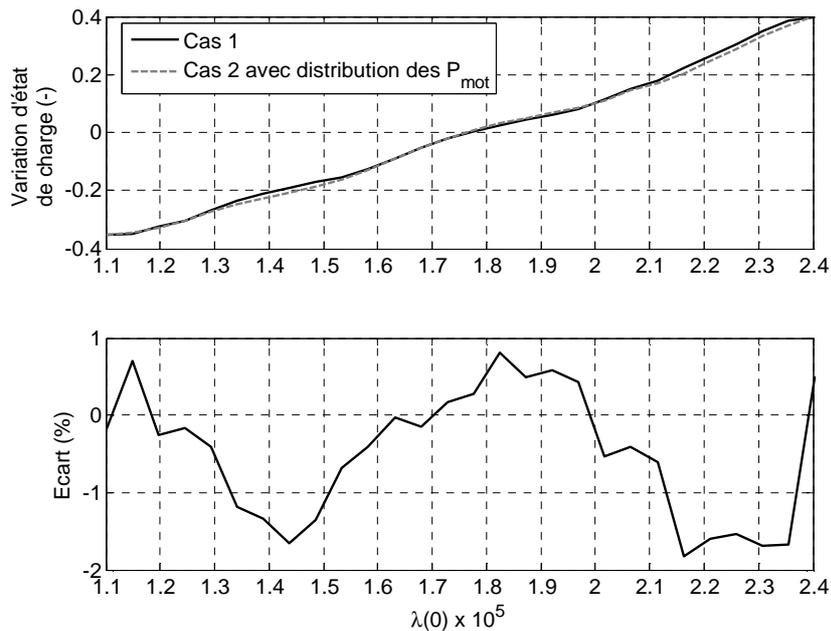


Figure 3-27 : Variation d'état de charge ΔX en fonction de $\lambda(0)$ (configuration CV2).

L'intérêt principal est d'avoir transformé le problème temporel par un problème de fréquences d'occurrence. Le calcul est alors nettement facilité (la rapidité aussi) et surtout, on peut se servir de cette formulation pour proposer une stratégie prédictive de $\lambda(0)$.

3.5.3. Proposition d'une stratégie prédictive : λ_{pred}

En situation de conduite réelle, la distribution des puissances moteur $P_{mot}(k)$, $k \in \{0 \dots N\}$ ne peut être calculée que pour des valeurs passées. L'idée est alors de considérer la distribution de puissances sur une fenêtre glissante afin d'estimer la demande de puissance future de la motorisation par extrapolation.

Le schéma de principe de la stratégie λ_{pred} est donné figure 3-28. On distingue deux fenêtres temporelles glissantes :

- $k_{hist} \cdot T_e$ est la fenêtre sur laquelle est calculée l'histogramme des demandes de puissance ;
- $k_X \cdot T_e$ correspond à la fenêtre temporelle de prédiction de l'état de charge.

En fait, on demande que dans les conditions de l'instant $k \cdot T_e$ (ou de l'échantillon k) l'état de charge $X(k)$ ait rejoint un état de consigne X_c à l'instant $(k + k_X) \cdot T_e$ (ou à l'échantillon $k + k_X$).

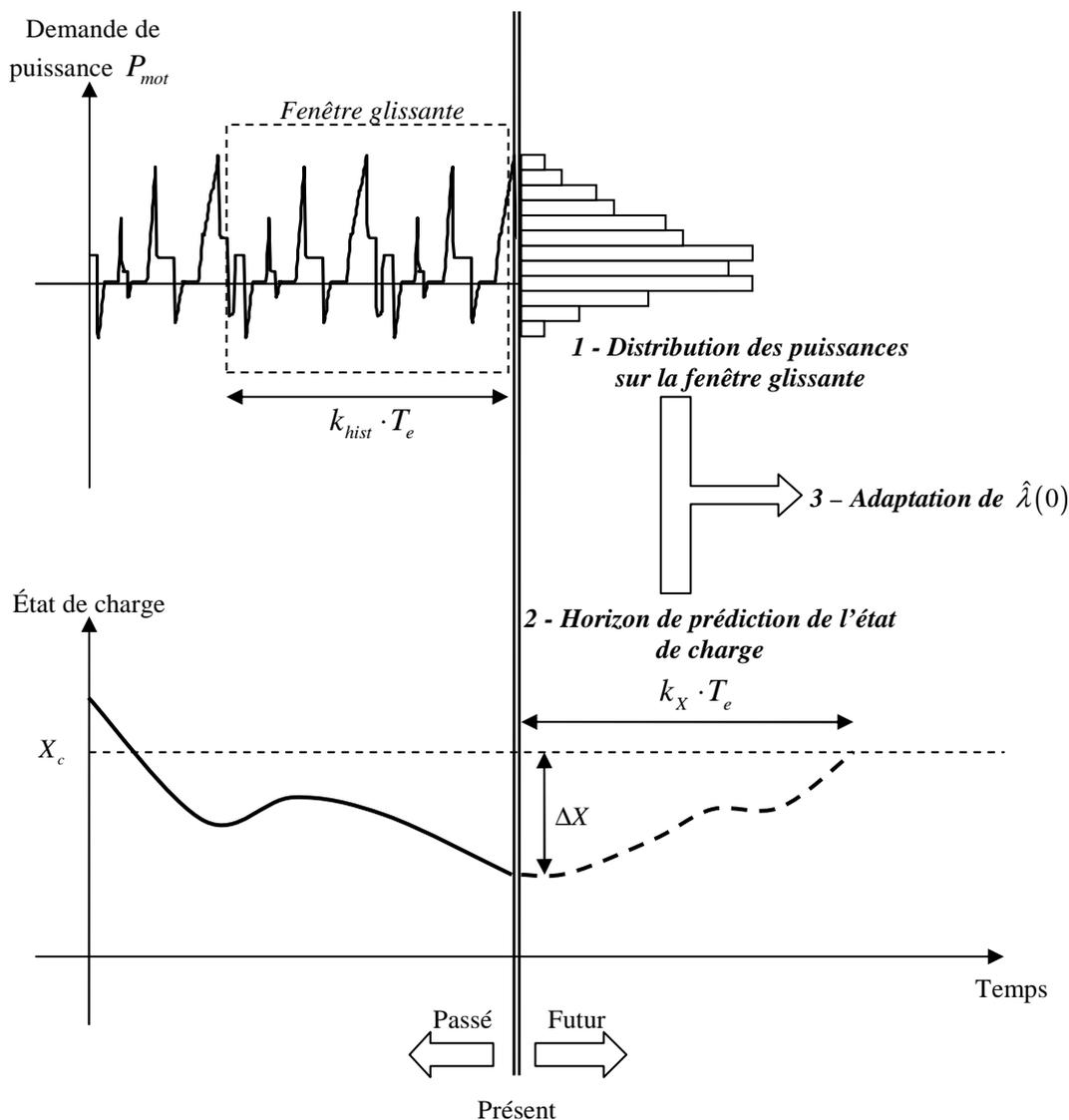


Figure 3-28 : Principe de la stratégie λ_{pred} .

A partir de (3.59) considérée sur une fenêtre temporelle de k_{hist} échantillons, il est possible d'obtenir une valeur de $\hat{\lambda}(0)$ (pour le sous problème et les hypothèses simplificatrices considérées) en résolvant le problème suivant :

$$\frac{k_{hist}}{k_X} \cdot (X_c - X(k \cdot T_e)) = T_e \cdot \sum_{i=0}^M n_i \cdot \left(\tilde{Q} \Big|_{X_{moy}} \circ \Pi \right) (P_{mot}^i, \hat{\lambda}(0)) \quad (3.60)$$

L'algorithme de λ_{pred} se résume à :

Tous les k_{adapt} échantillons,

1. Calculer l'histogramme des puissances moteur à partir de $P_{mot}(j)$,
 $j \in \{k - k_{hist}, \dots, k\}$
2. trouver $\hat{\lambda}(0)$ tel que (3.60) (par dichotomie par exemple)

Fin

En résumé, les paramètres de réglages de la stratégie proposée sont :

- le nombre M de classes de l'histogramme ;
- le nombre d'échantillons k_{hist} de la fenêtre glissante considérée pour la création de l'histogramme ;
- le nombre d'échantillons k_x de l'horizon de prédiction de l'état de charge ;
- le nombre d'échantillons k_{adapt} entre deux adaptations de $\hat{\lambda}(0)$;
- l'état de charge visé X_c .

Comme pour la majorité des stratégies de commande temps réel existantes, il n'existe pas de réglage a priori de ces paramètres. Cependant, les algorithmes de commande optimale fournissent en simulation des références de consommation d'hydrogène permettant de juger de la pertinence des réglages. L'approche retenue consiste à optimiser la valeur de ces paramètres par minimisation de l'écart de consommation entre les résultats temps réel et ceux de la commande optimale pour un ensemble de cycles caractéristiques.

Dans un premier temps, la stratégie λ_{pred} est appliquée sur un exemple académique (figure 3-29) où le cycle de vitesse considéré est répétitif. La prédiction de la distribution des puissances $P_{mot}(k)$ sur l'horizon $k_x \cdot T_e$ est donc correcte à chaque adaptation de $\hat{\lambda}(0)$. Le cycle a une durée de 1176s avec une période d'échantillonnage $T_e = 1s$, c'est-à-dire 1176 échantillons. Les 2 fenêtres glissantes comportent le même nombre $k_{hist} = k_x = 1176/2 = 588$ d'échantillons. Le paramètre $\hat{\lambda}(0)$ est adapté une seule fois à ($k_{hist} \cdot T_e = k_x \cdot T_e = 588s$) et a pour valeur initiale $\hat{\lambda}(0) = 0$.

L'exemple illustre que si la distribution de puissance est prédite correctement alors le contrôle de l'état de charge est assuré, figure 3-29. L'état de charge visé est $X_c = 60\% \cdot X_{max}$ et l'état de charge final obtenu est de 59,5 %. L'écart s'explique par les simplifications de modèle réalisées.

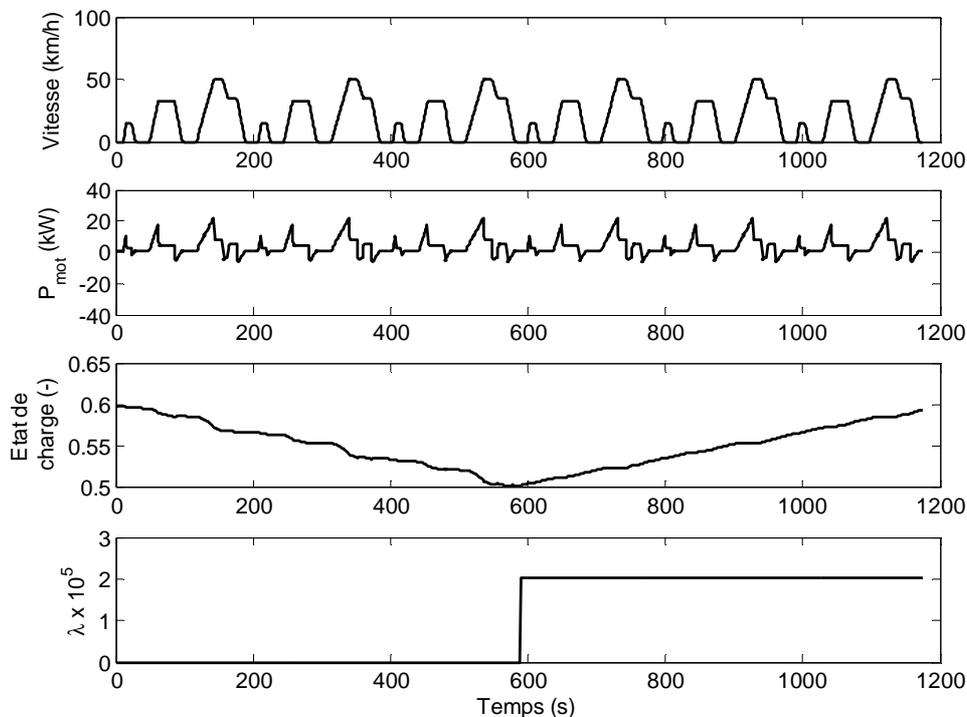


Figure 3-29 : Exemple académique de la stratégie λ_{pred} (*configuration CV2* sur cycle répétitif).

La stratégie est maintenant appliquée pour la *configuration CV2*, figure 3-30 avec les paramètres suivant : $T_e = 1s$, $k_{hist} = k_{adapt} = 120$, $k_X = 600$ et $X_c = 60\% \cdot X_{max}$.

La variation d'état de charge est de -0,4 % et la consommation d'hydrogène de 1,66 kg/100 km. Les résultats de l'optimisation globale pour la même variation d'état de charge sont également tracés. La consommation optimale obtenue est de 1,60 kg/100 km, ce qui représente un écart de 4 %. On observe par ailleurs que le paramètre de Lagrange $\hat{\lambda}(k)$ de la stratégie temps réel évolue autour sa valeur optimale (figure 3-30).

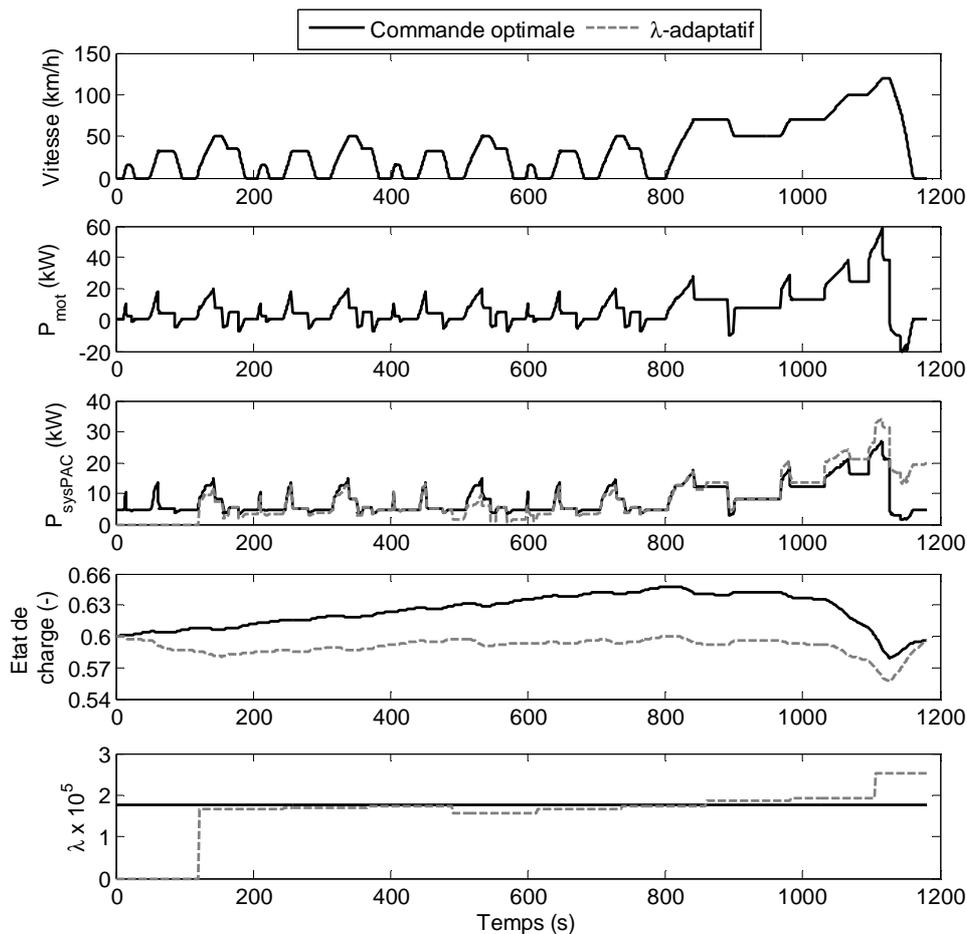


Figure 3-30 : Stratégie λ_{pred} et commande optimale pour le cycle CEN (*configuration CV2*).

La stratégie λ_{pred} sera mise en œuvre sur une plateforme expérimentale de système pile à combustible hybride présentée au chapitre 5.

3.6. Conclusion

Ce chapitre a abordé la problématique des stratégies de commande de véhicules à pile à combustible hybrides. Une approche globale et une approche temps réel ont été abordées :

- Le problème d'optimisation globale sous contraintes a été formulé. Sous certaines hypothèses, celui-ci a été dans un premier temps résolu par la programmation dynamique. Les temps de calculs prohibitifs limitent l'utilisation de cet algorithme. Une deuxième approche, basée sur la théorie de la commande optimale, permet d'obtenir des résultats en améliorant sensiblement les temps de calculs. Différentes contraintes ont été prises en compte dans le problème d'optimisation, certaines

aboutissant à des résultats sous optimaux (notamment la saturation de l'état de charge). La comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes a permis de valider l'approche basée sur la théorie de la commande optimale.

- Les algorithmes utilisés sont inapplicables pour un usage en temps réel car le trajet futur du véhicule n'est pas connu. Une stratégie de commande temps réel, basée sur la commande optimale, a été proposée. Cette stratégie repose une adaptation du paramètre de Lagrange $\hat{\lambda}(k)$ en fonction de l'historique de la demande de puissance moteur et de l'état de charge de la source secondaire d'énergie.

La consommation d'hydrogène ne repose pas seulement sur la stratégie de commande mise en œuvre mais sur la pertinence du dimensionnement de la source d'énergie électrique (système PAC + source secondaire d'énergie). Ce point fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 4. Dimensionnement de la source de puissance d'un véhicule hybride à pile à combustible

4.1. INTRODUCTION	118
4.2. OUTIL D'AIDE AU DIMENSIONNEMENT DE LA SOURCE DE PUISSANCE.....	118
4.2.1. Contraintes de dimensionnement	118
4.2.2. Estimation de la consommation d'hydrogène	123
4.2.3. Conclusion.....	128
4.3. EXEMPLE APPLICATIF : LE PROTOTYPE HY-MUVE	130
4.3.1. Présentation du véhicule.....	130
4.3.2. Objectifs et hypothèses de l'étude.....	132
4.3.3. Résultats de l'étude	136
4.3.4. Conclusion.....	140
4.4. CONCLUSION	140

4.1. Introduction

Lors de la conception d'un véhicule, les performances dynamiques du véhicule sont spécifiées par le cahier des charges. Ces contraintes dynamiques permettent de calculer les dimensionnements limites de la source de puissance hybride, c'est à dire les puissances minimales au système pile à combustible et les capacités minimales de la source secondaire d'énergie.

Généralement, il existe un grand nombre de configurations de groupes motopropulseurs hybrides permettant de satisfaire ce cahier des charges. Cependant, rien ne garantit qu'elles soient toutes pertinentes vis-à-vis de la consommation énergétique.

L'objectif de ce chapitre est de proposer un outil permettant, d'une part de déterminer les dimensionnements admissibles vis-à-vis du cahier des charges et d'autre part, d'évaluer l'influence du dimensionnement sur la consommation énergétique du véhicule.

4.2. Outil d'aide au dimensionnement de la source de puissance

L'outil d'aide au dimensionnement proposé permet d'optimiser deux paramètres : N_{cell} , le nombre de cellules de la pile à combustible et N_{SSE} le nombre d'éléments de la source d'énergie secondaire. En préalable, l'ensemble des autres paramètres (caractéristiques de la machine électrique de traction, de la transmission...) devra avoir été sélectionné en fonction de l'application considérée, des matériels existants ... Si l'aire de la membrane est fixée, alors N_{cell} permet d'ajuster la puissance de la pile à combustible. Si les caractéristiques d'un élément de la source secondaire d'énergie sont connus, alors N_{SSE} permet de modifier sa capacité et sa puissance.

4.2.1. Contraintes de dimensionnement

Les performances dynamiques du véhicule sont spécifiées par le cahier des charges. Elles sont notamment caractérisées par la vitesse maximale et par les temps d'accélération du véhicule. Ces contraintes dynamiques permettent de calculer les dimensionnements limites de la source de puissance hybride.

A titre d'illustration, on considère le véhicule Berlingo présenté au chapitre 2 équipé soit de batteries (modules Ni-MH 1,2 V – 28 Ah) ou de supercondensateurs (modules 2,5 V –

2600 F). Pour le dimensionnement du groupe motopropulseur hybride, un cahier des charges « minimaliste » est considéré :

- **Contrainte n°1** : le véhicule doit être capable de maintenir une vitesse de 110km/h sur une pente à 5%;
- **Contrainte n°2** : l'accélération du véhicule de 0 à 100 km/h doit se faire pour un couple moteur maximal, i.e. la source d'énergie doit permettre de produire ce couple durant toute l'accélération.

➤ **Contrainte n°1 : Contrainte sur le maintien en vitesse du véhicule**

Le maintien en vitesse du véhicule correspond à sa capacité à rouler à vitesse constante pendant une durée prolongée. Par exemple si l'on considère les spécifications originales du Berlingo hybride /Paganelli 1999/, le véhicule doit pouvoir maintenir une vitesse de 110 km/h sur une pente à 5 %. En utilisant le modèle du véhicule, il est possible de déterminer la puissance nécessaire correspondante P_{mot}^v .

La quantité d'énergie contenue dans la source secondaire étant généralement beaucoup plus faible que celle contenue dans l'hydrogène du réservoir, il n'est pas possible d'utiliser la source d'énergie sur de grandes distances. De ce fait, seul le système pile à combustible est capable de fournir une puissance constante pendant une durée prolongée (jusqu'à ce que le réservoir d'hydrogène soit vide). Ainsi, la contrainte de maintien en vitesse impose une puissance minimale du système pile à combustible. Le domaine D_1 des solutions qui satisfont cette première contrainte est :

$$D_1 = \left\{ (N_{cell}, N_{SSE}) / P_{sysPAC_{max}} \geq P_{mot}^v \right\} \quad (4.1)$$

Le domaine D_1 est tracé figure 4-1. Pour des raisons de clarté, le nombre de cellules N_{cell} est remplacé par la puissance nominale du système PAC sur l'axe des abscisses.

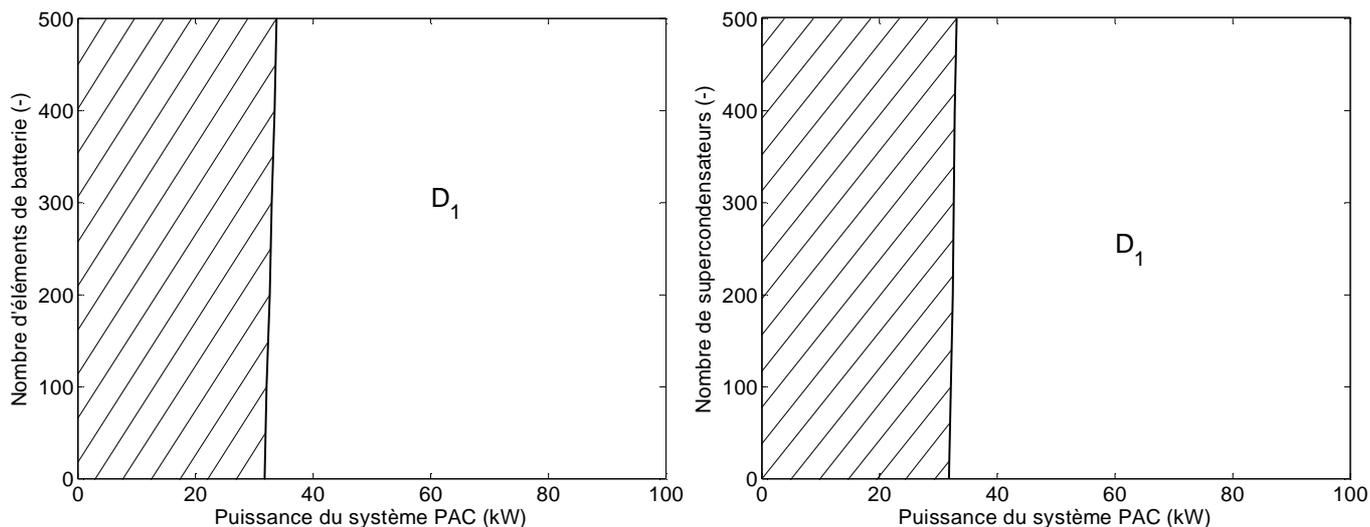


Figure 4-1 : Domaine D_1 pour les batteries (gauche) et les supercondensateurs (droite).

➤ **Contrainte n°2 : Contrainte sur les accélérations du véhicule**

Le temps d'accélération T_{acc} du véhicule de 0 à 100 km/h est une caractéristique classique permettant d'évaluer les performances dynamiques du véhicule. Cette performance est liée à la puissance de la motorisation. Dans notre cas, le moteur de 75 kW utilisé permet d'obtenir un temps T_{acc} de l'ordre de 12 s. Comme la motorisation et les caractéristiques du véhicule sont fixées, si la source de puissance (système PAC + source secondaire d'énergie) est capable de fournir la puissance nécessaire, seule sa masse influence le temps d'accélération (figure 4-2).

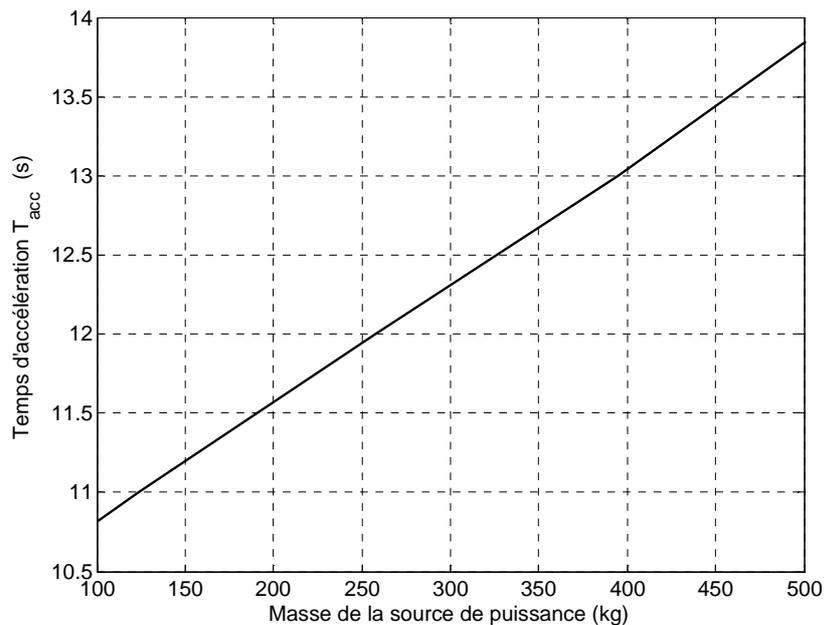


Figure 4-2 : Temps d'accélération T_{acc} en fonction de la masse de la source de puissance.

A chaque instant, la puissance électrique $P_{mot}^{acc}(V_{veh})$ consommée peut être calculée à partir de la cartographie de rendement de la machine électrique (figure 2-20, chapitre 2) et de la puissance mécanique délivrée.

La machine électrique est alimentée simultanément par la source secondaire d'énergie et le système PAC :

- Le système PAC a un taux de variation de puissance $\Delta P_{sysPAC}(k)$ limité :

$$-\overline{\Delta P}_{sysPAC} \leq \Delta P_{sysPAC}(k) \leq \overline{\Delta P}_{sysPAC} \quad (4.2)$$

avec le taux de variation de la puissance :

$$\Delta P_{sysPAC}(k) = \frac{P_{sysPAC}(k) - P_{sysPAC}(k-1)}{T_e} \quad (4.3)$$

- La source secondaire d'énergie doit satisfaire à la fois une contrainte de puissance et une contrainte en énergie. Sa puissance maximale $P_{SSE_{max}}$ doit être suffisante pour assister le système pile à combustible et son état de charge X ne doit pas franchir la limite inférieure X_{min} avant que la vitesse $V_{veh} = 100 \text{ km/h}$ ne soit atteinte.

Le domaine D_2 qui satisfait la contrainte d'accélération est donné par :

$$D_2 = \left\{ (N_{cell}, N_{SSE}) / \forall k = 1..N, \left\{ \begin{array}{l} P_{sysPAC_{max}}(k) + P_{SSE_{max}}(k) \geq P_{mot}^{acc}(V_{veh}(k)) \\ \Delta P_{sysPAC}(k) \leq \overline{\Delta P}_{sysPAC} \\ X(k) \geq X_{min} \end{array} \right. \right\} \quad (4.4)$$

avec $N = T_{acc}/T_e$.

Le domaine D_2 est représenté figure 4-3. Le système pile à combustible a un taux de variation de puissance $T_{10\% \rightarrow 90\%} = 2s$ /Zolot et al. 2004/. L'état de charge initial de la source secondaire est de 60 % pour les batteries et de 80 % pour les supercondensateurs. La limite inférieure de l'état de charge est de 25 %.

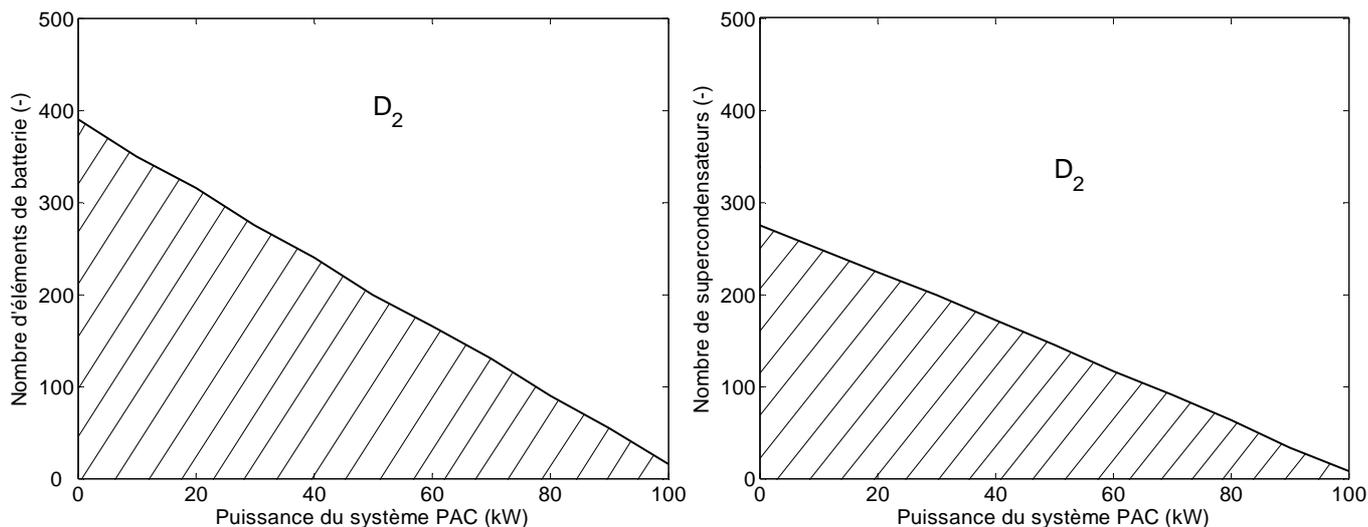


Figure 4-3 : Domaine D_2 pour les batteries (gauche) et les supercondensateurs (droite).

➤ **Domaine des solutions admissibles**

Les contraintes sur le maintien de vitesse et sur l'accélération du véhicule ont permis de déterminer 2 domaines D_1 et D_2 . Les dimensionnements admissibles respectant ces contraintes sont donc donnés par figure 4-4 :

$$D = D_1 \cap D_2 \tag{4.5}$$

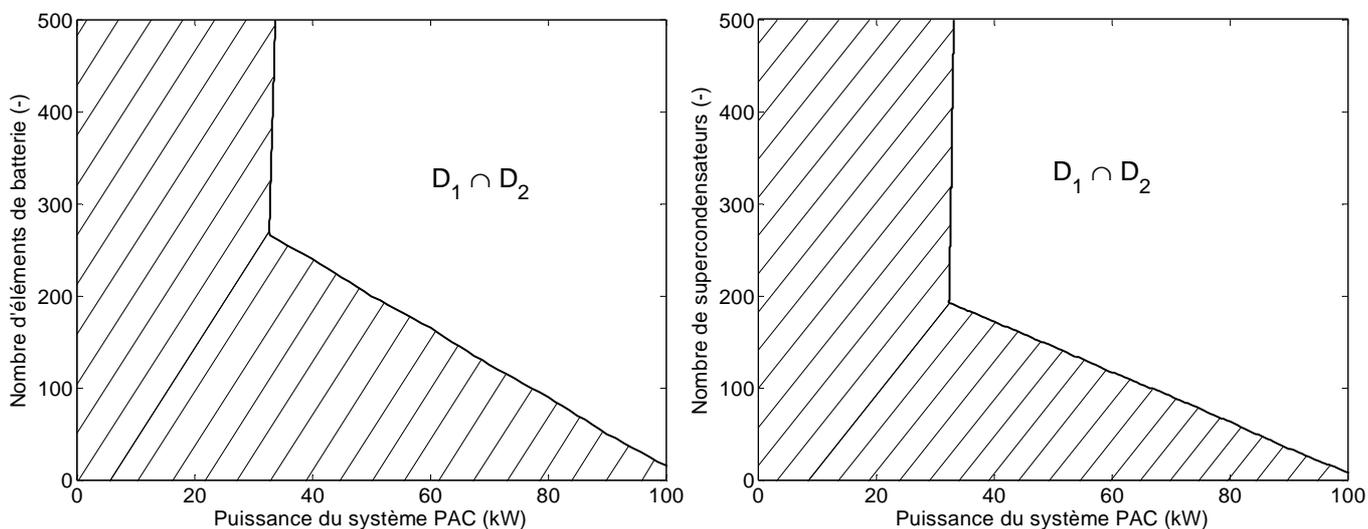


Figure 4-4 : Domaine D pour les batteries (gauche) et les supercondensateurs (droite).

Le domaine D de la figure 4-4 est ouvert, c'est-à-dire que des dimensionnements infinis sont admissibles. Cependant le cahier des charges considéré est loin d'être exhaustif. Le domaine D peut être fermé en considérant d'autres contraintes comme par exemple le volume, le coût

...

4.2.2. Estimation de la consommation d'hydrogène

Il s'agit maintenant d'estimer la consommation d'hydrogène du véhicule. Pour cela, l'algorithme d'optimisation globale présenté au chapitre 3 est utilisé. Pour des raisons de temps de calcul, la méthode de résolution par la théorie de la commande optimale est préférée à la programmation dynamique.

La commande optimale permet de déterminer la répartition de puissance entre le système pile à combustible et la source secondaire d'énergie qui minimise la consommation d'hydrogène. L'algorithme est générique, c'est-à-dire qu'il peut être utilisé pour différentes technologies de source secondaire (batteries ou supercondensateurs), pour différents dimensionnements de la source de puissance, et pour différents cycles de vitesse. Ainsi, la consommation d'hydrogène pour différentes tailles de systèmes PAC et de sources secondaires peut être comparée pour un cycle donné.

En d'autres termes, le processus de dimensionnement est devenu quasi indépendant de la stratégie de commande. De plus, les temps de calculs réduits pour l'obtention d'une solution sont un avantage non négligeable pour comparer rapidement différentes architectures de groupe motopropulseur.

Pour calculer la consommation d'hydrogène, 4 cycles de vitesses sont considérés :

- Le Cycle Européen Normalisé (CEN), figure 4-5, est utilisé pour calculer la consommation des véhicules en Europe (directive *EEC 90/C81/01*). Il est constitué de 3 parcours urbains suivi d'un parcours périurbain. Ce cycle de vitesse est « simpliste » et ne correspond pas à des conditions réelles de circulations.
- Les cycles UF3, R3 et A2, figure 4-5, sont issus de mesures réelles /André et al. 2006/. Le cycle UF3 correspond à un parcours urbain, le cycle R3 à un parcours périurbain et le cycle A2 à un parcours autoroutier.

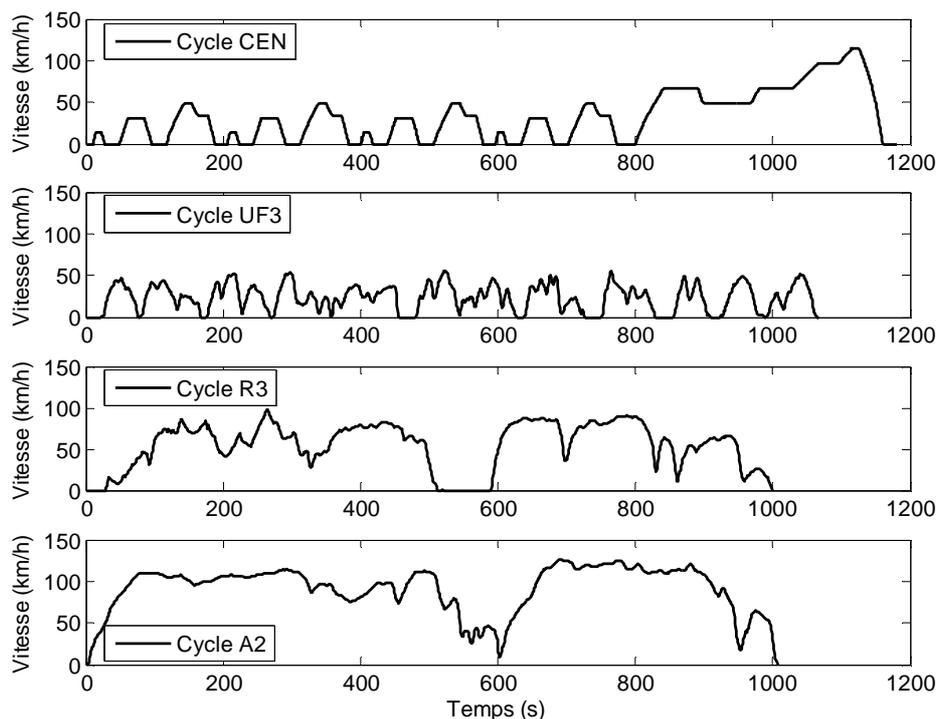


Figure 4-5 : Cycles de vitesse considérés.

Pour chaque cycle de vitesse considéré, une cartographie de la consommation d'hydrogène est réalisée. Pour différents couples de système pile à combustible et de source secondaire d'énergie, la consommation minimale d'hydrogène est calculée en utilisant l'algorithme d'optimisation globale (figure 4-6) pour une variation globale d'état de charge nulle $\Delta X = 0$. La taille de la pile à combustible varie de 0 à 100 kW avec un pas de 10 kW, $\Delta P_{sysPAC} = 10kW$, et la taille de la source secondaire varie de 0 à 500 éléments avec un pas de 50 éléments $\Delta N_{SSE} = 50$.

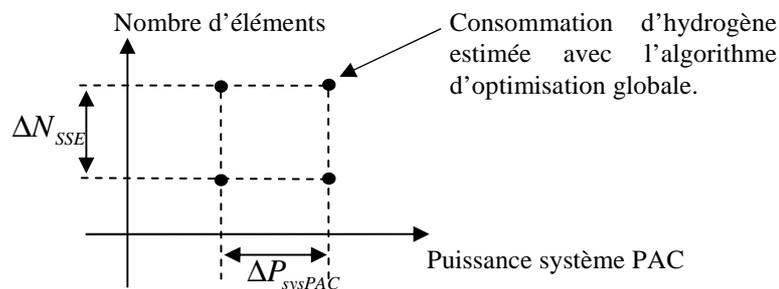


Figure 4-6 : Grille d'expériences pour l'estimation de la consommation d'hydrogène.

Les cartographies de consommation d'hydrogène obtenues pour le cycle CEN sont présentées figure 4-7 ; les limites du domaine D correspondant aux contraintes de dimensionnement de la source de puissance sont également indiquées.

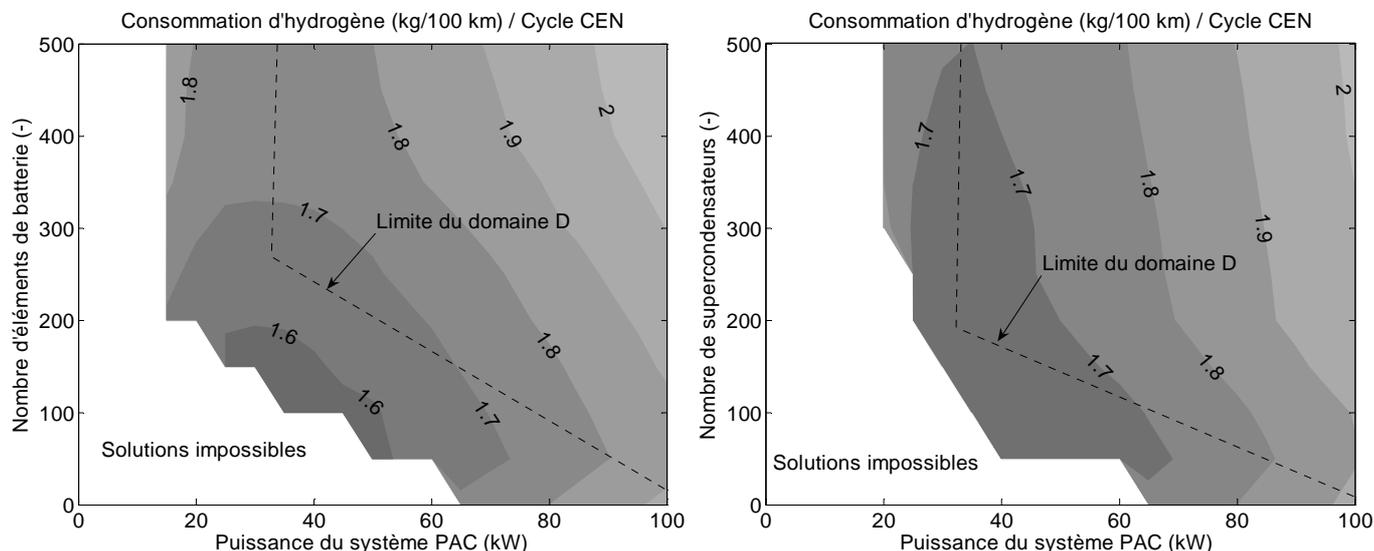


Figure 4-7 : Cartographie de consommation d'hydrogène (kg/100km) pour le cycle CEN (batterie, gauche, et supercondensateur, droite).

Les cartographies de la figure 4-7 sont modifiées pour rendre l'information plus lisible. Pour le cycle de vitesse choisi, un véhicule à pile à combustible est considéré sans source secondaire d'énergie, i.e. $N_{ess} = 0$. Dans cette configuration, la taille du système pile à combustible choisie est celle qui minimise la consommation d'hydrogène. Même si ce dimensionnement n'appartient pas au domaine D des solutions admissibles figure 4-8, il s'agit d'une configuration de référence permettant d'évaluer l'économie d'hydrogène obtenue grâce à l'hybridation. Les gains de consommation d'hydrogène sont donnés en pourcentage par rapport au véhicule PAC de référence. Sur les nouvelles cartographies obtenues figure 4-8 :

- le point • situé à $N_{SSE} = 0$ correspond au véhicule PAC de référence ;
- l'étoile * correspond au dimensionnement minimisant la consommation de carburant parmi toutes les configurations possibles (i.e. sans considérer le domaine D , c'est-à-dire les contraintes de dimensionnement) ;
- et la croix + correspond au dimensionnement minimisant la consommation de carburant parmi toutes les configurations admissibles (i.e. avec contraintes définies par le domaine D) ;

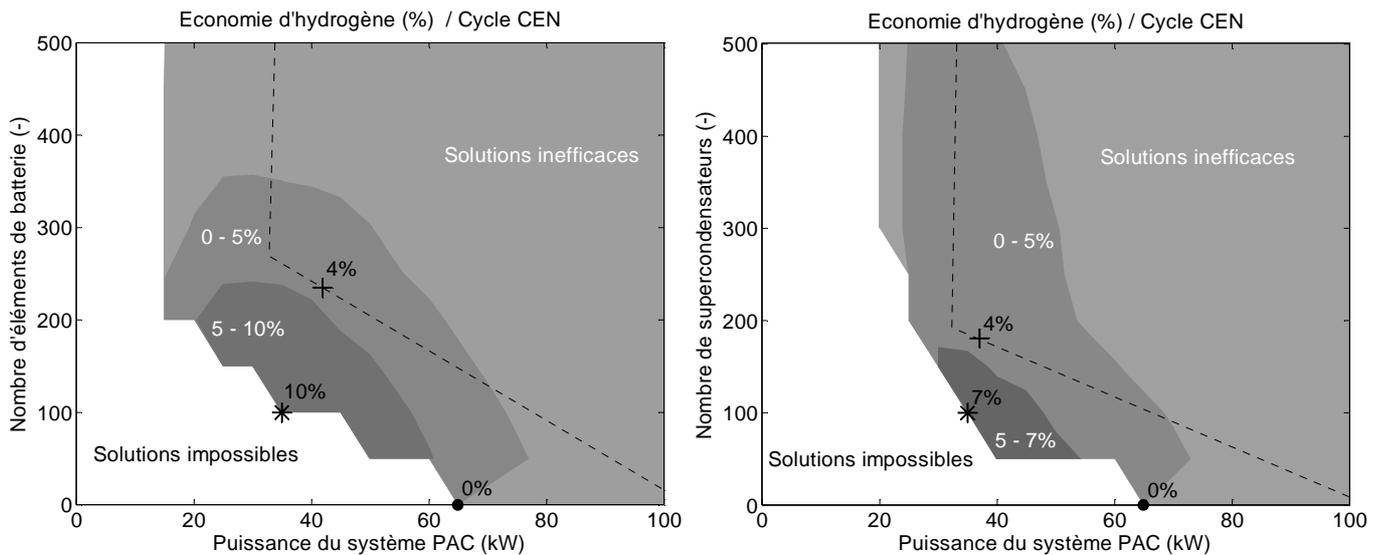


Figure 4-8 : Économie d'hydrogène pour le cycle CEN (batterie, gauche, et supercondensateur, droite).

Pour un cycle de vitesse donné, des domaines de solutions particuliers apparaissent :

- une zone dans laquelle le dimensionnement ne permet pas de satisfaire la demande de puissance de la motorisation (« solutions impossibles », figure 4-8),
- une zone dans laquelle l'hybridation induit une consommation d'hydrogène plus importante que pour une architecture à pile à combustible seule (« solutions inefficaces », figure 4-8). Le bénéfice de l'hybridation ne peut plus faire face à l'augmentation de la masse du véhicule

Les cartographies d'économie d'hydrogène sont également données pour les cycles UF3 (figure 4-9), R3 (figure 4-10), et A2 (figure 4-11).

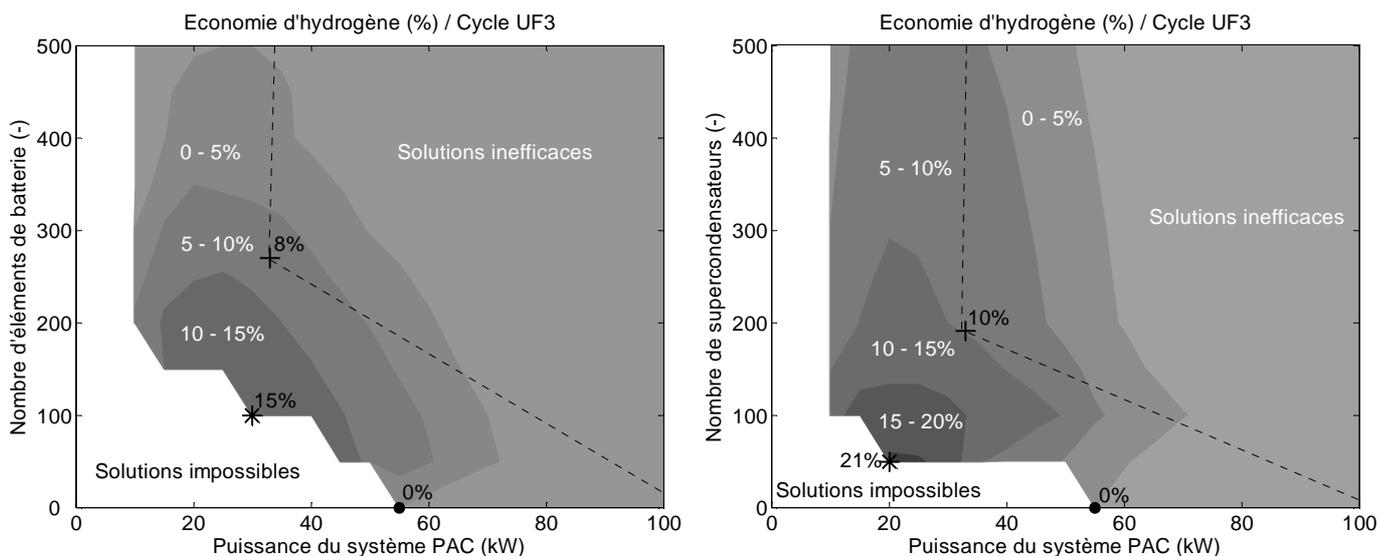


Figure 4-9 : Économie d'hydrogène pour le cycle urbain UF3 (batterie, gauche, et supercondensateur, droite).

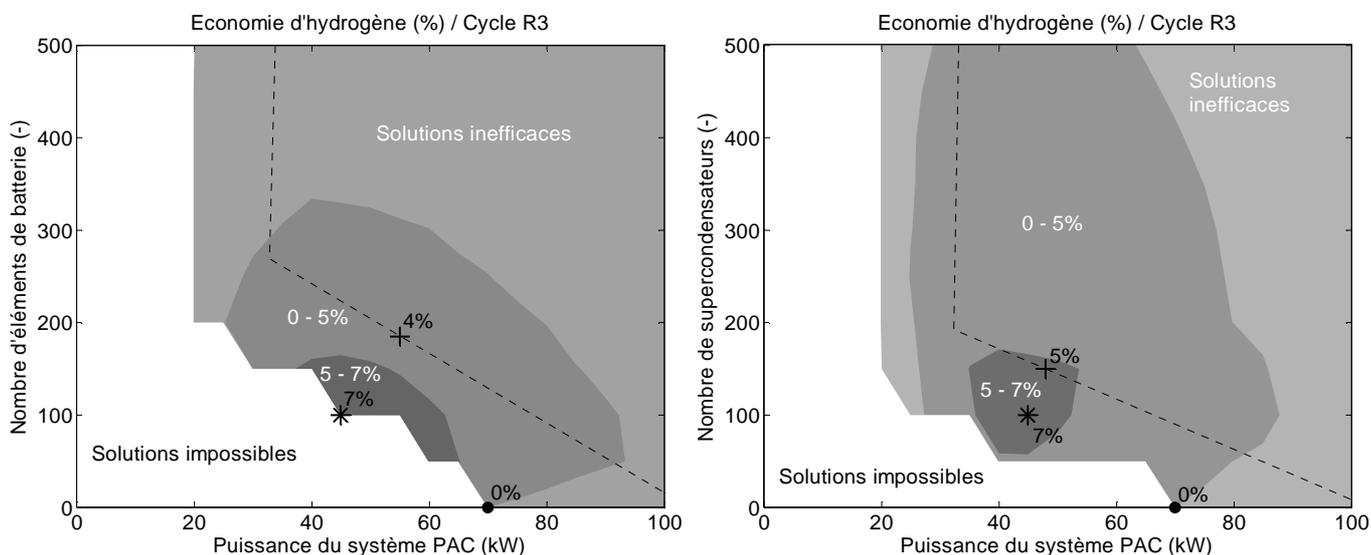


Figure 4-10 : Économie d'hydrogène pour le cycle périurbain R3 (batterie, gauche, et supercondensateur, droite).

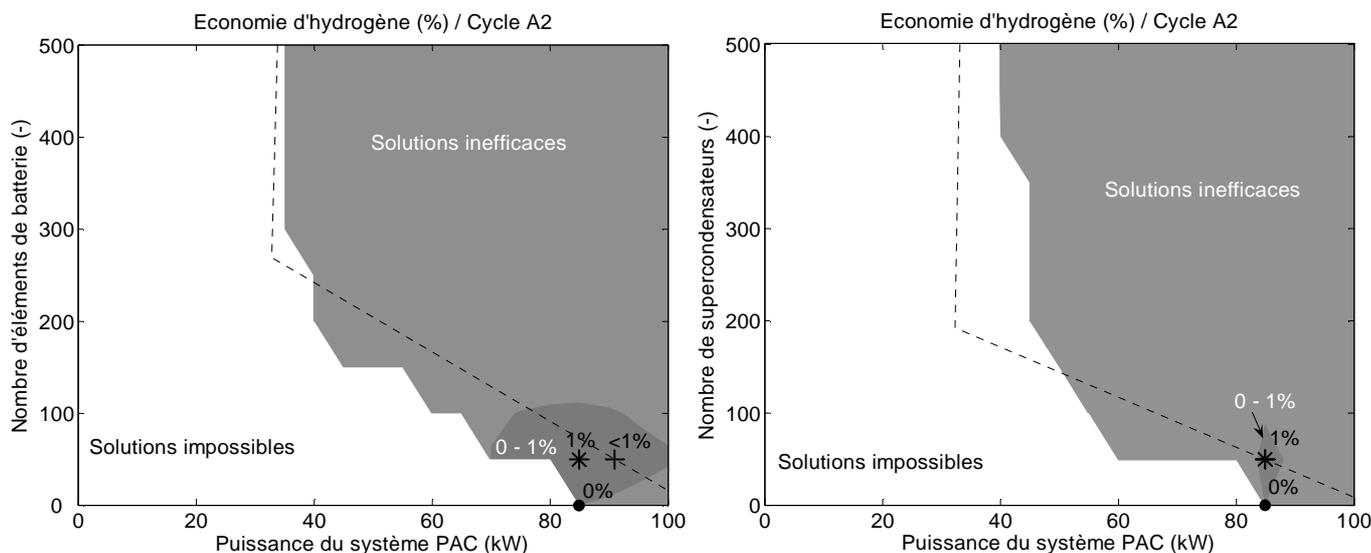


Figure 4-11 : Économie d'hydrogène pour le cycle autoroutier A2 (batterie, gauche, et supercondensateur, droite).

4.2.3. Conclusion

La méthode d'analyse proposée est avant tout un outil d'aide à la décision qui s'intègre dans un processus global de conception de véhicule PAC hybride. Dans cette méthode les contraintes dynamiques du véhicule et la consommation d'hydrogène sont considérés, mais il est évident que le dimensionnement d'un véhicule ne peut reposer que sur ces seules données. Le choix final doit revenir aux concepteurs du véhicule en fonction d'un ensemble d'autres contraintes comme par exemple, les coûts, l'encombrement, la durée de vie...

Il est possible d'exploiter la méthode selon deux aspects :

- aspects qualitatifs :

Les domaines définis par les iso-consommations, figure 4-8 à figure 4-11, renseignent sur l'évolution de la consommation d'hydrogène en fonction de la variation des paramètres (puissance PAC, taille de la source secondaire d'énergie et contraintes dynamiques).

- aspects quantitatifs :

L'outil proposé permet de chercher, par exemple, un ensemble de configurations qui atteignent des performances énergétique données.

Les résultats disponibles de la figure 4-8 à la figure 4-11 sont valables pour le véhicule considéré ; de manière évidente, il n'est pas possible de les généraliser. Cependant, les résultats obtenus permettent de formuler des « règles de bon sens » :

➤ **Influence du parcours routier sur la consommation d'hydrogène**

Il apparaît que la source secondaire d'énergie est très profitable pour un parcours urbain, a un rôle modéré pour un parcours périurbain et devient pénalisante pour la quasi-totalité des dimensionnements sur un parcours autoroutier. Ceci peut s'expliquer par la dynamique du véhicule : celui-ci sera fortement sollicité en accélération et en freinage en cycle urbain avec une utilisation soutenue de la source secondaire ; à l'inverse un cycle autoroutier sollicite peu la source secondaire, la vitesse du véhicule étant quasi constante.

➤ **Influence des contraintes de dimensionnement sur la consommation d'hydrogène**

L'outil proposé permet également de traiter le problème de la rédaction d'un cahier des charges. En effet, il devient possible d'évaluer l'influence des performances minimales spécifiées dans le cahier des charges sur la consommation d'hydrogène.

➤ **Dimensionnement « idéal » du système PAC**

Le dimensionnement « idéal » du système pile à combustible semble très dépendant du cycle de vitesse considéré et peu dépendant de la technologie de la source secondaire (batterie ou supercondensateur), figure 4-12.

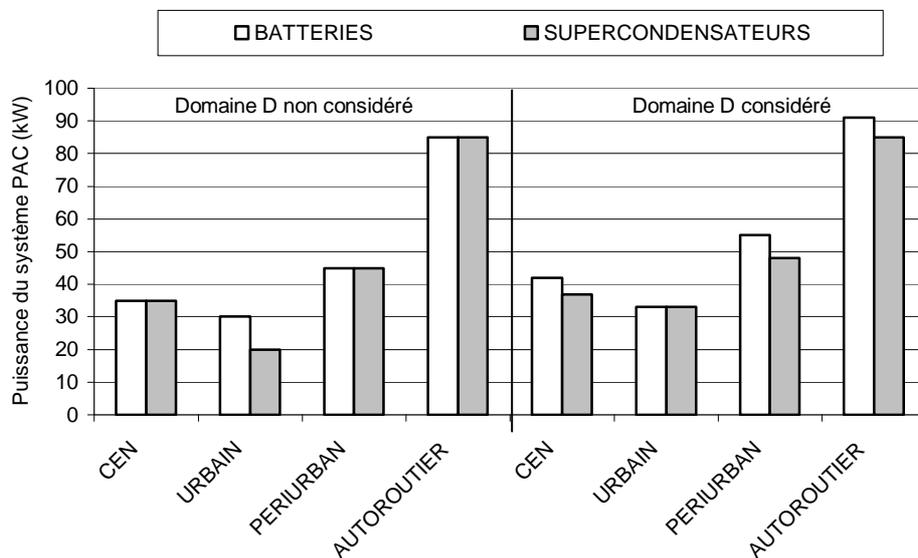


Figure 4-12 : Dimensionnements optimaux du système pile à combustible en fonction du cycle de vitesse considéré et de la technologie de la source secondaire d'énergie (batterie ou supercondensateur).

➤ **Batterie ou supercondensateur ?**

Les économies optimales d'hydrogène obtenues en utilisant des supercondensateurs ou des batteries sont comparées à la figure 4-13. Lorsque les contraintes dynamiques sont considérées, les économies d'hydrogène avec batteries ou supercondensateurs sont quasi-identiques. La consommation d'hydrogène seule ne permet donc pas de favoriser l'utilisation de l'un ou l'autre. Il est nécessaire de prendre en compte d'autres aspects comme par exemple la possibilité de disposer d'un fonctionnement dégradé sans le système pile à combustible (alimentation par la source secondaire d'énergie seule).

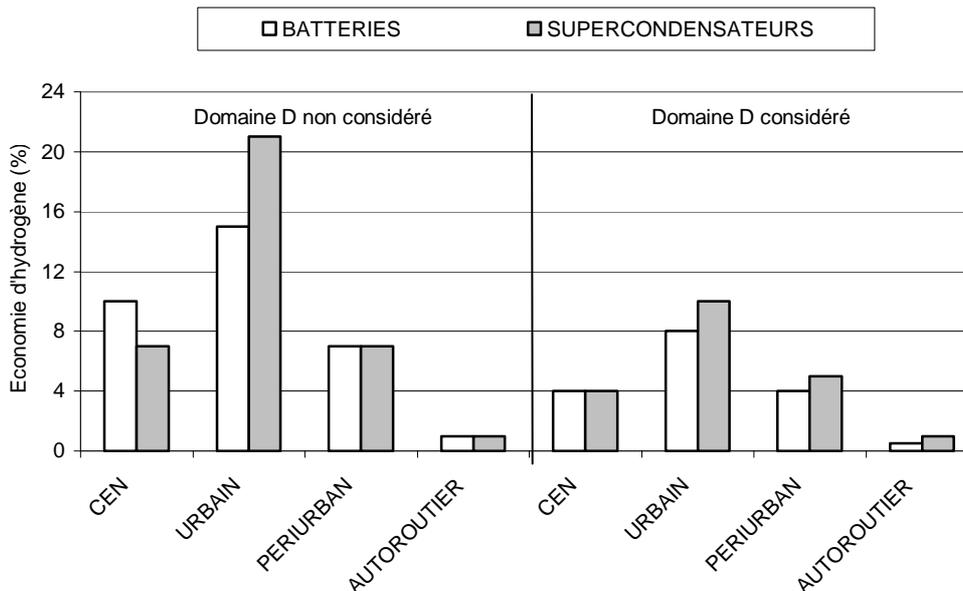


Figure 4-13 : Économies d'hydrogène optimale du système pile à combustible en fonction du cycle de vitesse considéré et de la technologie de la source secondaire d'énergie (batterie ou supercondensateur).

4.3. Exemple applicatif : le prototype Hy-Muve

4.3.1. Présentation du véhicule

Le véhicule Hy-Muve (« Hydrogen Driven Municipal Vehicle ») est un prototype de véhicule à pile à combustible communal chargé de nettoyer les chaussées, figure 4-14. Ce projet est issu d'une collaboration entre des entreprises industrielles (*Bücher, Proton Motor Fuel Cell*) et des centres de recherches (*EMPA, Paul Scherrer Institut*). Le véhicule existe en motorisation diesel et il s'agit de le faire évoluer en véhicule à pile à combustible hybride.

Le véhicule a deux modes de fonctionnement :

- Conduite : le véhicule se déplace entre les différents lieux d'intervention.
- Nettoyage : le véhicule se déplace lentement et nettoie la chaussée.



Figure 4-14 : Le véhicule Hy-Muve.

Le schéma du groupe motopropulseur et du système de nettoyage est donné figure 4-15. Les différents organes peuvent être classés en 2 catégories :

- Les consommateurs d'énergie électrique :
La propulsion et la ventilation sont assurées par des machines électriques. Les mécanismes de freinage, de direction et de nettoyage sont hydrauliques. L'énergie hydraulique est fournie par une pompe couplée à un moteur électrique.
- La source d'énergie électrique :
Il s'agit d'une architecture hybride composée d'un système à pile à combustible et d'une source secondaire d'énergie.

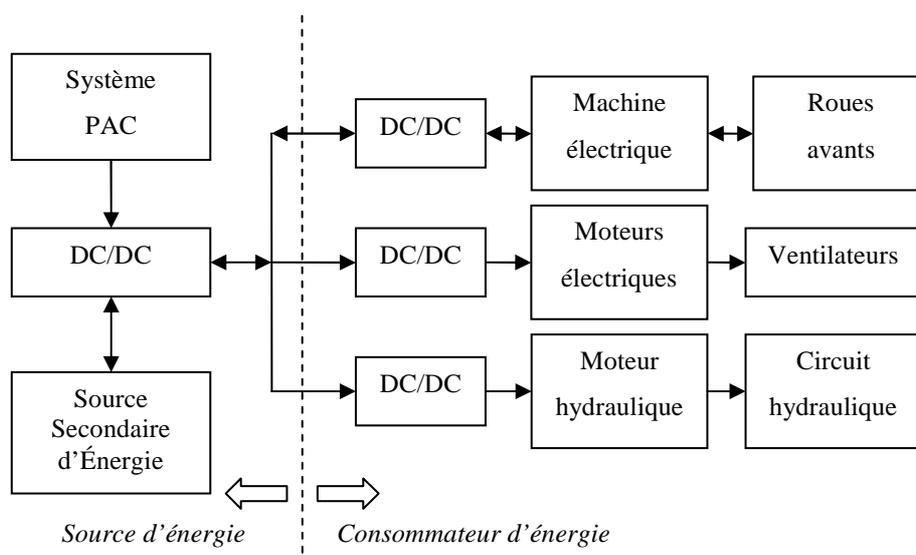


Figure 4-15 : Architecture de puissance du véhicule Hy-Muve.

4.3.2. Objectifs et hypothèses de l'étude

L'objectif est d'étudier le dimensionnement de la source de puissance hybride, figure 4-15. Ce dimensionnement doit permettre avant tout de satisfaire la demande de puissance du véhicule. La consommation d'hydrogène est considérée comme une donnée informative et non décisive dans le choix des composants.

Les limites de dimensionnement et la consommation d'hydrogène ont été étudiées pour différentes configurations de la source de puissance. Ces configurations dépendent des données techniques des composants (système PAC, source secondaire d'énergie, convertisseur de puissance) et des limites de fonctionnement imposées (dynamique du système PAC, limite de courant et de puissance des composants électriques...).

a. Pile à combustible

Le système pile à combustible est caractérisé par sa courbe de rendement (figure 4-16). Il s'agit de la seule donnée disponible. La courbe de consommation instantanée d'hydrogène est reconstruite à partir de la courbe de rendement figure 4-16 :

$$\dot{m}_{H_2} (P_{sysPAC}) = \frac{P_{sysPAC}}{\eta_{sysPAC} \cdot PCI_{H_2}}, \eta_{sysPAC} \neq 0 \quad (4.6)$$

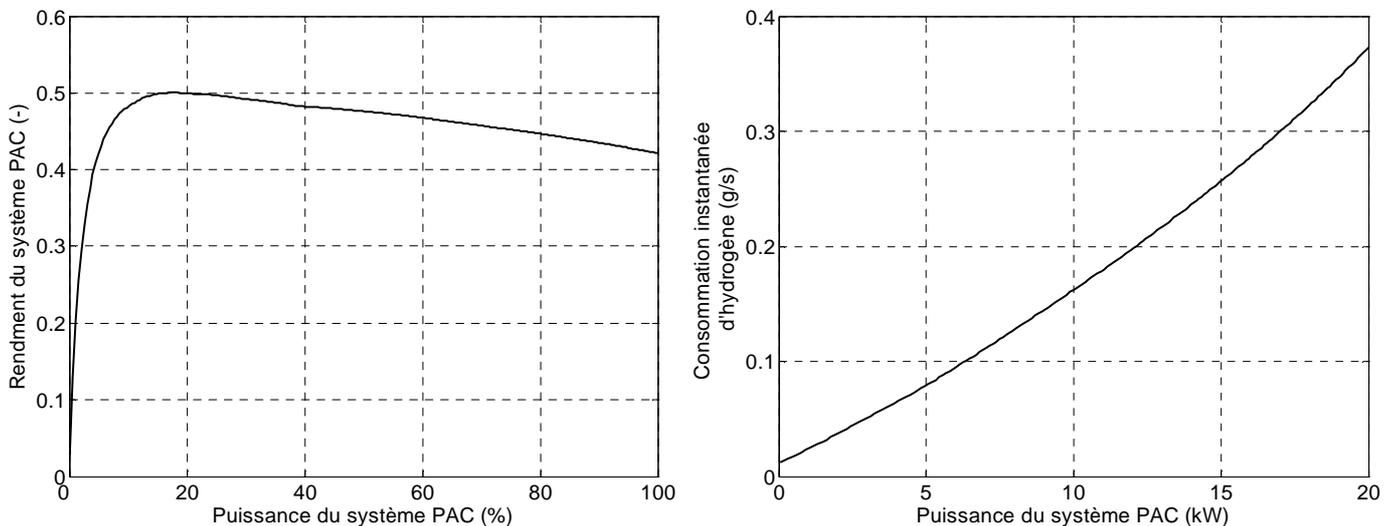


Figure 4-16 : Rendement du système pile à combustible (gauche) et consommation instantanée d'hydrogène pour un système de 20kW (droite).

Les données techniques du système pile à combustible révèlent deux contraintes majeures :

- Dynamique : le temps de montée en puissance est de $T_{10\% \rightarrow 90\%} = 20\text{ s}$.
- Puissance minimale : il est recommandé, pour des raisons de durée de vie de la pile à combustible, de ne pas utiliser les cellules élémentaires à des tensions supérieures à 0,8 V. Selon les informations du constructeur, ceci revient à ne pas utiliser le système PAC en dessous de 17,5 % de sa puissance maximale.

b. Source secondaire d'énergie

Le cahier des charges impose l'utilisation de batteries Zebra /Dustmann 2004/. Les batteries Zebra sont de type Sodium-nickel-chloride et fonctionnent à une température comprise entre 270 °C et 350 °C. Les caractéristiques d'un élément sont renseignées dans le tableau 4-1.

 <p>Batterie Zebra (Ensemble d'éléments)</p>	Tension à vide (indépendante de l'état de charge)	2,58V
	Résistance interne (à 300 °C)	$\begin{cases} 0,02\Omega & \text{pour } SOC = 0\% \\ 0,008\Omega & \text{pour } SOC = 100\% \end{cases}$
	Capacité nominale	38 Ah
	Rendement faradique	100 %
	Courant maximal	35 A (110 A en pointe)
	Puissance spécifique	180 W / kg
	Énergie spécifique	118 Wh / kg

Tableau 4-1 : Caractéristiques électrique d'un élément de batterie.

Le fonctionnement des batteries est contraint par leur limitation en courant. Deux valeurs possibles sont considérées pour la limitation en courant :

- une limite à 35 A ;
- une limite à 70 A.

Deux modes de gestion de l'état de charge des batteries ont également été retenus :

- Un maintien de l'état de charge à 80 % (« charge sustaining », $\Delta SOC = 0\%$) ;
- Une variation globale d'état de charge de -60% sur une journée d'utilisation du véhicule (« charge depleting », $\Delta SOC = -60\%$).

c. Convertisseurs de puissances

L'architecture électrique imposée utilise 2 convertisseurs de puissance au niveau de la source de puissance hybride, figure 4-17. Selon le modèle de convertisseur présenté au chapitre 2, le rendement de base est de $\eta_{conv} = 96\%$ et la consommation permanente P_{conv_const} correspond à 0,5 % de la puissance maximale de sortie.

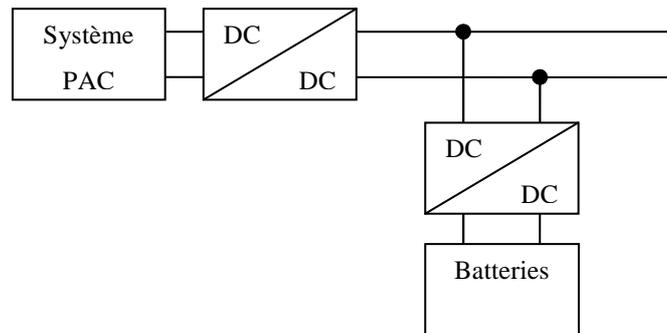


Figure 4-17 : Schéma électrique de la source de puissance.

d. Profil de demande de puissance

Le profil de la demande de puissance est une donnée du cahier des charges. Il correspond à une journée d'opération du Hy-Muve (8h). Il est composé de 2 courtes phases de conduites en début et fin d'opération (phase 1) et d'une longue phase de nettoyage (phase 2) (figure 4-18).

Par hypothèse, la variation de masse du véhicule en fonction du dimensionnement de la source de puissance n'est pas considérée. Cette hypothèse n'est pas trop restrictive dans la mesure où le véhicule à vide à une masse prépondérante de 3000 kg. Par voie de conséquence, la demande de puissance de la figure 4-18 reste identique quelles que soient les tailles du système PAC et des batteries considérées.

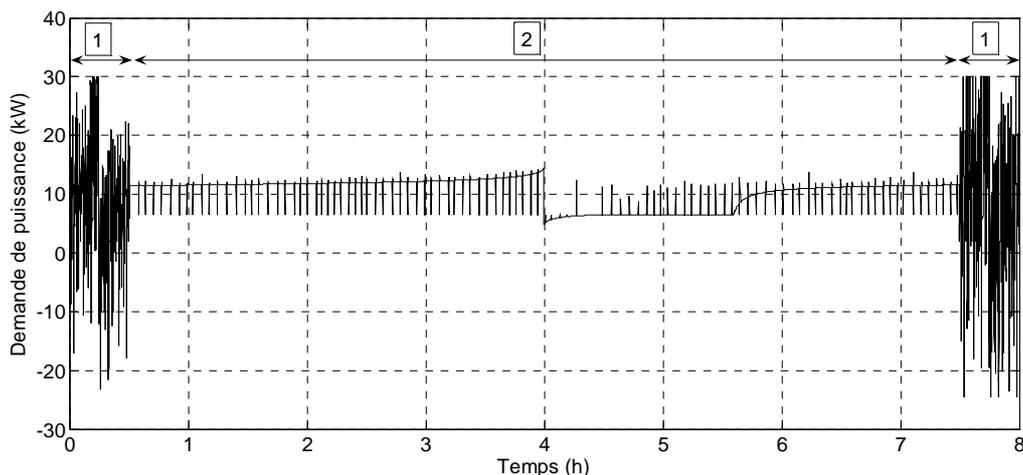


Figure 4-18 : Profil de demande de puissance du véhicule

1 : Phase de conduite ;
2 : Phase de nettoyage.

e. Méthodologie

Les cartographies de consommation d'hydrogène ont été calculées pour un ensemble de couples « système PAC »/batteries. La méthodologie est identique à celle présentée en début de chapitre. Les limites de dimensionnement liées aux performances dynamiques (vitesse et accélération) ne sont pas prises en compte, le confort de conduite n'étant pas la priorité de ce type de véhicule.

Selon les hypothèses retenues sur le système PAC ou sur les batteries, plusieurs configurations du Hy-Muve ont été considérées. Devant la grande quantité d'informations obtenues par simulations, seule une partie est présentée dans ce mémoire. Le choix s'est porté sur cinq configurations particulières, chacune se différenciant de la précédente par le changement d'un seul paramètre, figure 4-19.

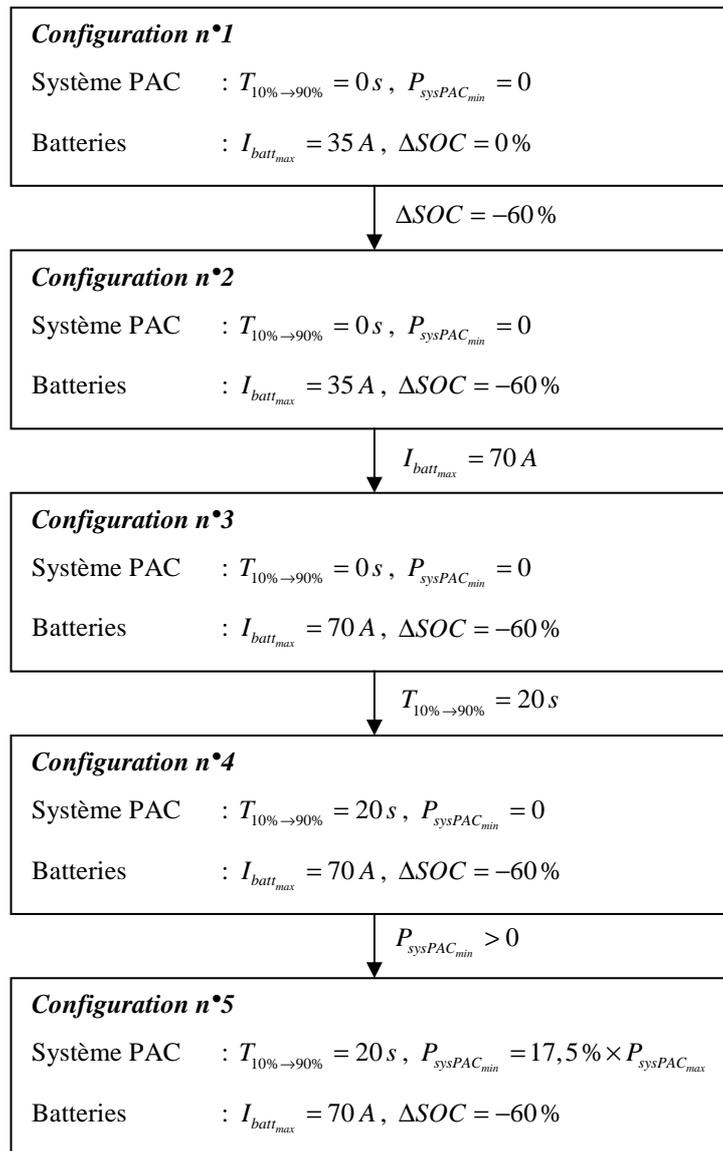


Figure 4-19 : Configurations du Hy-Muve étudiées.

4.3.3. Résultats de l'étude

Les cartographies de consommation d'hydrogène pour chaque configuration du prototype, figure 4-19, sont fournies en ANNEXE 2. L'ensemble des résultats obtenus permet de tirer les conclusions suivantes :

- L'hybridation de la source de puissance ne permet pas d'obtenir de réduction significative de la consommation d'hydrogène lorsque les batteries sont utilisées en maintien d'état de charge ($\Delta X = 0$). Ceci s'explique par la dynamique de la demande de puissance, figure 4-18 : l'utilisation des batteries n'est profitable que pendant les

courtes phases de conduites, alors qu'elle est inutile pendant de longues phases où la demande de puissance est constante.

- Une réduction significative de la consommation d'hydrogène ne peut être obtenue que par une décharge globale des batteries durant une journée d'opération ($\Delta SOC = -60\%$). De manière évidente, les batteries devront être rechargées chaque nuit par le réseau électrique urbain.
- Dans le cas du prototype Hy-Muve, l'hybridation de la source de puissance à principalement pour but de réduire la taille de la pile à combustible pour des raisons d'encombrements et de gestion thermique.
Par exemple, pour la **configuration n°1**, le véhicule équipé d'un système pile à combustible non-hybride requiert une PAC de 35 kW. En utilisant 240 éléments de batteries, la puissance PAC est réduite à 15 kW. Notons que dans ce cas, le volume gagné par la diminution de la puissance du système PAC ne sera pas suffisant pour stocker toutes les batteries.
- Une utilisation plus « agressive » des batteries (limitation de courant à 70 A au lieu de 35 A) permet de réduire le nombre d'éléments minimum requis. Dans la **configuration n°3**, un système PAC de 15 kW et 160 éléments de batterie est envisageable (contre 240 pour une limite de courant à 35 A). Cette observation montre que le dimensionnement des batteries est contraint par la puissance maximale qu'elles peuvent fournir ; l'énergie dont elles disposent n'est pas un facteur limitant.
- Les contraintes liées au système PAC ($T_{10\% \rightarrow 90\%} = 20\text{ s}$ et $P_{\text{sysPAC}_{\min}} = 17,5\% \times P_{\text{sysPAC}_{\max}}$) ont une influence négligeable sur la consommation d'hydrogène.
- La contrainte de dynamique sur le système PAC, $T_{10\% \rightarrow 90\%} = 20\text{ s}$ impose l'utilisation d'une source secondaire d'énergie pour satisfaire la demande de puissance. En d'autres termes, les dimensionnements avec un faible nombre d'éléments de batterie ne peuvent pas être envisagés (**configuration n°4**).

A la lumière de ces observations, et selon le cahier des charges établi, le prototype Hy-Muve sera équipé d'un système PAC d'une puissance comprise entre 10 et 15 kW avec un pack de batteries comprenant environ 160 éléments pour un courant maximal de 70 A (soit 18 kW, 15,7 kWh). Les concepteurs du véhicule ont décidé d'utiliser les batteries en maintien d'état de charge et non en décharge au cours d'une journée d'opération.

Pour fixer les choix de dimensionnement définitifs, une cartographie avec un maillage plus fin recentrée autour de la zone étudiée a été élaborée, figure 4-21. Le profil de demande de puissance définitif a également été fourni, figure 4-20. La configuration du véhicule retenue est la suivante :

Configuration n°6

Système PAC : $T_{10\% \rightarrow 90\%} = 20 \text{ s}$, $P_{\text{sysPAC}_{\min}} = 17,5\% \times P_{\text{sysPAC}_{\max}}$

Batteries : $I_{\text{batt}_{\max}} = 70 \text{ A}$, $\Delta\text{SOC} = 0\%$

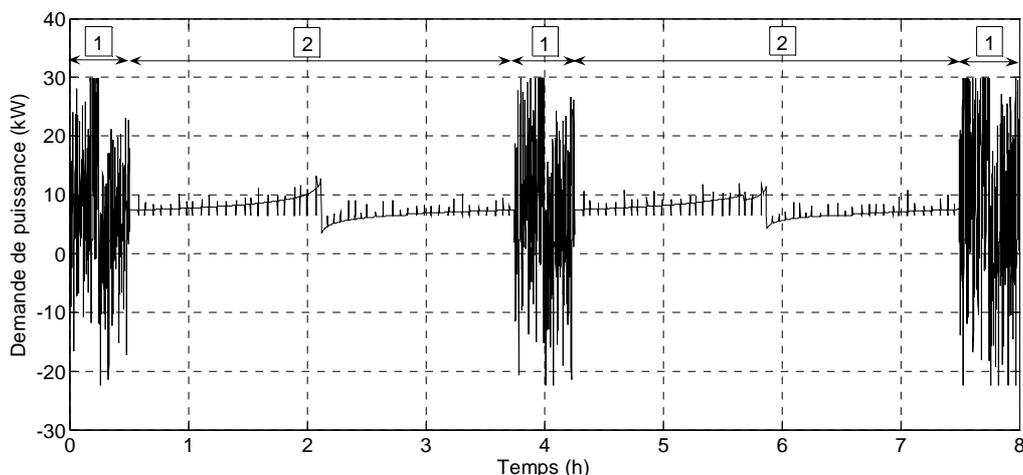


Figure 4-20 : Profil de demande de puissance final du véhicule

1 : Phase de conduite ;

2 : Phase de nettoyage.

Une modification a été également apportée à la méthodologie. Jusqu'à présent le domaine des « solutions impossibles » représentait les dimensionnements ne satisfaisant pas la demande de puissance du groupe motopropulseur. Cependant, en usage réel, les concepteurs du véhicule admettent que la puissance demandée ne puisse pas être complètement réalisée. Afin que le profil de puissance reste significatif, la durée cumulée $T_{\text{impossible}}$ pendant laquelle la puissance demandée n'est pas réalisée doit être limitée dans le temps.

On définit R_{perte} comme le rapport entre la durée $T_{impossible}$ et la durée totale $N \cdot T_s$ du cycle de puissance :

$$R_{perte} = \frac{T_{impossible}}{N \cdot T_s} \quad (4.7)$$

Ainsi, il est possible de choisir volontairement un sous dimensionnement tout en ayant connaissance des restrictions apportées au véhicule en terme de puissance. Dans le cas du Hy-Muve, une diminution de la puissance disponible n'affectera le véhicule que lors des phases d'accélération mais n'aura aucun impact lors de phases de nettoyage de la chaussée, c'est à dire 75 % du temps. Notons que la comparaison entre la consommation d'hydrogène d'un véhicule au dimensionnement admissible et un véhicule sous dimensionné est « biaisée » car le profil de puissance effectivement réalisé est différent.

La figure 4-21 présente la consommation d'hydrogène pour la **configuration n°6**. La figure présente deux zones, la première correspond aux véhicules dimensionnés correctement et la deuxième est celles des véhicules sous dimensionnés. Pour cette dernière, afin d'évaluer le sous dimensionnement, le rapport R_{perte} est également donné.

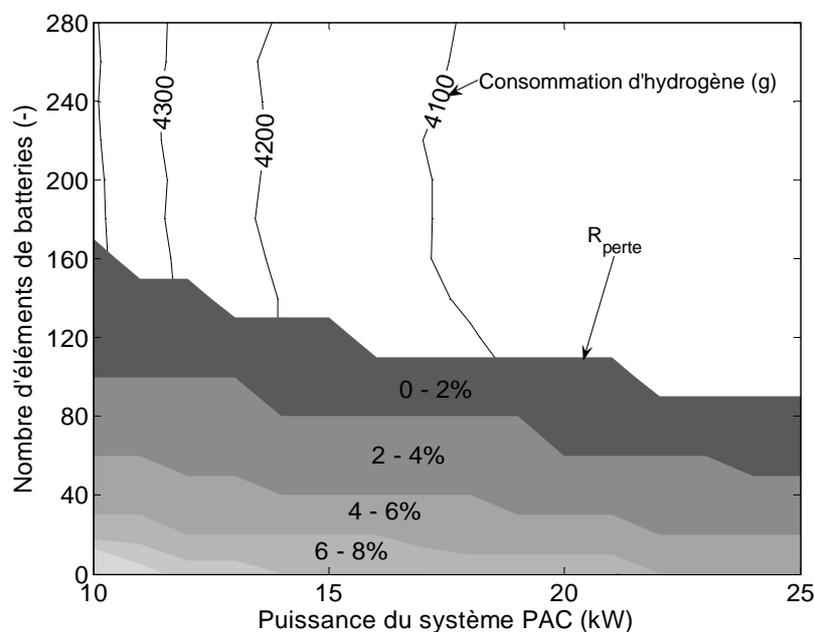


Figure 4-21 : Consommation d'hydrogène et évaluation des pertes de puissance pour la **configuration n°6** du Hy-Muve.

4.3.4. Conclusion

Le prototype Hy-Muve a été une opportunité pour tester la méthodologie de dimensionnement d'un véhicule à pile à combustible hybride. Les résultats ont permis de confirmer plusieurs aspects sur l'hybridation d'un système PAC :

- Pour des profils de demandes de puissance peu dynamiques (i.e. avec une demande de puissance relativement constante), l'utilisation d'une source secondaire d'énergie ne permettra pas d'obtenir des économies d'hydrogène significatives.
- En revanche, disposer d'une source secondaire d'énergie permet de réduire les contraintes de fonctionnement sur le système pile à combustible (puissance maximale, dynamique).
- Il est difficile, voire impossible, de définir des règles de dimensionnements génériques pour des groupes motopropulseur à PAC hybride. L'étude doit se faire au cas par cas avec des méthodes d'analyse adaptées au cahier des charges.

4.4. Conclusion

Un outil d'aide au dimensionnement de la source de puissance d'un véhicule à pile à combustible hybride a été proposé. Cet outil permet, via un cahier des charges défini, d'étudier de manière qualitative et quantitative l'influence du dimensionnement d'un couple « système pile à combustible/source secondaire d'énergie » sur la consommation d'hydrogène. Cet outil repose sur un algorithme d'optimisation globale (basée sur la commande optimale, chapitre 3). Il permet :

- de comparer les différents dimensionnements, les consommations obtenues étant toutes minimales ;
- de bénéficier de temps de calcul réduits ;

En outre, l'expertise réalisée sur le véhicule Hy-Muve a permis d'appliquer la méthodologie proposée à un exemple concret et ainsi de conforter la validité de l'approche proposée.

Dès lors que la phase de conception est achevée et que le prototype a été réalisé, il est indispensable de mettre en œuvre des stratégies de commande temps réel. Ces stratégies temps réel doivent permettre d'exploiter au maximum les possibilités offertes par le dimensionnement retenu.

Chapitre 5. Mise en œuvre des stratégies de commande

5.1. INTRODUCTION	142
5.2. APPLICATION DE L'OPTIMISATION GLOBALE : LE PROTOTYPE PAC-CAR II	142
5.2.1. Présentation du prototype.....	142
5.2.2. Formulation du problème d'optimisation globale.....	144
5.2.3. Résultats de l'optimisation	146
5.2.4. Résultats expérimentaux	148
5.2.5. Conclusion.....	149
5.3. VALIDATION DES STRATÉGIES DE COMMANDE TEMPS RÉEL : DÉVELOPPEMENT D'UNE PLATEFORME D'ESSAI.....	150
5.3.1. Présentation de la plateforme d'essais	150
5.3.2. Convertisseur de puissance : modélisation et commande	152
5.3.3. Identification et modélisation du banc d'essai.	154
5.3.4. Résultats expérimentaux	167
5.3.5. Conclusion.....	179
5.4. CONCLUSION	179

5.1. Introduction

Dans ce chapitre, les stratégies de commande développées au chapitre 3 sont mises en œuvre sur des applications réelles.

Dans un premier temps, un prototype de véhicule à pile à combustible destiné à des compétitions d'économie d'énergie est présenté. Ce prototype évoluant uniquement sur circuit fermé, le parcours routier est connu a priori. Un problème d'optimisation globale est formulé et résolu par programmation dynamique. A partir des profils de commande optimaux obtenus en simulation, une stratégie de commande temps réel a été déduite et appliquée sur le prototype.

Dans un deuxième temps, une plateforme expérimentale de système pile combustible hybride est présentée. Cette plateforme a été réalisée en collaboration avec le Paul Scherrer Institut (Villigen, Suisse) et permet d'émuler, à une échelle réduite, le comportement d'un groupe motopropulseur à PAC. L'objectif de ce banc d'essais est d'évaluer des stratégies de commande temps réel et de comparer l'utilisation de batteries et de supercondensateurs dans le cadre d'applications aux véhicules hybrides à pile à combustible.

5.2. Application de l'optimisation globale : le prototype PAC-Car II

5.2.1. Présentation du prototype

Le prototype PAC-Car II, figure 5-1 et tableau 5-1, est un véhicule à pile à combustible développé par l'ETH Zürich /PAC-Car/ /Santin et al. 2007/. Il a été conçu pour participer à des courses d'économie d'énergie telle que le Shell Eco-Marathon /Shell/. Dans ce type de compétition, l'objectif est de parcourir une distance donnée en consommant le minimum de carburant et en respectant une contrainte sur la vitesse moyenne. Dans la pratique, les compétitions se déroulent sur des circuits fermés (par exemple le circuit Paul-Armagnac, Nogaro) ; pour valider une mesure de consommation, le véhicule doit parcourir un nombre fixé de tours dans un temps imparti.



Figure 5-1 : Le prototype PAC-Car II.

Longueur x largeur x hauteur	$2,78 \times 0,57 \times 0,61 \text{ m}$
Masse du véhicule	$M_{veh} = 30 \text{ kg}$
Surface frontale	$A_f = 0,254 \text{ m}^2$
Coefficient de résistance aérodynamique	$C_x = 0,075$
Coefficient de résistance au roulement	$C_r = 0,001$
Pile à combustible	Type PEM, technologie PSI (Paul Scherrer Institut, Suisse)
Réservoirs d'hydrogène	2 bonbonnes d'1 litre comprimées à 11 bar, soit 2 g d'hydrogène
Motorisation	2 moteurs électriques à courant continu, 24 V / 150 W

Tableau 5-1 : Caractéristiques principales du prototype PAC-Car II.

Le groupe motopropulseur de PAC-Car II est présenté figure 5-2. Si l'architecture de la propulsion électrique reste classique, chaque composant (des réservoirs d'hydrogène à la roue) a été optimisé selon des critères de rendements et de poids, l'objectif étant de disposer d'un véhicule ultra-léger et ultra-efficace.

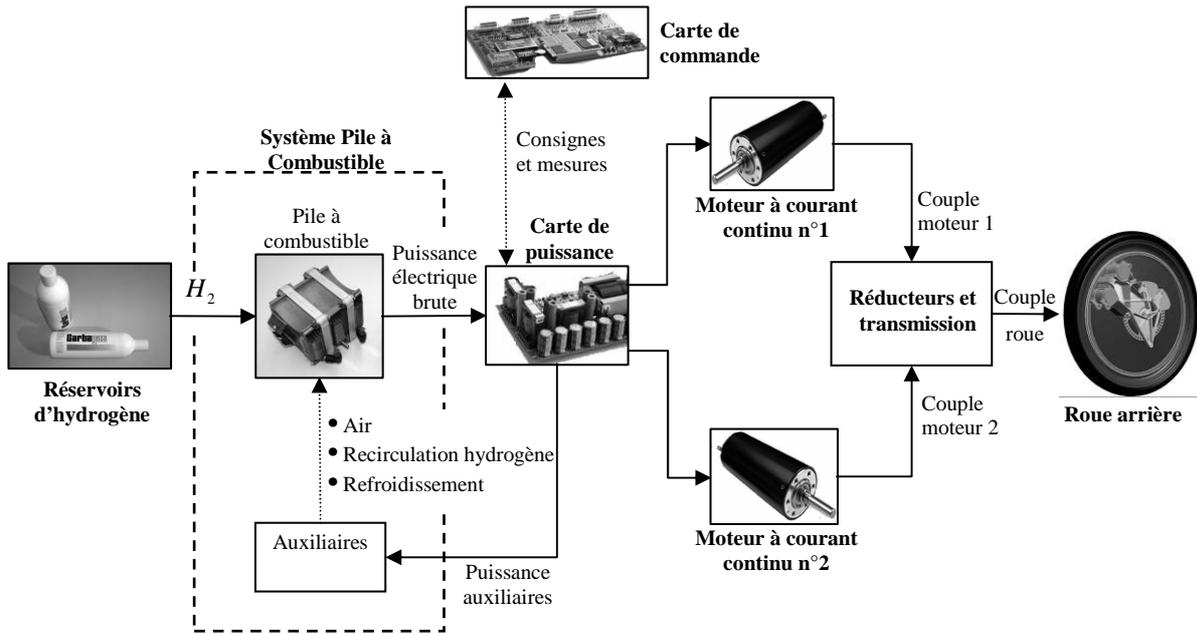


Figure 5-2 : Schéma du groupe motopropulseur de PAC-CAR II.

Le prototype n'est pas hybride car il ne dispose pas de source secondaire d'énergie, figure 5-2. Le problème d'optimisation ne consiste pas à optimiser les flux énergétiques mais à définir un profil de vitesse idéal qui minimise la consommation d'hydrogène pour un parcours donné et une limite de temps imposé.

5.2.2. Formulation du problème d'optimisation globale

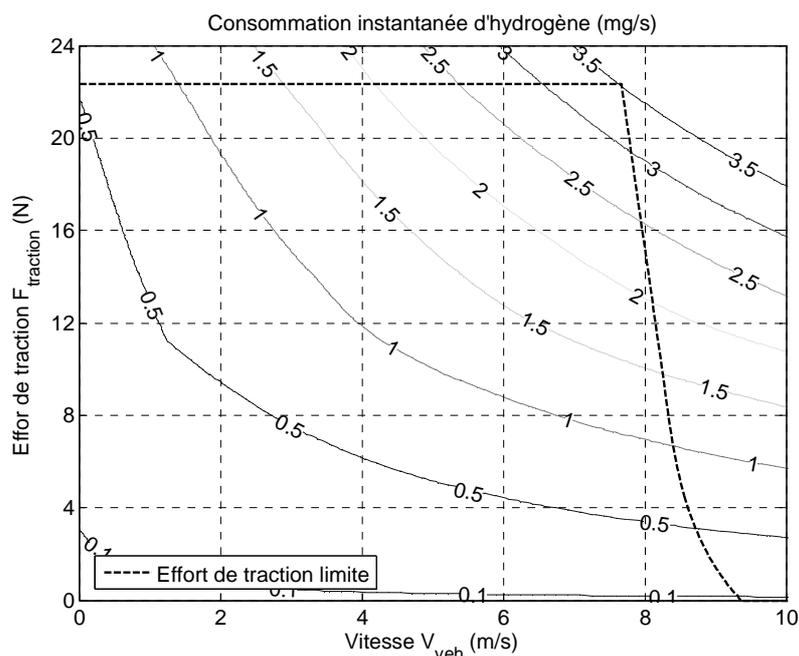
L'objectif de l'optimisation globale est d'aboutir à la formulation d'une stratégie de course. Cette étude a été menée en collaboration avec le Docteur Christopher Onder du laboratoire IMRT (« Institut für Mess- und Regeltechnik ») de l'ETH Zürich.

L'objectif d'une compétition d'économie d'énergie est évidemment de minimiser la consommation d'hydrogène sur l'ensemble du parcours. Le critère à minimiser est donc :

$$J = \int_0^{T_f} \dot{m}_{H_2} (F_{traction}(u), V_{veh}(u)) \cdot du \quad (5.1)$$

avec T_f la durée du trajet.

Dans (5.1), la consommation instantanée d'hydrogène \dot{m}_{H_2} est exprimée en fonction de l'effort de traction $F_{traction}$ et en fonction de la vitesse V_{veh} . Cette cartographie $\dot{m}_{H_2}(F_{traction}, V_{veh})$, figure 5-3, intègre l'ensemble des pertes du groupe motopropulseur, du réservoir à la roue, figure 5-2. Les pertes et rendements des différents composants ont été mesurés sur banc d'essais.


 Figure 5-3 : Consommation instantanée d'hydrogène $\dot{m}_{H_2}(F_{traction}, V_{veh})$.

L'effort de traction maximal $\bar{F}_{traction}$ est fonction de la vitesse du véhicule (figure 5-2) :

$$0 \leq F_{traction}(t) \leq \bar{F}_{traction} \quad (5.2)$$

Cette limite est imposée par le couple maximal des moteurs électriques et par la tension maximale dont ils disposent. La tension maximale est imposée par la tension de la pile à combustible et par l'architecture des convertisseurs de puissance des moteurs (hacheurs abaisseurs de tension).

La principale contrainte du problème est la durée maximale impartie pour parcourir l'ensemble du trajet :

$$T_f \leq T_{max} \quad (5.3)$$

avec T_{max} le temps maximal imparté.

Enfin, la dynamique du véhicule est donnée par :

$$M_{veh} \cdot \dot{V}_{veh}(t) = F_{traction}(t) - F_{aero}(t) - F_{roul}(t) - F_{pente}(t) \quad (5.4)$$

A partir de (5.4), la position du véhicule X_{veh} peut être obtenue par :

$$X_{veh}(t) = \frac{1}{M_{veh}} \cdot \int \int_0^t (F_{traction}(u) - F_{aero}(u) - F_{roul}(u) - F_{pente}(u)) \cdot du \quad (5.5)$$

Le problème d'optimisation peut être résumé de la manière suivante :

Problème d'optimisation de PAC-Car II :

- Critère à minimiser :

$$J = \int_0^{T_f} \dot{m}_{H_2} (F_{traction}(u), V_{veh}(u)) \cdot du \quad (\text{Consommation d'hydrogène})$$

- Système :

$$X_{veh}(t) = \frac{1}{M_{veh}} \cdot \int \int_0^t (F_{traction}(u) - F_{aero}(u) - F_{roul}(u) - F_{pente}(u)) \cdot du$$

(Dynamique du véhicule)

- Contraintes :

$$0 \leq F_{traction}(t) \leq \bar{F}_{traction}(V_{veh}(t)) \quad (\text{Effort de traction limite})$$

$$T_f \leq T_{max} \quad (\text{Durée limite})$$

Le problème d'optimisation a été résolu par programmation dynamique. La variable de décision choisie est l'effort de traction $F_{traction}$ et la variable d'état est la distance parcourue par le véhicule X_{veh} . La méthode de résolution reste identique à celle présentée dans le cas de véhicules hybrides au chapitre 3. Le détail de la résolution est fourni en ANNEXE 3.

5.2.3. Résultats de l'optimisation

Les profils optimaux d'effort de traction et de vitesse du véhicule sont donnés figure 5-4 pour le circuit de Nogaro. Ces résultats sont difficilement exploitables en l'état pour plusieurs raisons :

- l'optimisation ne tient pas compte des perturbations rencontrées dans des conditions réelles de course (vent, véhicules concurrents sur la piste...);
- les profils optimaux calculés correspondent à une commande en boucle ouverte du véhicule.

Il est donc nécessaire de déduire une stratégie de course basée sur les résultats de l'optimisation globale. Le pilote du véhicule devra s'efforcer de suivre les indications fournies par la stratégie de course. Le pilote est le correcteur du système qui doit assurer le suivi de la trajectoire optimale tout en rejetant les perturbations.

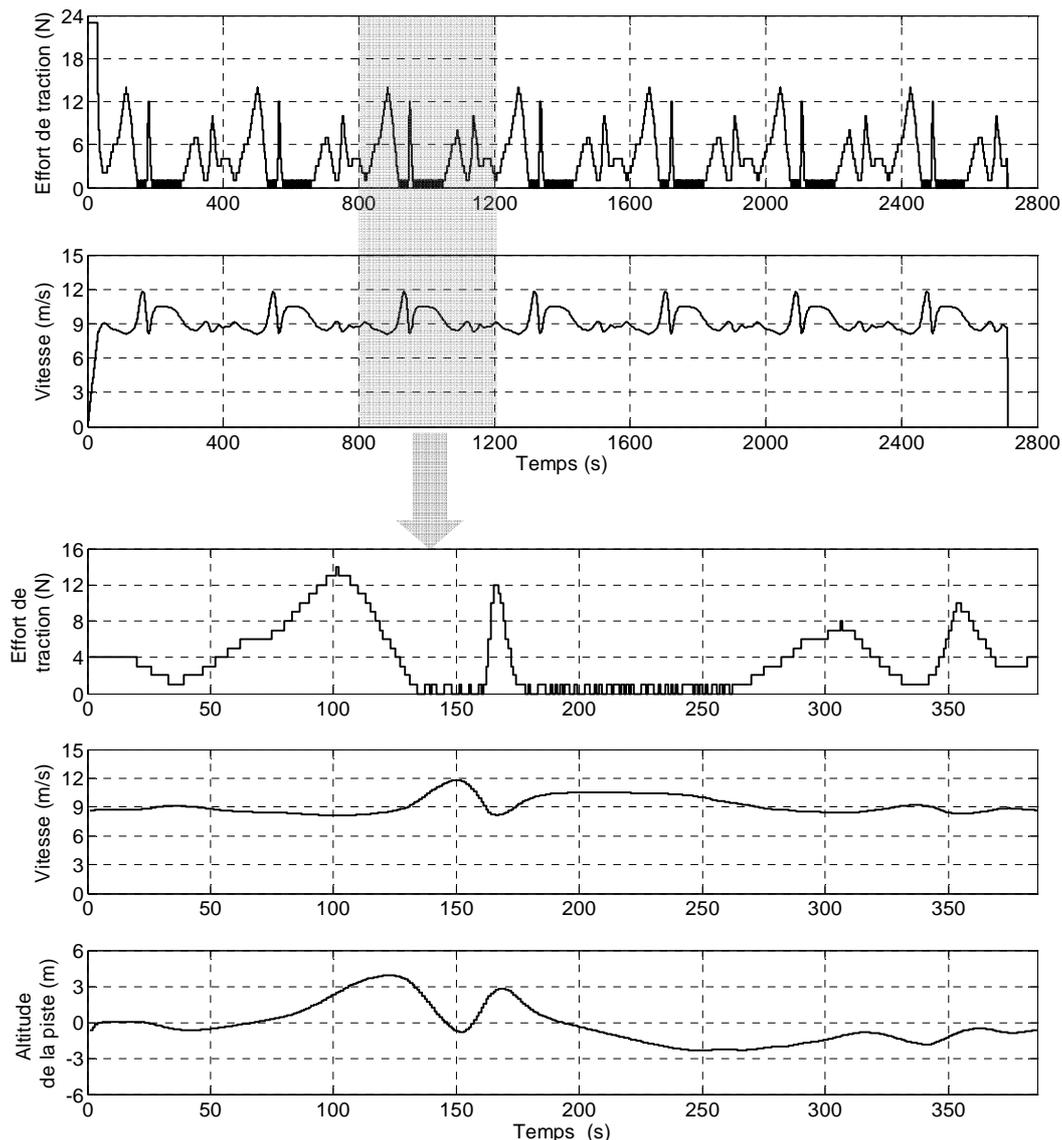


Figure 5-4 : Résultats de l'optimisation de PAC-Car II (circuit de Nogaro, 7 tours, haut, et 1 tour lancé, bas).

Une règle de conduite générale est dégagée : les phases de traction interviennent pour maintenir une vitesse constante de 9 m/s lors des montées et sur les parties planes du circuit.

Un modèle énergétique du véhicule PAC-Car II développé sous l'environnement MATLAB/Simulink a permis de simuler et d'ajuster la stratégie de course finale. Il en résulte une liste d'instructions au pilote qui, pour des raisons de simplicité et de lisibilité, ont été reportées sur un schéma du tracé du circuit, figure 5-5.

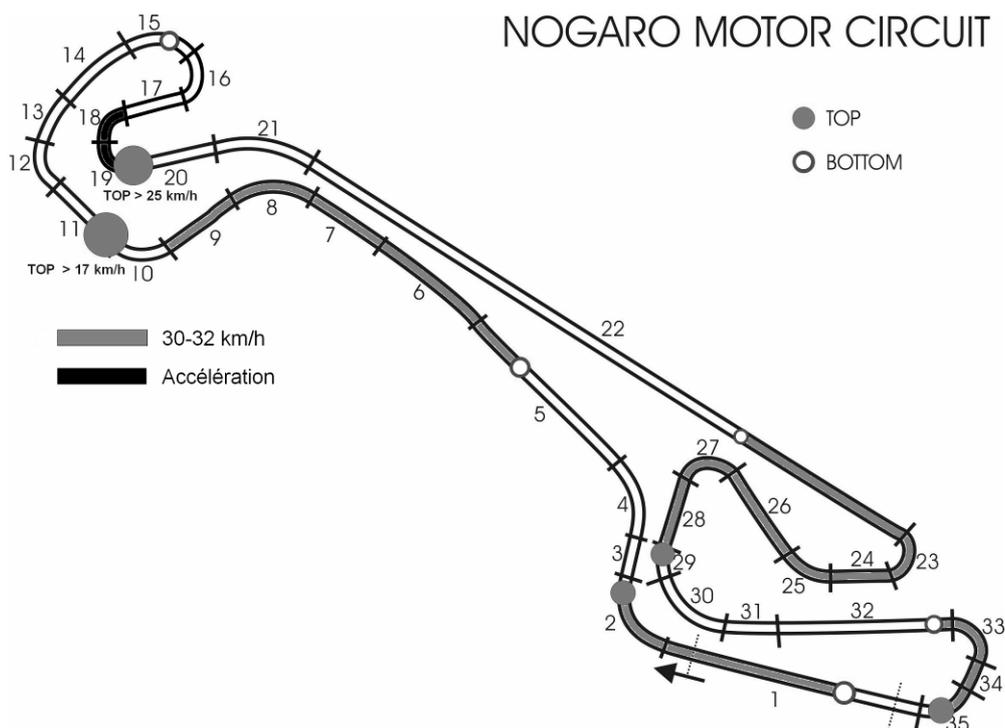


Figure 5-5 : Stratégie de course utilisée sur le circuit de Nogaro.

5.2.4. Résultats expérimentaux

La stratégie présentée ci-dessus, figure 5-5, a été utilisée lors de la course de Nogaro (Gers, France) les 21 et 22 Mai 2005. En observant les données réelles enregistrées pendant la course, on voit que le pilote a essayé de suivre les trajectoires proposées figure 5-6.

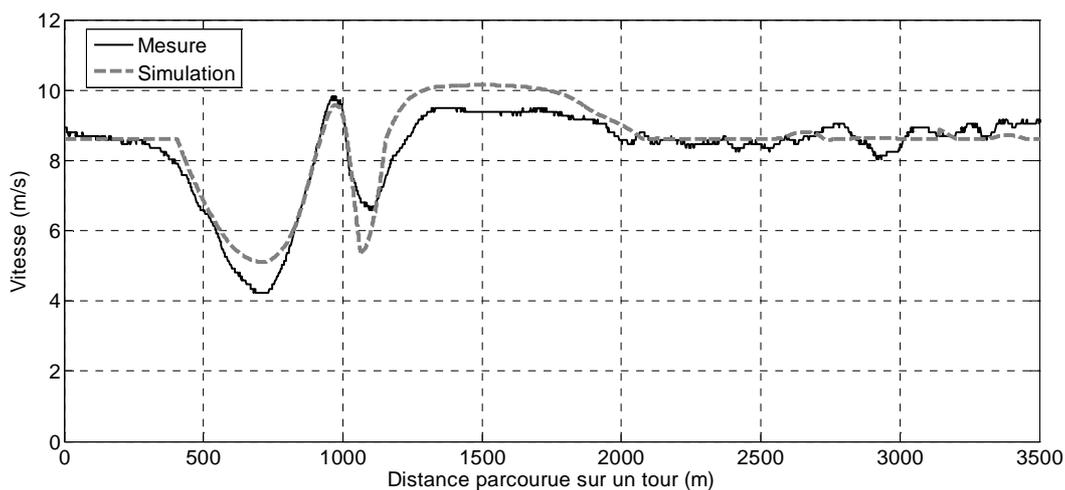


Figure 5-6 : Profil de vitesse simulé et réel enregistré pendant la course.

La consommation du véhicule enregistré par mesure officielle fut de 1,75 g d'hydrogène pour parcourir une distance de 25 km, ce qui correspond à une consommation équivalente de 3836 km/litre de supercarburant (équivalence basée sur le pouvoir calorifique inférieure de

l'hydrogène et du supercarburant). Les résultats de simulation estimaient la consommation d'hydrogène à 1,80 g, soit une erreur de 3 % par rapport aux résultats réels.

Basé sur le même principe d'optimisation, une stratégie a été élaborée pour le circuit de Ladoux situé sur le centre technologique Michelin (Ladoux, France). Le prototype PAC-Car II y a établi un nouveau record du monde de consommation avec 1,02 g d'hydrogène pour parcourir 21 km de distance, l'équivalent de 5385 km/litre de supercarburant. Les résultats de simulation prévoient une consommation de 1 g, ce qui représente une erreur de 2 % par rapports aux résultats réels.

5.2.5. Conclusion

Les travaux effectués sur le prototype PAC-Car II concernaient :

- la réalisation d'un modèle énergétique du véhicule basé sur les cartographies de rendement des différents organes du groupe motopropulseur ;
- la définition d'une stratégie de course dans le but de minimiser la consommation d'hydrogène. La stratégie est dérivée de la solution au problème d'optimisation globale.

Grâce à cette étude, il a été vérifié que le modèle quasi-statique de véhicule à pile à combustible présenté au chapitre 2 était en mesure d'évaluer correctement la consommation d'hydrogène. Les mesures effectuées ont notamment permis de valider l'hypothèse sur la simplification des dynamiques rapides des organes électriques (système PAC, convertisseurs de puissance, moteurs) pour les études énergétiques.

D'autre part, les résultats ont montré qu'il était possible, dans ce cas particulier, de déduire une stratégie temps réel efficace à partir des résultats issus de l'optimisation globale.

5.3. Validation des stratégies de commande temps réel : développement d'une plateforme d'essai

5.3.1. Présentation de la plateforme d'essais

Dans le cadre d'une convention de recherche entre le LAMIH et le Paul Scherrer Institut (PSI, Villigen, Suisse), une plate forme d'essais à pile à combustible hybride a été développée (figure 5-7 et figure 5-8). Elle est installée à PSI et permet d'émuler, à une échelle réduite, les échanges énergétiques au sein d'un véhicule. Elle a été développée dans deux buts :

- Valider expérimentalement des stratégies de commandes temps réel ;
- Comparer l'utilisation de batteries et de supercondensateurs.

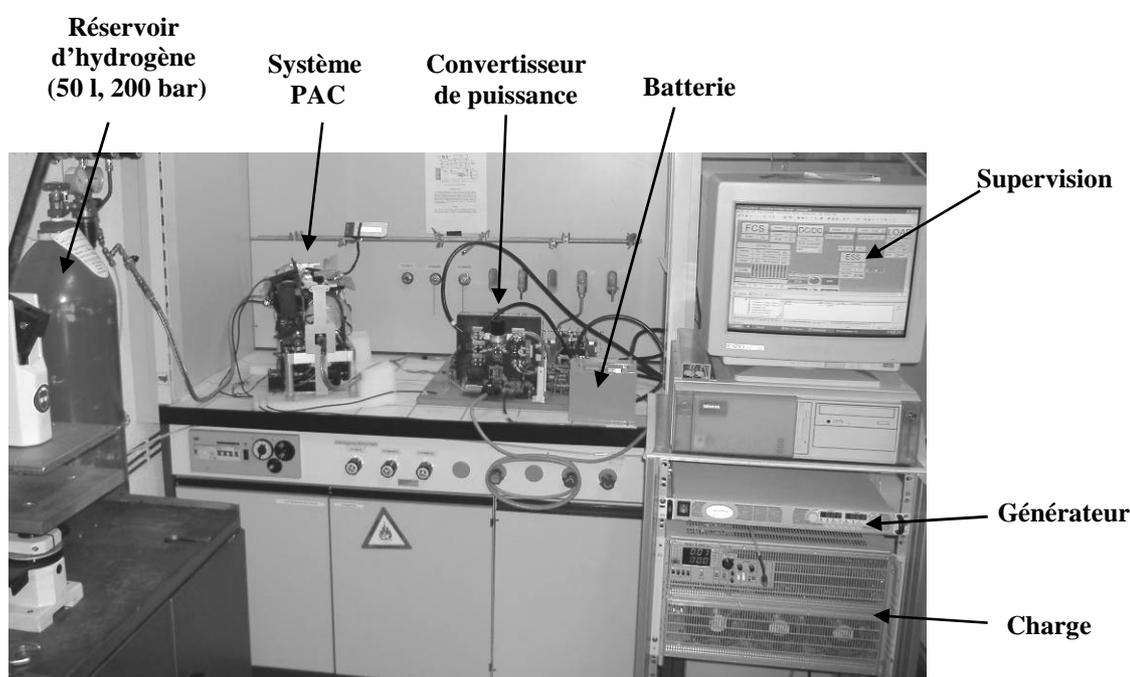


Figure 5-7 : Illustration de la plateforme expérimentale.

La plateforme repose sur le concept HIL (« Hardware In the Loop ») /Amstutz et al. 1999/ : une partie des installations est réelle (pile à combustible, batterie, supercondensateurs, convertisseur de puissance), et l'autre partie est émulée sur ordinateur (le véhicule et sa motorisation) (figure 5-7 et figure 5-8). Elle se compose :

- d'un système pile à combustible portable d'une puissance d'1 kW ;
- d'un unique convertisseur de puissance ;
- d'une source secondaire de puissance composée d'une batterie ou de supercondensateurs ;

- d'une charge électronique émulant la demande de puissance de la machine électrique lors des phases de traction ;
- d'un générateur de puissance émulant les phases de freinage et la récupération de l'énergie cinétique du véhicule ;
- d'une carte d'acquisition DSpace programmée sous l'environnement MATLAB/Simulink. La supervision et l'enregistrement des données sont réalisés sous l'environnement ControlDesk.

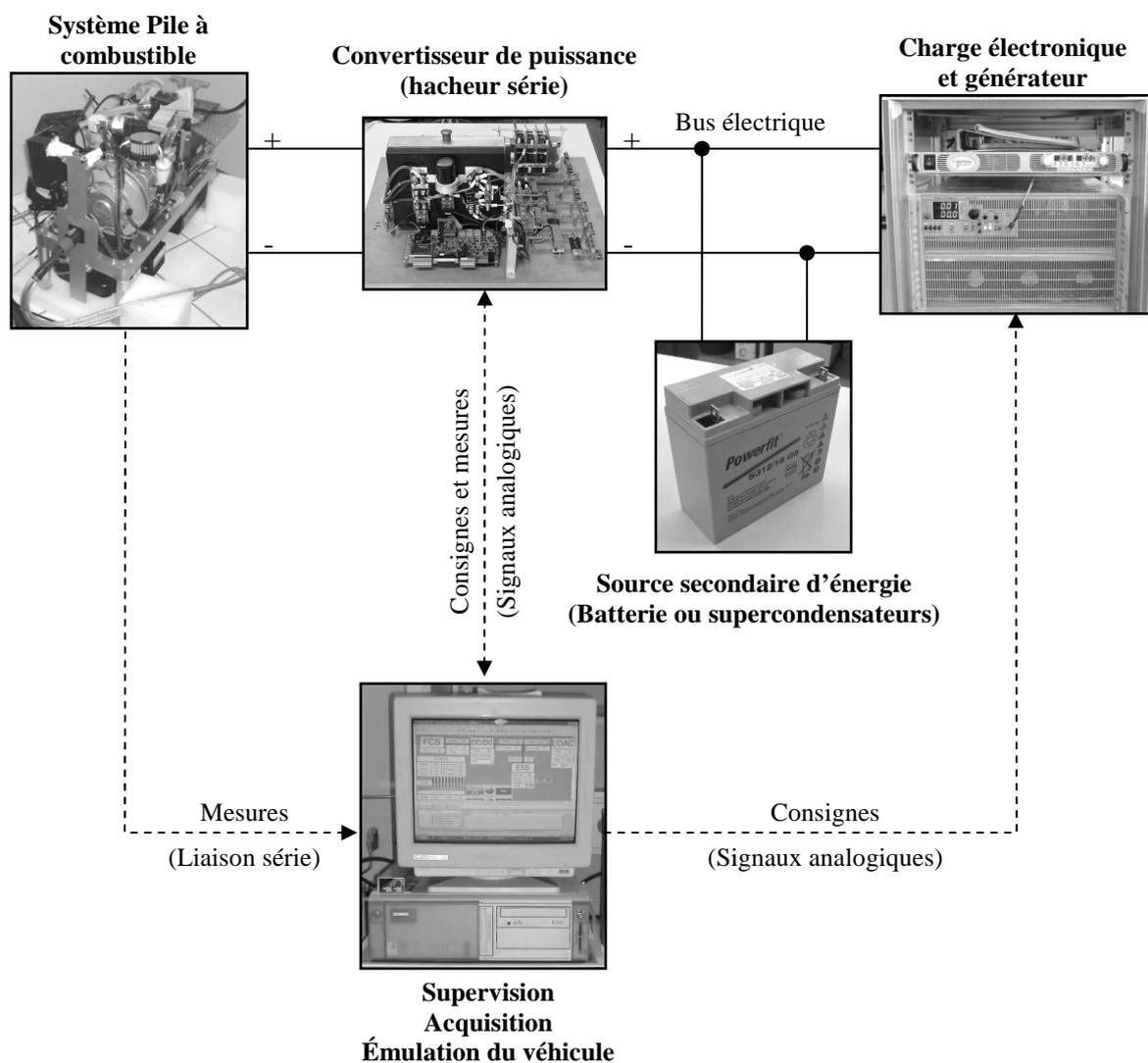


Figure 5-8 : Schéma de la plateforme expérimentale.

Pour des raisons de simplicité et de coût, un seul convertisseur de puissance a été utilisé dans l'architecture retenue, figure 5-8. La source de puissance secondaire est directement couplée au bus électrique et lui impose sa tension. Le convertisseur permet de commander la puissance délivrée par le système PAC. Celui-ci a fait l'objet d'un développement interne au LAMIH.

5.3.2. Convertisseur de puissance : modélisation et commande

Le convertisseur de puissance (figure 5-9) est un hacheur de type série. Sa tension d'entrée est la tension du système pile à combustible V_{sysPAC} et sa tension de sortie V_{bus} est imposée par la source secondaire d'énergie (batterie ou supercondensateurs). Le schéma électrique équivalent de la partie puissance est fourni figure 5-10. L'électronique de commande repose sur une architecture à microcontrôleur dans lequel la loi de commande a été implantée.

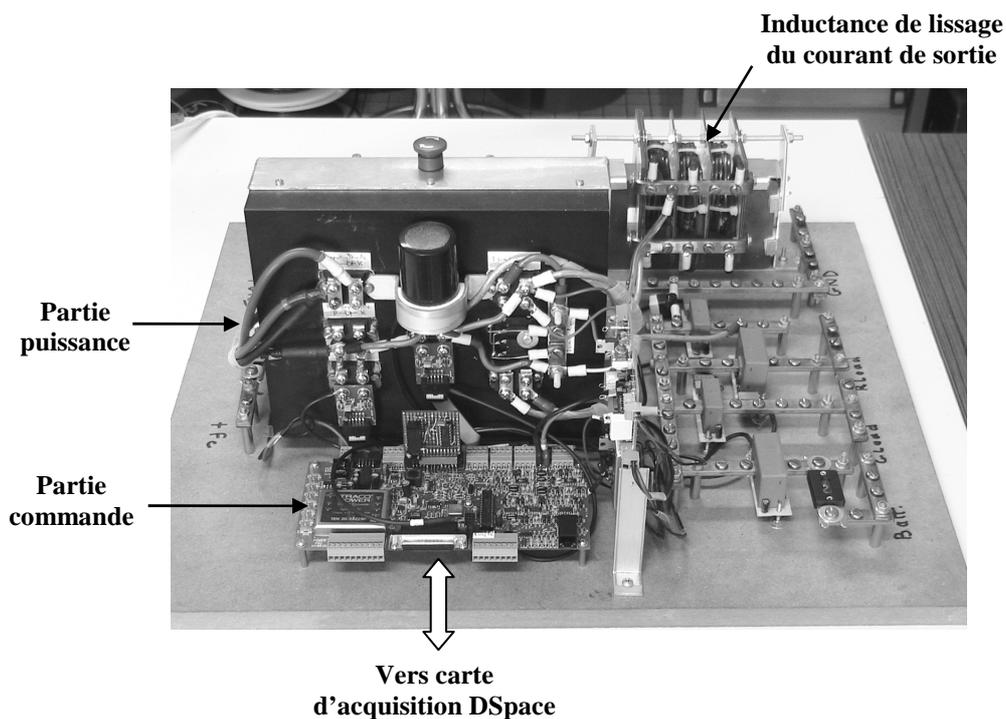
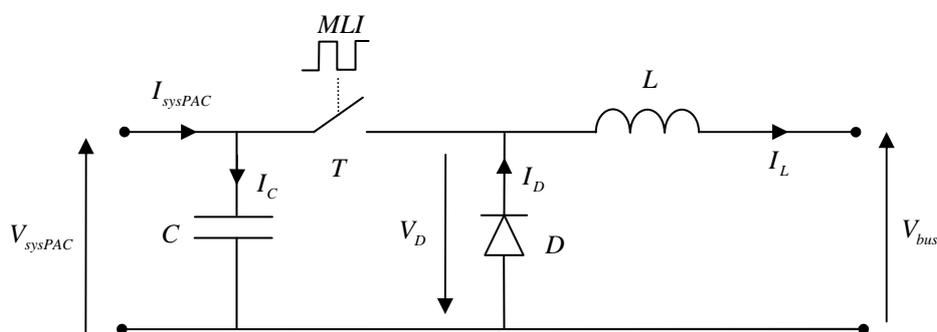


Figure 5-9 : Illustration du convertisseur de puissance.



- C : Capacité d'entrée (filtrage de la tension d'entrée)
- T : Transistor MOSFET
- D : Diode schottky
- L : Inductance de $50 \mu\text{H}$ (filtrage du courant de sortie)
- MLI : Modulation à largeur d'impulsion (fréquence de 40kHz)

Figure 5-10 : Schéma du circuit de puissance du hacheur série.

La commutation du transistor, figure 5-10, est commandée par une MLI (Modulation à Largeur d'Impulsion) de fréquence constante et égale à 40 kHz. Le rapport cyclique $0 \leq \alpha \leq 1$ de la MLI représente l'entrée de commande du système, et le courant I_L correspond à la sortie à commander.

La dynamique du hacheur dépend de l'état du transistor T (passant ou bloqué) /Girard et al. 2003/. Si l'on considère un modèle idéal de la diode, les équations du système sont :

$$\begin{cases} \dot{X}_1(t) = \dot{I}_L(t) = \frac{1}{L} \cdot V_{sysPAC}(t) - \frac{1}{L} \cdot V_{bus}(t) & \text{si } T \text{ passant} \\ \dot{X}_2(t) = \dot{I}_L(t) = -\frac{1}{L} \cdot V_{bus}(t) & \text{si } T \text{ bloqué} \end{cases} \quad (5.6)$$

En utilisant (5.6), un modèle moyen du système est considéré :

$$\dot{I}_L(t) = \alpha \cdot \dot{X}_1(t) + (1 - \alpha) \cdot \dot{X}_2(t) \Leftrightarrow \dot{I}_L(t) = \alpha \cdot \frac{1}{L} \cdot V_{sysPAC}(t) - \frac{1}{L} \cdot V_{bus}(t) \quad (5.7)$$

Dans l'équation du modèle (5.7), les valeurs des variables V_{sysPAC} et V_{bus} sont mesurées. Pour le contrôle du courant de sortie I_L , une loi de commande linéarisante avec intégrateur est choisie :

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = y_c(t) - I_L(t) \\ \alpha(t) = \frac{V_{bus}(t)}{V_{sysPAC}(t)} + \beta_1 \cdot \frac{L}{V_{sysPAC}(t)} \cdot I_L(t) + \beta_2 \cdot \frac{L}{V_{sysPAC}(t)} \cdot x_i(t) \end{cases} \quad (5.8)$$

avec y_c le courant de consigne et x_i l'état augmenté.

En utilisant l'équation du système (5.7) et la loi de commande (5.8), la boucle fermée s'écrit :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{I}_L \\ \dot{x}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_1 & \beta_2 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_L \\ x_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \cdot y_c \\ I_L = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_L \\ x_i \end{bmatrix} \end{cases} \quad (5.9)$$

Les paramètres β_1 et β_2 permettent de régler la dynamique de la boucle fermée. Un placement de pôles avec un système du second ordre de pulsation ω_n et sans oscillation $\zeta = 1$ est effectué. De façon immédiate, on obtient :

$$\beta_1 = -2 \cdot \omega_n \text{ et } \beta_2 = \omega_n^2 \quad (5.10)$$

La figure 5-11 présente les résultats obtenus pour une réponse à un échelon de 30 A avec les conditions suivantes et $\omega_n = 500 \text{ rad/s}$:

- alimentation stabilisée de 20 V à l'entrée du convertisseur ;
- tension stabilisée de 12V à la sortie du convertisseur ;

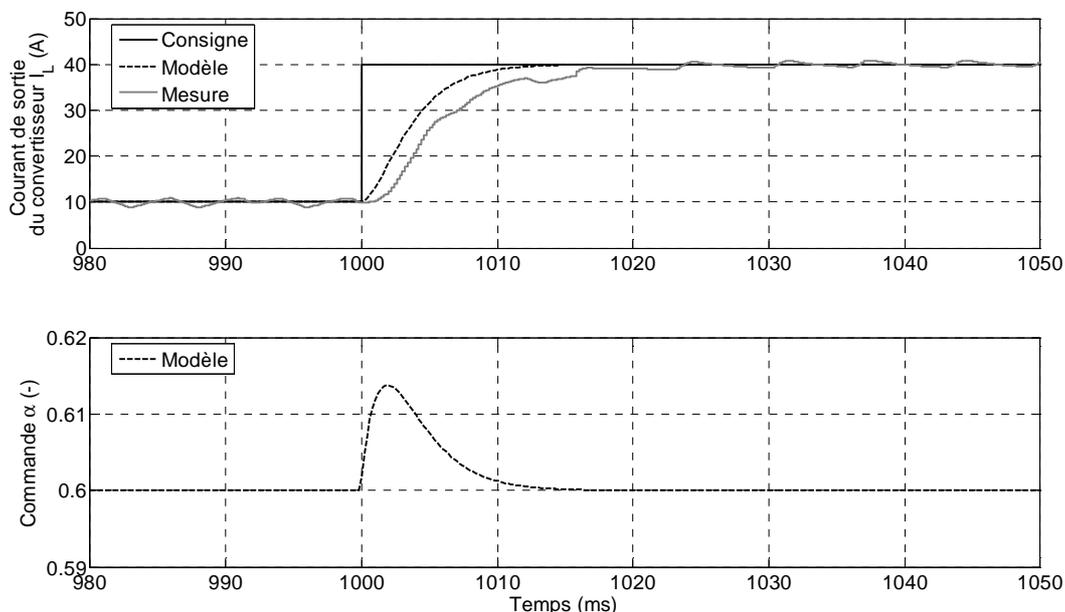


Figure 5-11 : Réponse à un échelon de courant du convertisseur de puissance.

A partir d'une consigne P_c en sortie du convertisseur, la consigne en courant y_c est obtenue en utilisant :

$$y_c(t) = \frac{P_c(t)}{V_{bus}(t)} \quad (5.11)$$

5.3.3. Identification et modélisation du banc d'essai.

Une modélisation de la plateforme est nécessaire pour calibrer les lois de commandes avant leur implantation réelle. La modélisation reste énergétique comme présentée au chapitre 2. Les caractéristiques des composants utilisés sont présentées dans les sections suivantes.

a. Le système pile à combustible

PowerPAC /Santis et al. 2004/, figure 5-12 est un système PAC portable de 1 kW développé par le Paul Scherrer Institut et l'ETH Zürich. La pile à combustible est composée de 44 cellules élémentaires avec une surface active de membrane de 136 cm². La pression de

fonctionnement (air et hydrogène) est comprise entre 1,2 bar et 1,4 bar absolus. La limite d'opération du système est liée à la tension minimale admissible de 24 V.

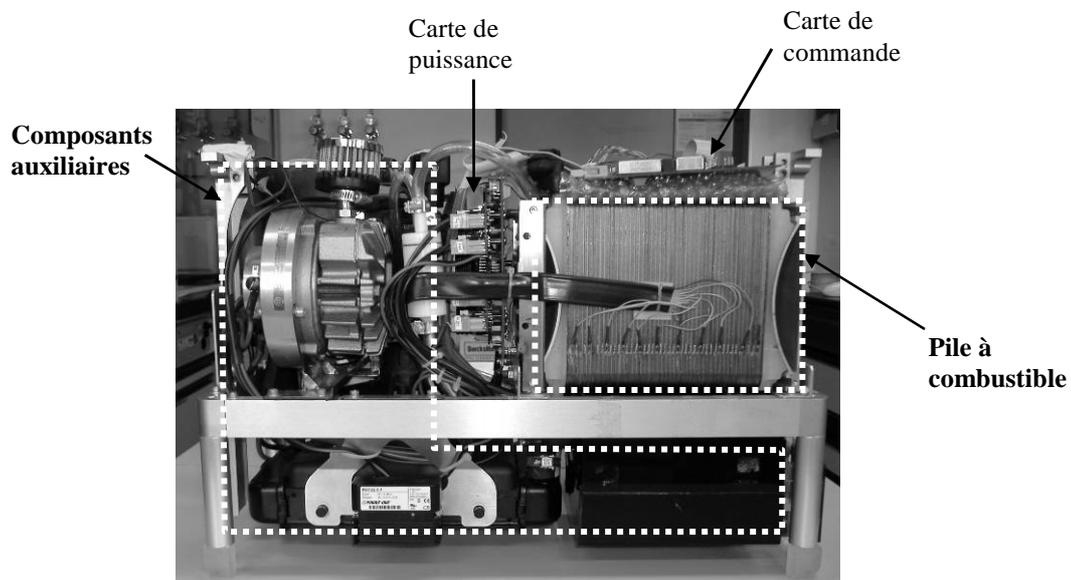


Figure 5-12 : Illustration de PowerPAC.

/Rodatz 2003/ /Mann et al. 2000/ décrivent le modèle suivant pour la courbe de polarisation :

$$V_{PAC}(I_{PAC}) = E_0 - b \cdot \ln(I_{PAC}) - R \cdot I_{PAC} \quad (5.12)$$

avec V_{PAC} la tension de la PAC (V), I_{PAC} le courant de la PAC (A). Les valeurs des paramètres E_0 , b et R sont obtenus par régression linéaire. En procédant de même pour différentes températures, un modèle statique de la pile à combustible est obtenu, figure 5-14.

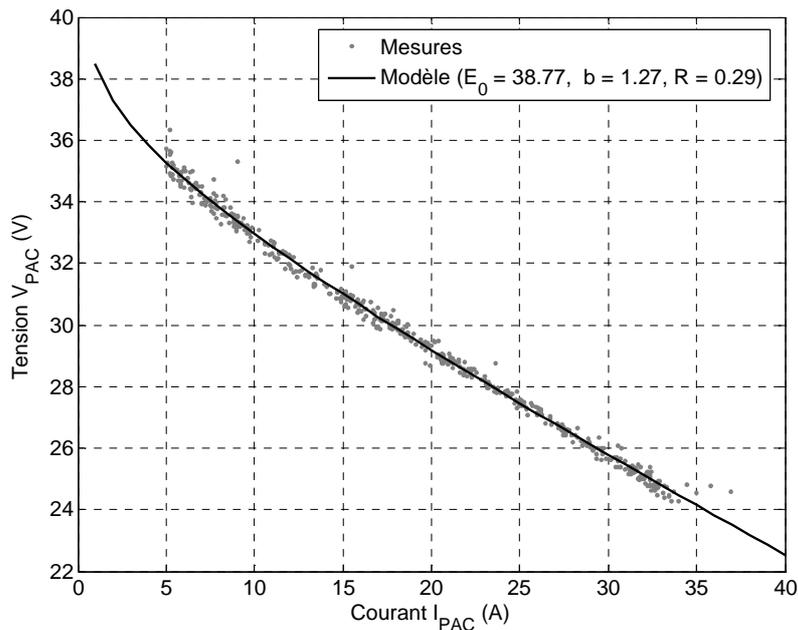


Figure 5-13 : Courbe de polarisation de la PAC à 50°C.

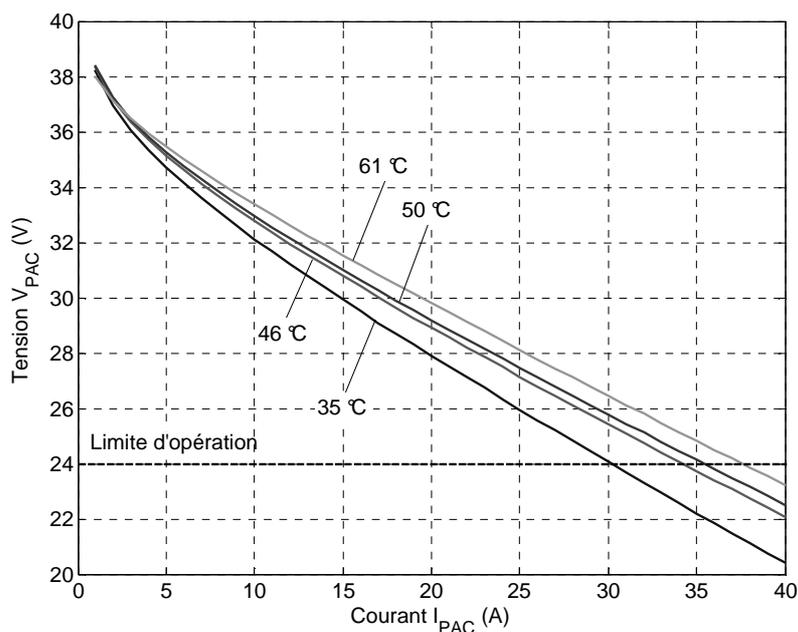


Figure 5-14 : Courbe de polarisation de PowerPAC.

La consommation des auxiliaires P_{aux} a été mesurée pour différents points de fonctionnement figure 5-15. La courbe a été obtenue par régression des mesures selon l'équation :

$$P_{aux}(I_{PAC}) = a \cdot I_{PAC}^2 + b \cdot I_{PAC} + c \tag{5.13}$$

avec a , b et c les paramètres de régression.

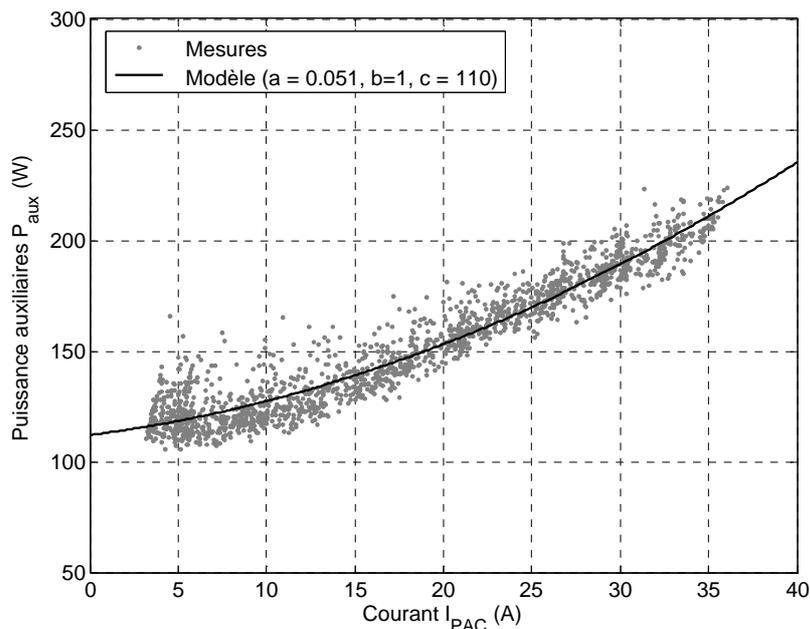


Figure 5-15 : Consommation des auxiliaires de PowerPAC.

Les courbes de polarisation et de consommation des auxiliaires sont suffisantes pour calculer le rendement du système PAC, figure 5-16. La courbe de rendement permet d'évaluer la qualité du système. A une température de 50 °C, le prototype PowerPAC a un rendement maximal de 40 % pour 52 % de sa puissance maximale (674 W).

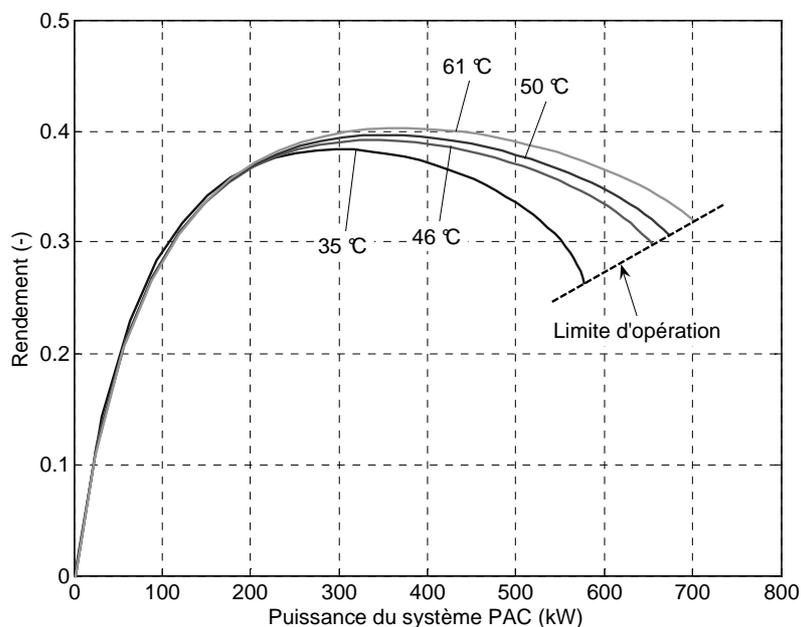


Figure 5-16 : Rendement du système PowerPAC.

b. La source secondaire d'énergie

La source secondaire d'énergie est composée soit d'une batterie de 12 V, soit d'un ensemble de supercondensateurs connectés en série. La batterie Plomb-Gel a été retenue pour des raisons de robustesse et de sécurité. Les caractéristiques sont :

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Batterie Plomb-Gel :
Tension Nominale de 12 V
Capacité nominale de 18 Ah | <ul style="list-style-type: none">• Supercondensateurs :
8 éléments connectés en série
Éléments de 2,5 V / 1200 F |
|---|--|



Figure 5-17 : Illustration de la batterie (haut) et des supercondensateurs (bas) utilisés sur la plateforme d'essais.

L'estimation des paramètres des modèles de batteries est un problème extrêmement difficile et nécessite de nombreuses mesures. Les caractéristiques détaillées de la batterie n'étant pas disponibles, sa tension à vide E_{batt} et sa résistance interne R_{batt} ont été estimées sur la base de plusieurs séries de mesures en charge et en décharge, figure 5-18.

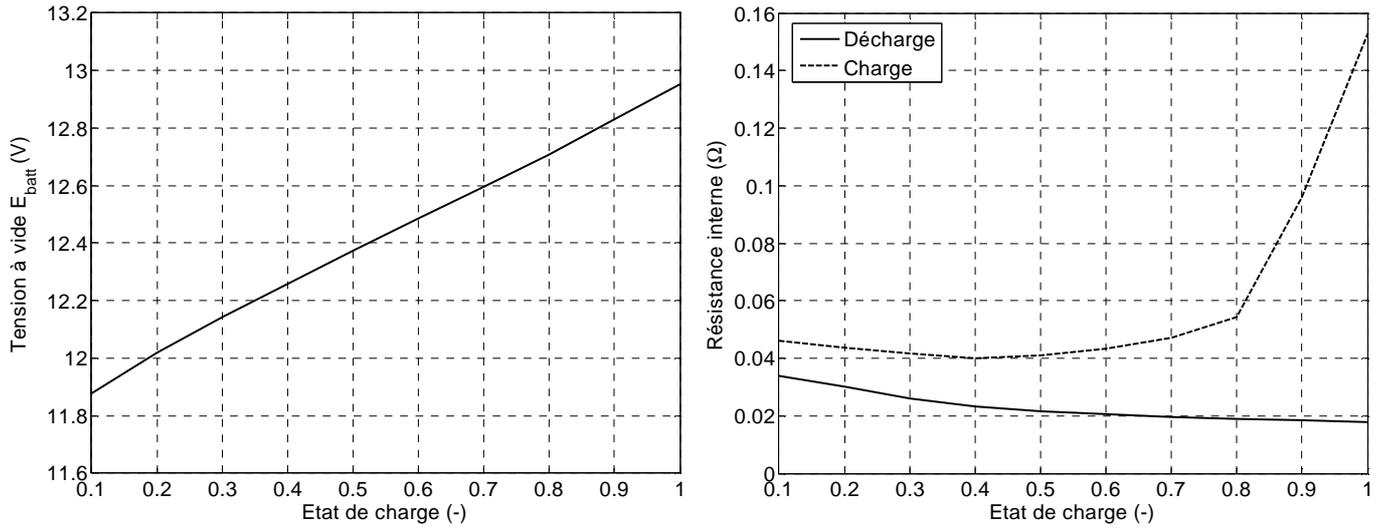


Figure 5-18 : Tension à vide (gauche) et résistance interne de la batterie (droite) en fonction de l'état de charge.

L'estimation du rendement faradique η_f à partir de mesures étant très difficile, la relation fournie dans /Magyar et al. 1990/ a été utilisée :

$$\begin{cases} \eta_f = 1 & \text{si } I_{batt}(t) \geq 0 (\text{décharge}) \\ \eta_f(t) = 1 - e^{-k_f \cdot (1 - SOC(t))} & \text{si } I_{batt}(t) < 0 (\text{charge}) \end{cases} \quad (5.14)$$

Dans le cadre d'une batterie au plomb, une valeur typique de k_f est $k_f = 8,05$ ($\Leftrightarrow \eta_f = 0,8$ pour $SOC = 80\%$ /Paganelli 1999/).

c. Le convertisseur de puissance

Les courbes de rendement du convertisseur de puissance figure 5-20, ont été relevées avec le système PowerPAC connecté en entrée et différents niveaux de tension de sortie.

Le modèle présenté au chapitre 2 a été utilisé pour la régression des mesures, figure 5-19 :

$$P_{conv}^{entree} = \frac{P_{conv}^{sortie}}{\eta_{conv_const}} + P_{conv_const} \quad (5.15)$$

avec P_{conv}^{entree} la puissance d'entrée, P_{conv}^{sortie} la puissance de sortie, η_{conv_const} et P_{conv_const} les paramètres de régression.

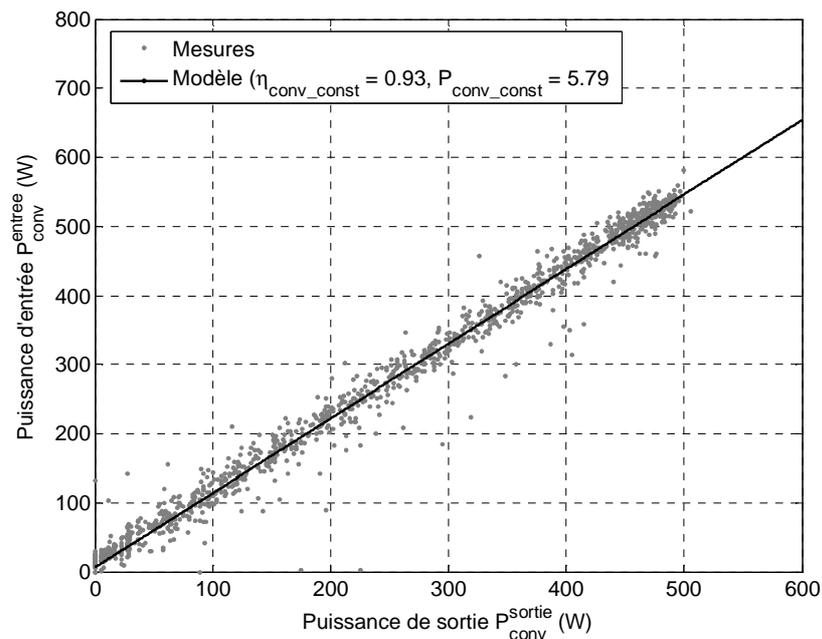


Figure 5-19 : Puissances d'entrée en fonction de la puissance de sortie du convertisseur ($V_{bus} = 16V$).

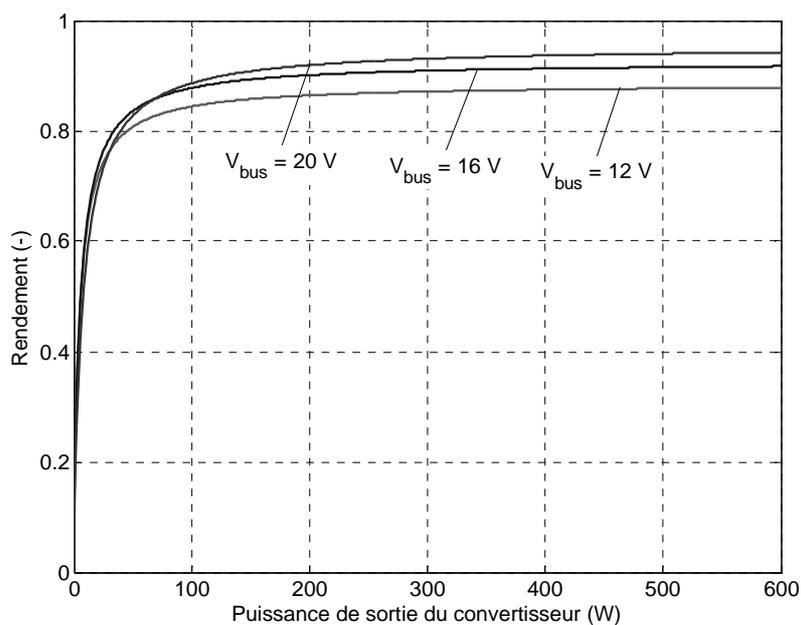


Figure 5-20 : Rendement du convertisseur de puissance.

d. Le véhicule et la demande de puissance.

Sur la plateforme d'essai, le véhicule et la machine électrique de traction sont simulés. A chaque instant, la puissance requise par sa motorisation est calculée et sert de consigne pour la charge électronique et/ou le générateur.

Le véhicule considéré est de type Citroën Berlingo présenté au chapitre 2, les modèles et paramètres considérés pour la simulation du véhicule restent identiques.

Il est évident que la demande de puissance simulée sur ordinateur pour un véhicule conventionnel ne peut pas être satisfaite par la source de puissance de la plateforme d'essais. Une mise à l'échelle est nécessaire en fonction de la puissance de sorties du système PAC (environ 674 W pour une température de fonctionnement de 50 °C). En choisissant d'émuler un véhicule équipé d'un système PAC de 45 kW, le facteur d'échelle est de 66,7. La consigne de puissance de la charge P_{charge} sur la plateforme d'essai est donc $P_{charge}(t) = P_{mot}(t)/66,7$.

Le système PAC et les sources d'énergies secondaires ayant été présentés, les deux configurations de la plateforme d'essais sont :

Configuration BATT :

Véhicule Berlingo avec mise à l'échelle

Système PAC de 674 W

Batterie Plomb-gel 12V – 18 Ah

Configuration SC :

Véhicule Berlingo avec mise à l'échelle

Système PAC de 674 W

8 supercondensateurs de 2,5 V/1200 F

e. Problématique de l'estimation de l'état de charge

L'estimation de l'état de charge des batteries ou des supercondensateurs sur le banc d'essai est nécessaire pour l'utilisation des lois de commande d'une part, et pour la surveillance de l'installation d'autre part (i.e. les surcharges et décharges profondes sont à éviter).

Dans le cas des supercondensateurs, la tension à vide E_{SC} fournit une estimation précise de l'état de charge :

$$SOC(t) = \frac{X_{SC}(t)}{X_{SC_{max}}} = \frac{0,5 \cdot C_{SC} \cdot E_{SC}(t)^2}{0,5 \cdot C_{SC} \cdot E_{SC_{max}}^2} = \frac{E_{SC}(t)^2}{E_{SC_{max}}^2} \quad (5.16)$$

Dans le cas des batteries, il n'existe pas de méthode permettant d'obtenir une mesure fiable de l'état de charge. Les approches utilisant des filtres de Kalman ou des observateurs non linéaires nécessitent des modèles détaillés de la dynamique de la batterie. Le modèle

énergétique développé dans le cadre de ces travaux est un modèle statique très simplifié inadapté à ces méthodes.

Le modèle énergétique peut cependant être utilisé en boucle ouverte. L'estimation de l'état de charge se fait alors par intégration du courant :

$$SOC(t) = \frac{1}{C_{batt,max}} \cdot \left(C_{batt}(0) - \int_0^t \eta_f(SOC(u), sign(I_{batt}(u))) \cdot I_{batt}(u) \cdot du \right) \quad (5.17)$$

Cette méthode en boucle ouverte introduit nécessairement une dérive dans le calcul de l'état de charge, cette dérive est limitée pour la durée des cycles considérés.

f. Validation du modèle complet

Afin d'illustrer la validité du modèle complet, la commande optimale est appliquée sur le système réel. Les résultats obtenus sont comparés avec ceux obtenus en simulation. S'agissant d'une commande en boucle ouverte, des sécurités ont été mises en œuvre pour garantir l'intégrité du système.

➤ Plateforme d'essais avec la batterie : *configuration BATT*

Les résultats de simulation et d'expérimentation sont comparés pour la *configuration BATT* et le cycle R3, figure 5-21. Pour ce faire, les conditions initiales et finales obtenues expérimentalement sont exploitées pour effectuer une simulation. Les conditions initiales sont l'état de charge initial de 66,8 % et $\lambda(0) = 2,10 \times 10^{-5}$. L'état de charge final est de 68,7 %. En simulation, pour obtenir une variation globale d'état de charge identique, il faut utiliser la valeur $\lambda(0) = 2,21 \times 10^{-5}$. Les écarts entre simulation et mesures sont donnés tableau 5-2.

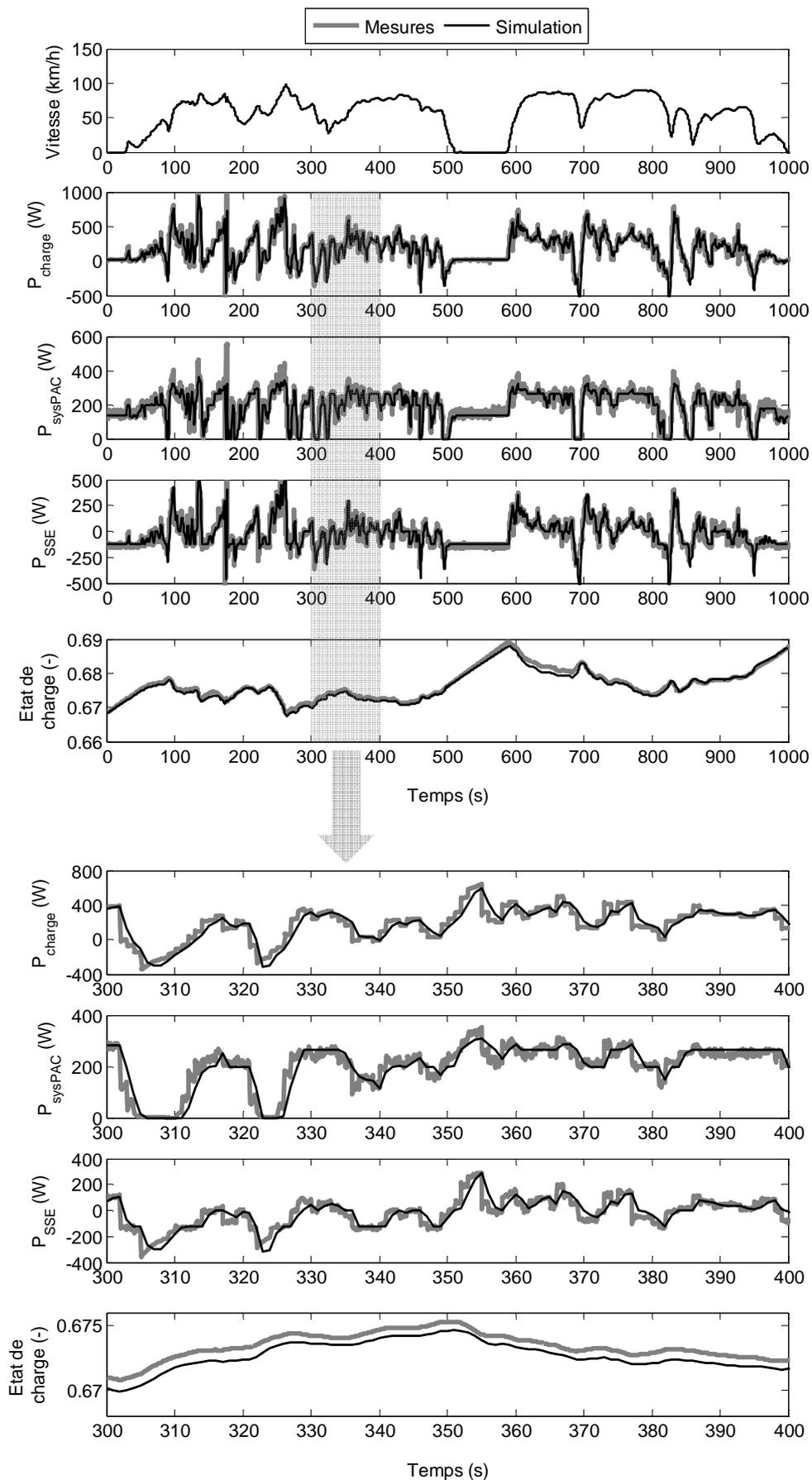


Figure 5-21 : Commande optimale pour la configuration **BATT** et le cycle R3.

	Valeurs limites (simulation, figure 5-21)		Écart moyen figure 5-21	Écart efficace (RMS) figure 5-21
	min	max		
Puissance de la charge P_{charge}	-622 W	946 W	6 W	91,5 W
Puissance du système PAC P_{sysPAC} (DC/DC inclus)	0 W	360 W	5 W	36,5 W
Puissance de la source secondaire P_{SSE}	-622 W	586 W	2 W	67 W
État de charge	68,8 %	66,7 %	0,05 %	0,07 %

Tableau 5-2 : Écarts entre mesures et simulation pour la **configuration BATT** et le cycle R3.

Pour valider le modèle, les consommations d’hydrogène en fonction de la variation d’état de charge obtenues en simulation et par mesures sur le banc d’essai sont comparées figure 5-22. Les résultats ont été obtenus pour le cycle de vitesse R3 et la **configuration BATT**.

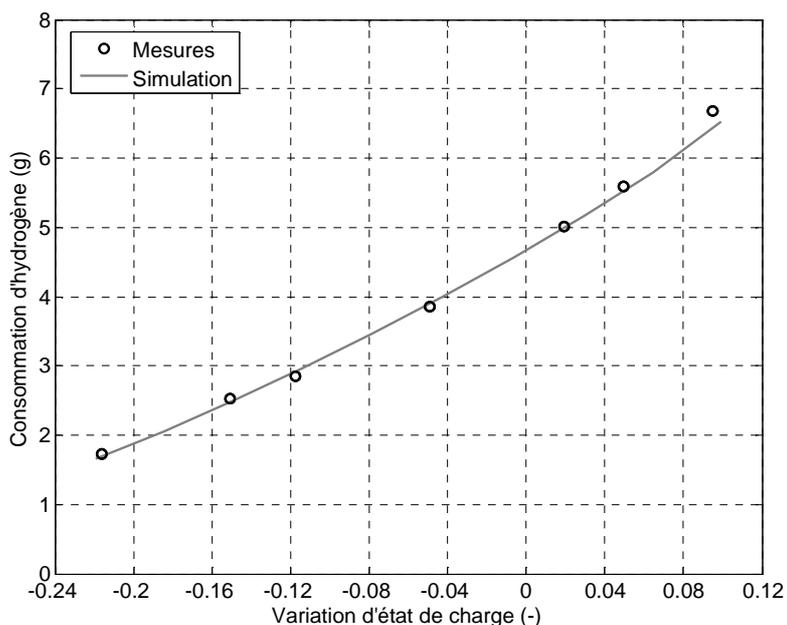


Figure 5-22 : Consommation en fonction de la variation d’état de charge pour la commande optimale (Cycle R3, **configuration BATT**).

Les résultats précédents montrent que le comportement et les résultats du modèle sont satisfaisants pour la **configuration BATT**. Les consommations d’hydrogène obtenues en simulation sont en moyennes distante de 1,5 % par rapport à celles obtenues lors des expérimentations. La même démarche a été utilisée pour la **configuration SC** sur le cycle UF3.

➤ **Plateforme d'essais avec les supercondensateurs : configuration SC**

Les résultats de simulation et d'expérimentation sont comparés pour la *configuration SC* et le cycle UF3, figure 5-23. Pour ce faire, les conditions initiales et finales obtenues expérimentalement sont exploitées pour effectuer une simulation. Les conditions initiales sont : état de charge initial 85,1% et $\lambda(0) = 1,590 \times 10^{-5}$. L'état de charge final est de 86,2 %. En simulation, pour obtenir une variation globale d'état de charge identique, il faut utiliser la valeur $\lambda(0) = 1,596 \times 10^{-5}$. Les moyennes des écarts entre simulation et mesures sont données dans le tableau 5-3.

	Valeurs limites (simulation, figure 5-23)		Écart moyen figure 5-23	Écart efficace (RMS) figure 5-23
	min	max		
Puissance de la charge P_{charge}	- 450 W	713 W	0,3 W	63 W
Puissance du système PAC P_{sysPAC} (DC/DC inclus)	47 W	100 W	4 W	15,5 W
Puissance de la source secondaire P_{SSE}	-506 W	605 W	2 W	61 W
État de charge	78,7 %	85,5 %	0,1 %	1 %

Tableau 5-3 : Moyennes des écarts entre mesures et simulation pour la configuration SC et le cycle UF3.

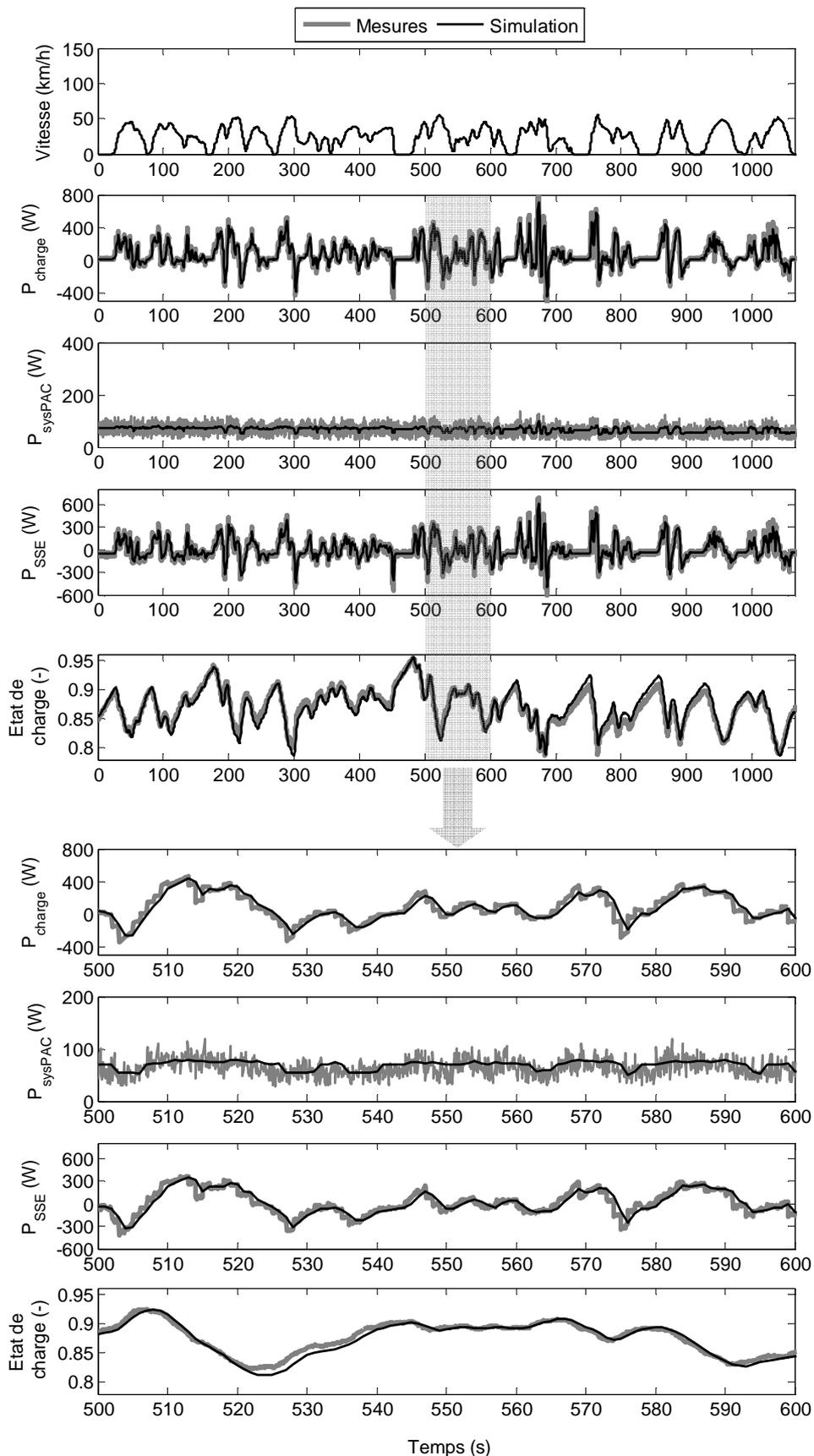


Figure 5-23 : Commande optimale pour la *configuration SC* et le cycle UF3.

La consommation d'hydrogène en fonction de la variation d'état de charge est obtenue en simulation et par mesures sur le banc d'essais, figure 5-24, pour le cycle de vitesse UF3 et la **configuration SC**. Les séries de mesures ont été réalisées sur le banc d'essai à des dates différentes. La différence de consommation d'hydrogène entre les 2 séries de mesures de la figure 5-24 s'explique par la difficulté de reproduire exactement les mêmes conditions d'expérience. Effectivement, les performances de la pile à combustible sont sensibles à la température, à la variation du taux d'humidité de la membrane... et à d'autres phénomènes qui rendent difficile une répétition exacte des conditions d'essais. Finalement, l'écart moyen de consommation d'hydrogène de la simulation par rapport à l'expérimentation est de 2 %.

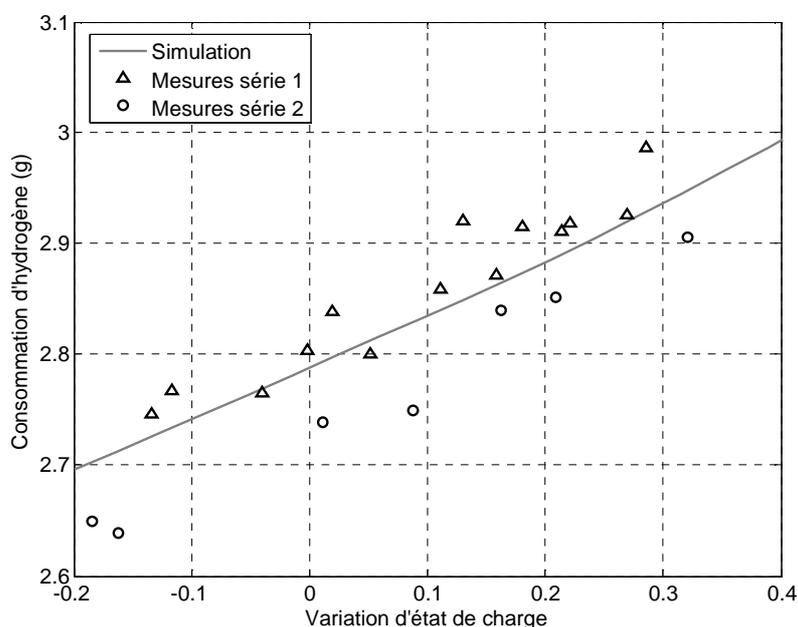


Figure 5-24 : Consommation en fonction de la variation d'état de charge pour la commande optimale (Cycle UF3, **configuration SC**).

Les modèles ayant été validés, les paragraphes suivants ont trait aux expérimentations réalisées.

5.3.4. Résultats expérimentaux

a. Stratégies de commandes utilisées

Deux stratégies de commande temps réel ont été retenues pour les essais expérimentaux : λ_{pred} (c.f. chapitre 3) et LMS (« Loss Minimization strategy »). LMS est une stratégie basée sur la minimisation instantanée des pertes du groupe motopropulseur /Seiler & Schröder 1998/. Sa description est fournie en ANNEXE 4.

Les paramètres des ces stratégies ont été ajustés en simulation en considérant plusieurs cycles de vitesse (différents de ceux utilisés sur la plateforme d'essai). Les réglages sont empiriques et résultent d'un compromis entre :

- des réglages optimisés pour les différents types de parcours routiers rencontrés ;
- la « qualité » de la régulation de l'état de charge ;
- la consommation d'hydrogène.

De manière évidente, des paramétrages différents donneront des résultats différents. Les paragraphes suivants ont pour objectif d'illustrer le bon fonctionnement des stratégies temps réel avec les paramètres retenus, tableau 5-4.

	Batterie Plomb 12 V-18 Ah (<i>Configuration BATT</i>)	8 supercondensateurs 2,5 V / 1200 F (<i>Configuration SC</i>)
λ_{pred}	<ul style="list-style-type: none"> • $T_e = 1 s$ • $k_{hist} = 180$ • $k_{adapt} = 180$ • $k_x = 600$ • X_{vise} : état de charge visé : 70 % 	<ul style="list-style-type: none"> • $T_e = 1 s$ • $k_{hist} = 180$ • $k_{adapt} = 1$ • $k_x = 60$ • X_{vise} : état de charge visé : 80 %
<i>LMS</i>	<ul style="list-style-type: none"> • État de charge visé : 70 % • Sensibilité : 	<ul style="list-style-type: none"> • État de charge visé : 55 % • Sensibilité :

Tableau 5-4 : Paramètres des stratégies λ_{pred} et *LMS* .

➤ **Stratégie λ_{pred} :**

Un exemple de résultats est donné figure 5-25 pour la stratégie λ_{pred} appliquée sur la **configuration BATT** et le cycle R3 (périurbain). On remarque que l'état de charge est bien régulé par la prédiction effectuée sur $\hat{\lambda}(k)$. Au terme de l'expérience, la variation d'état de charge est de -3,8 % et la consommation d'hydrogène de 4,14 g.

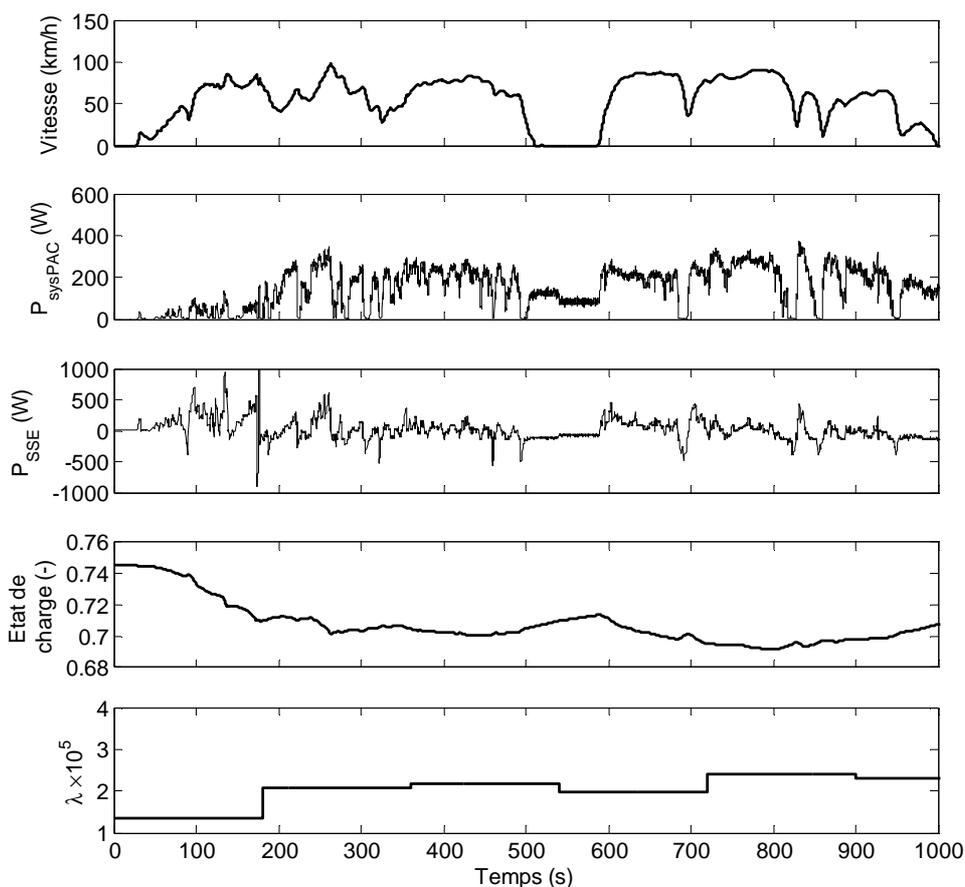


Figure 5-25 : Résultats pour λ_{pred} , la **configuration BATT** et le cycle R3.

Le réglage des paramètres pour la **configuration SC** est sensiblement différent. L'énergie que peut contenir les supercondensateurs étant faible, la dynamique de régulation de l'état de charge est plus rapide, figure 5-26. L'horizon est de $k_x \cdot Te = 60s$ et l'adaptation de $\hat{\lambda}(k)$ se fait à chaque seconde, $k_{adapt} = 1$. Les résultats sont donnés pour la stratégie λ_{pred} appliquée sur la **configuration SC** et le cycle R3, figure 5-26. La variation d'état de charge est de -0,1 % et la consommation d'hydrogène de 4,43 g.

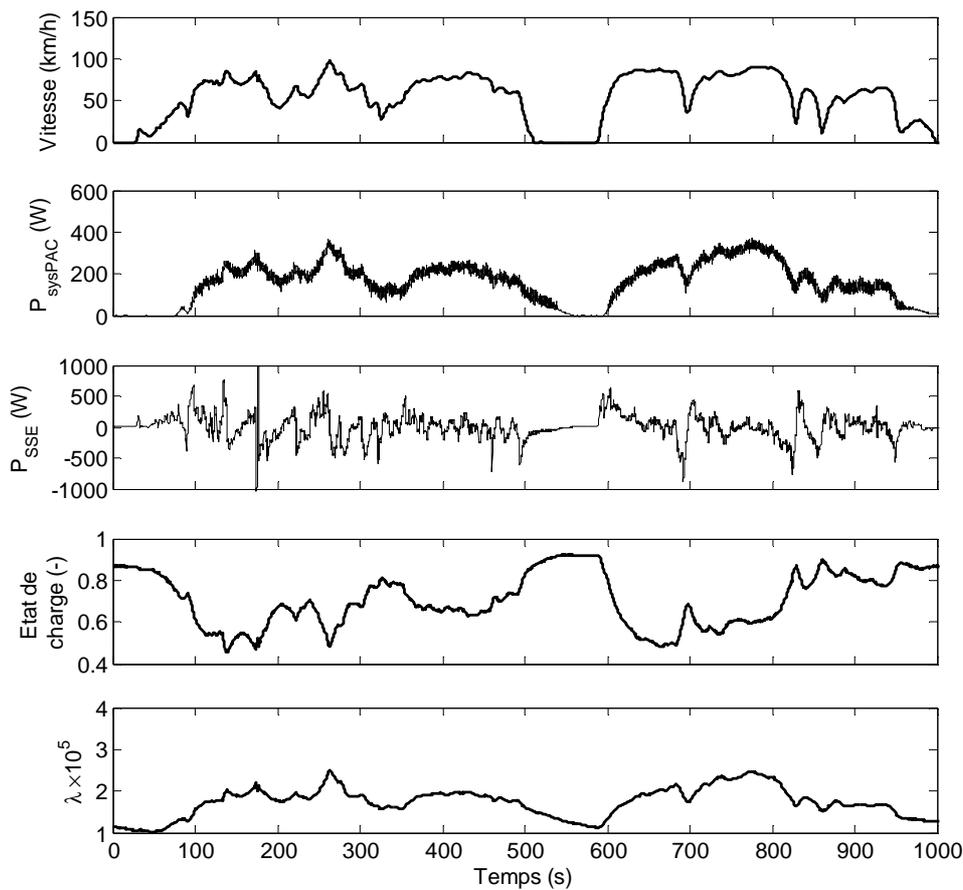


Figure 5-26 : Résultats pour λ_{pred} , la **configuration SC** et le cycle R3.

➤ **Stratégie LMS (« Loss Minimization Strategy »)**

Dans le cas d'un véhicule PAC hybride, la stratégie LMS donne la répartition de puissance qui minimise à chaque instant l'ensemble des pertes L_{tot} au sein du groupe motopulseur :

$$L_{tot}(k) = L_{sysPAC}(P_{sysPAC}(k)) + L_{SSE}(P_{SSE}(k), X(k)) \tag{5.18}$$

avec L_{sysPAC} les pertes du système PAC (W) et L_{SSE} les pertes de la source secondaire d'énergie. Une fonction de sensibilité (ANNEXE 4) permet le contrôle de l'état de charge de la source secondaire d'énergie. Cette régulation se fait nécessairement en dégradant la solution issue de la minimisation de L_{tot} (5.18). La fonction de sensibilité a été ajustée empiriquement en simulation et est fournie tableau 5-4.

Le rôle de la fonction de sensibilité est illustré figure 5-27 : celle-ci est très proche de 0 lorsque l'erreur sur l'état de charge visé est faible et s'écarte de 0 lorsque l'état de charge dérive. La variation d'état de charge globale est de -9,6 % et la consommation d'hydrogène est de 3,42 g.

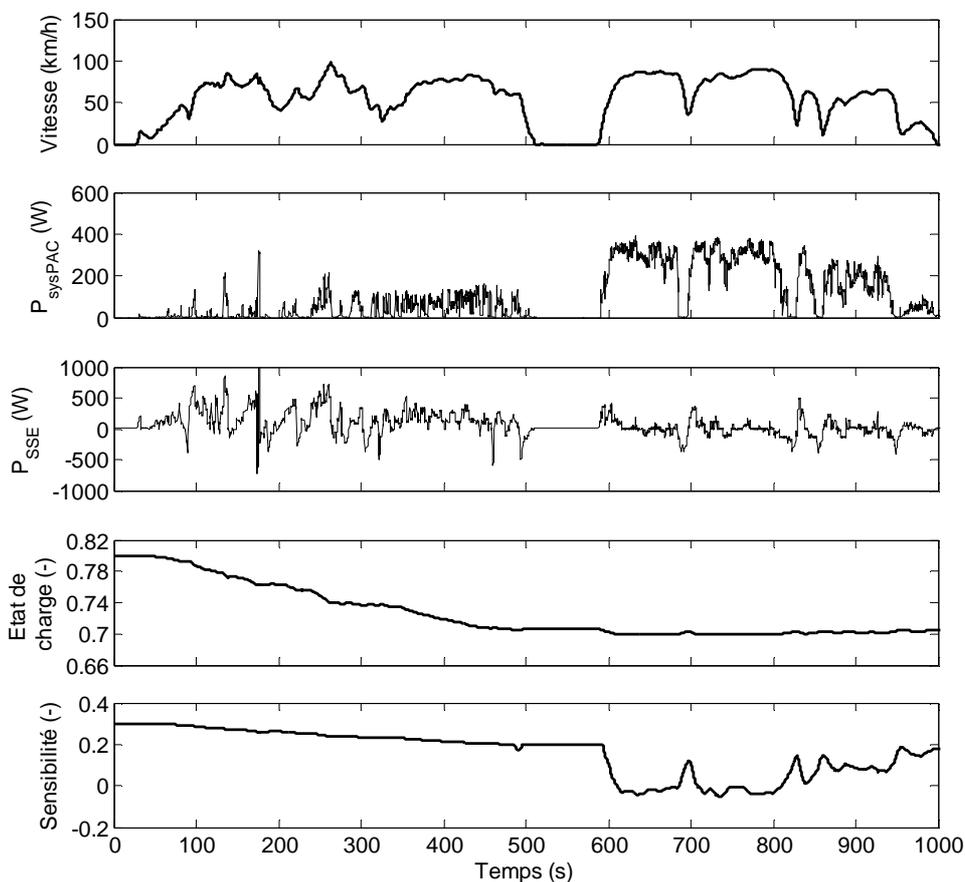


Figure 5-27 : Résultats pour *LMS*, la *configuration BATT* et le cycle R3.

La stratégie LMS est également validée avec des supercondensateurs, figure 5-28 (*configuration SC*). On remarque l'évolution rapide de la sensibilité induite par une correction rapide de l'état de charge. La variation globale d'état de charge est de +46 % et la consommation d'hydrogène de 4,76 g.

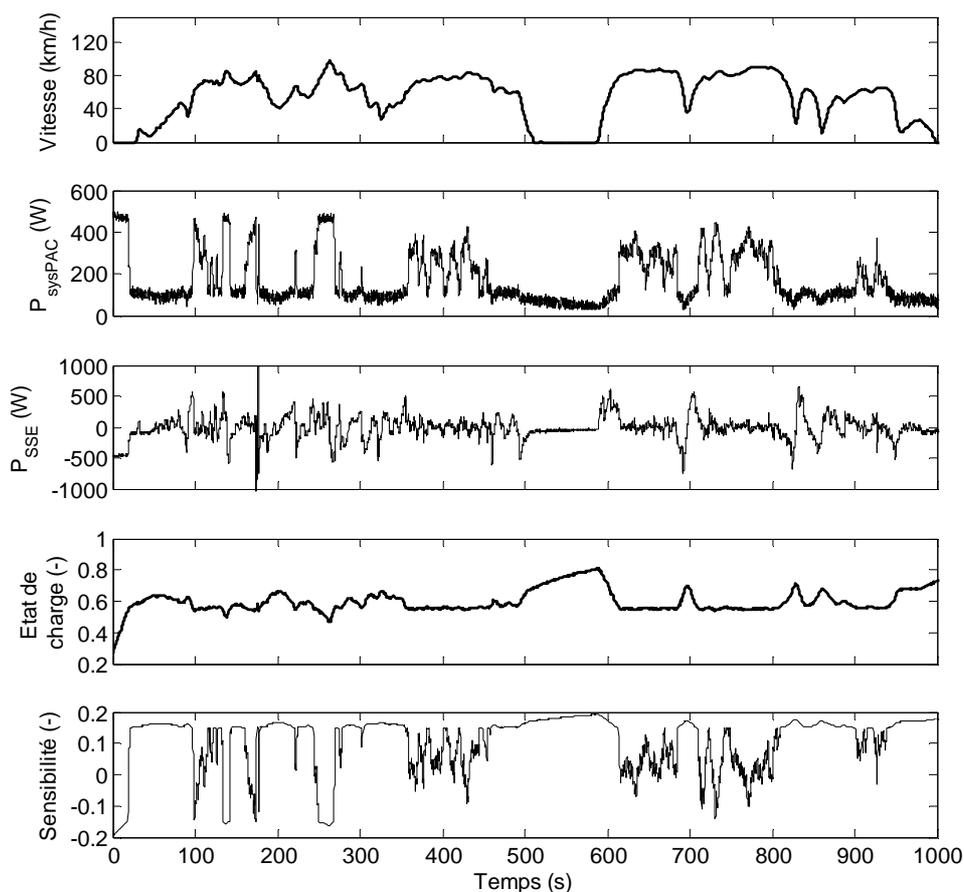


Figure 5-28 : Résultats pour *LMS* , la *configuration SC* et le cycle R3.

b. Synthèse des résultats obtenus.

Les stratégies λ_{pred} , *LMS* ont été utilisées sur la *configuration BATT* et la *configuration SC* pour les cycles R3 (périurbain) et UF3 (urbain). Il en résulte une centaine d'heures d'enregistrement sur banc d'essais. Une synthèse des résultats a été réalisée. Des séries d'expérimentations sont considérées et caractérisées par :

- la source secondaire d'énergie utilisée : batterie ou supercondensateurs ;
- la stratégie de commande utilisée : λ_{pred} , *LMS* ou *optBO* (commande optimale boucle ouverte) ;
- le cycle de vitesse : R3 ou UF3.

Remarque : dans un souci de « boucler » l'ensemble simulation / expérimentation et afin de donner une référence en consommation, une 3^{ème} commande est rajoutée : *optBO*. Celle-ci

utilise le résultat optimal obtenu en simulation, i.e. dépendant seulement de $\lambda(0)$. La loi *optBO* correspond alors à re-effectuer le « même » essai (sachant la difficulté de le reproduire exactement) temps réel en utilisant ce $\lambda(0)$. L'ensemble de la commande est alors en boucle ouverte pour la durée de l'essai. Naturellement un ensemble de sécurités a été mis en place pour éviter tout désagrément.

Pour chaque série d'expérimentations, différents états de charge initiaux de la source secondaire d'énergie ont été fixés. Les variations d'état de charges finales et les consommations d'hydrogène correspondantes ont été relevées. Les courbes de consommation d'hydrogène en fonction de la variation d'état de charge sont comparées, figure 5-29 à figure 5-32. La consommation obtenue avec la stratégie de commande *optBO* sert de référence.

➤ Synthèse des résultats obtenus avec la batterie (*configuration BATT*)

La figure 5-29 présente les résultats obtenus avec la *configuration BATT* et le cycle R3 (périurbain). Il apparaît que la stratégie λ_{pred} offre de meilleures performances en termes de consommation d'hydrogène que la stratégie LMS.

Le cycle de vitesse R3 est maintenant remplacé par le cycle urbain UF3, figure 5-30. Il apparaît que les écarts de consommation entre les différentes stratégies sont faibles. On notera que le re-jeu effectué pour la loi *optBO* donne des résultats tout à fait pertinents, i.e. dans le 1^{er} cas la consommation obtenue est la plus faible figure 5-29, dans le 2^{ème}, elle est très proche de la stratégie λ_{pred} , figure 5-30. Notons de plus qu'il aurait sans doute été possible d'en améliorer encore les résultats en utilisant par exemple un modèle du système PAC prenant en compte la température ou un rendement variable du convertisseur ...

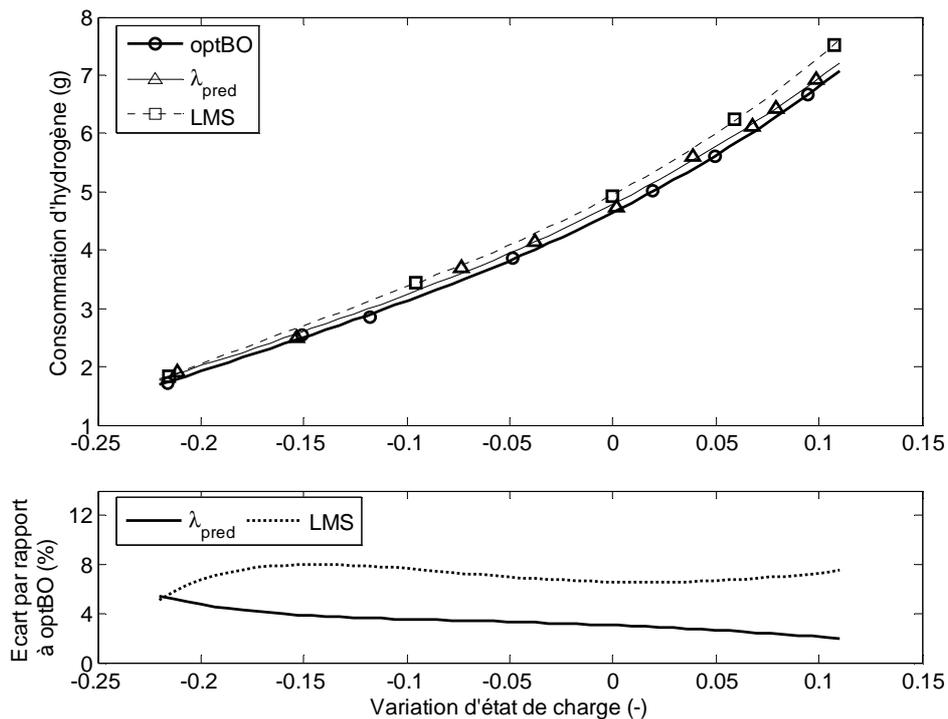


Figure 5-29 : Synthèse des résultats pour la *configuration BATT* et le cycle R3.

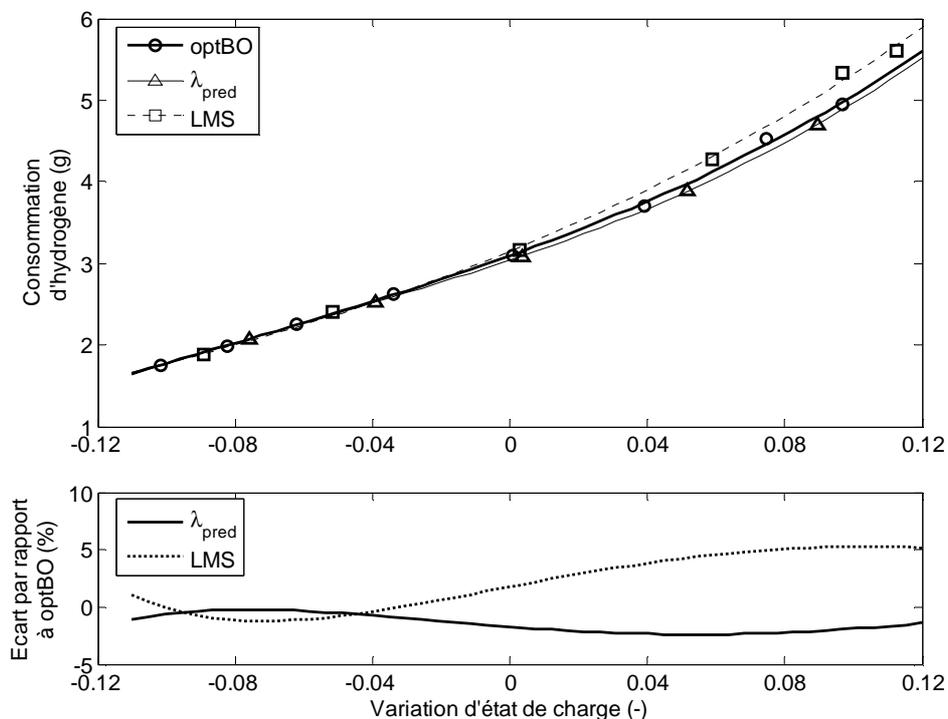


Figure 5-30 : Synthèse des résultats pour la *configuration BATT* et le cycle UF3.

➤ **Synthèse des résultats obtenus avec les supercondensateurs (*configuration SC*)**

Les résultats des figure 5-31 et figure 5-32 ont été obtenus en utilisant les supercondensateurs sur le cycle de vitesse périurbain R3 et urbain UF3. Les deux stratégies obtiennent des performances satisfaisantes dans toutes les configurations et il est difficile de les départager. Pour le cycle R3, les dynamiques mises en œuvre pour les supercondensateurs associées à leur faible capacité n'ont pas permis l'utilisation de la commande optBO. A titre illustratif, c'est la courbe issue de la simulation qui est tracée, figure 5-31.

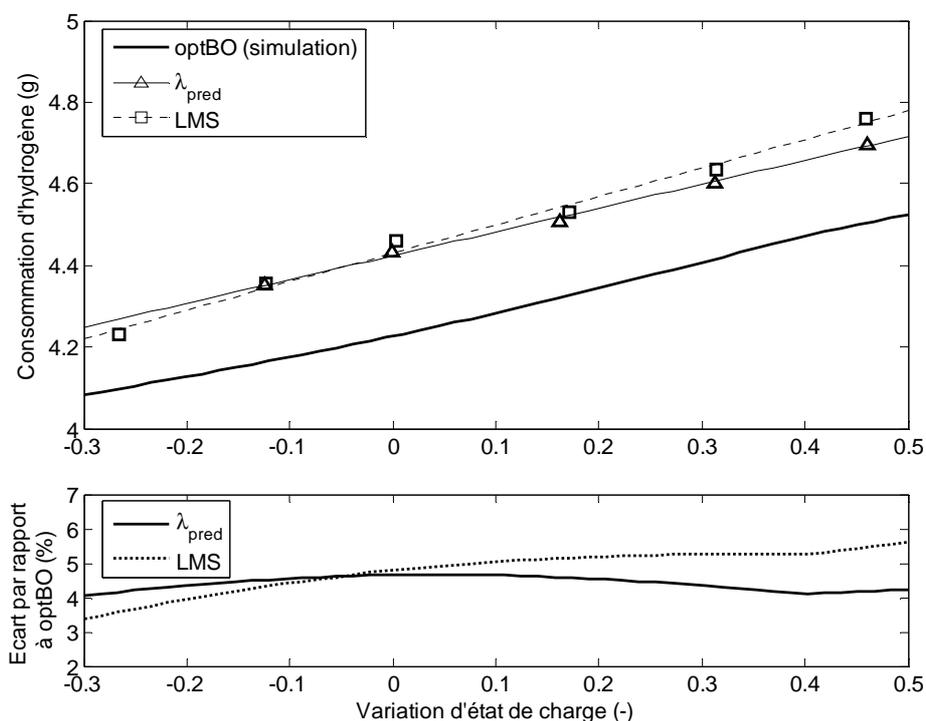
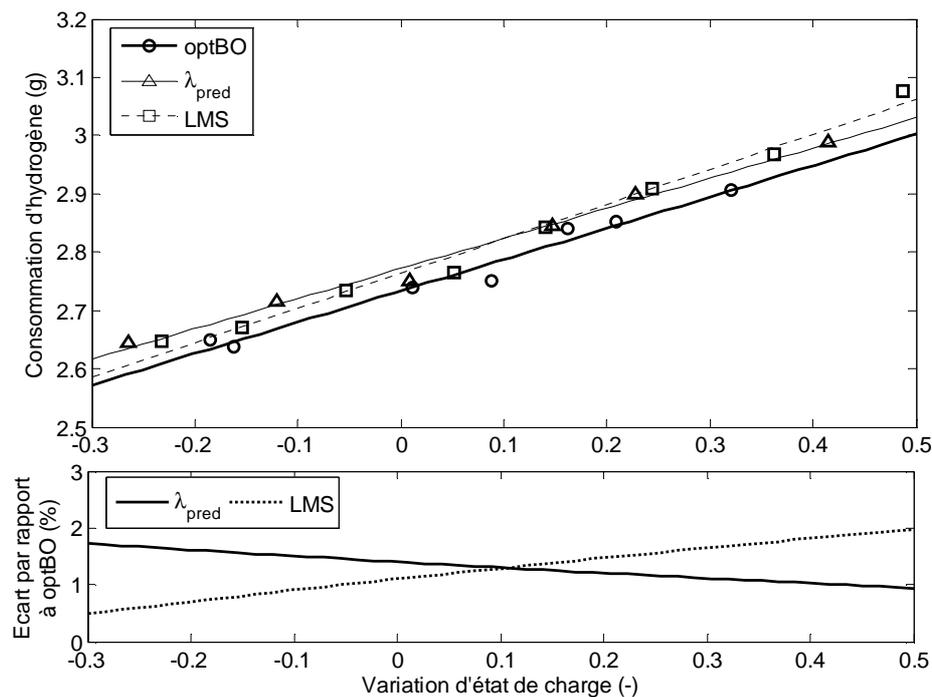


Figure 5-31 : Synthèse des résultats pour la *configuration SC* et le cycle R3.

Figure 5-32 : Synthèse des résultats pour la *configuration SC* et le cycle UF3.

c. Comparaison entre λ_{pred} et LMS

En conclusion, sur les résultats issus des essais, les résultats des deux stratégies sont sensiblement identiques dans le cas des supercondensateurs mais λ_{pred} offre de meilleures performances que LMS pour les batteries.

Les deux stratégies se différencient principalement au niveau de leurs réglages. Il n'y a pas de méthodes de réglages du profil de la fonction de sensibilité de LMS (tableau 5-4). Elle se génère de façon empirique et ne semble pas généralisable de façon automatique.

De plus si des données supplémentaires deviennent disponibles (en utilisant par exemple des informations issues d'un système de positionnement par satellite), la stratégie λ_{pred} est facilement adaptable en conséquence (contrairement à LMS).

d. Comparaison entre la batterie et les supercondensateurs

Pour comparer la *configuration BATT* et la *configuration SC*, il est intéressant de disposer d'une référence de consommation d'un véhicule sans source secondaire d'énergie. Des expériences ont donc été réalisées sur le banc d'essais dans une configuration système pile à combustible seul. Les consommations relevées sont les suivantes :

- Cycle UF3 : 3,28 g d'hydrogène ;
- Cycle R3 : 4,92 g d'hydrogène.

Dans le cas du cycle UF3, le système pile à combustible est capable de satisfaire entièrement la demande de puissance de la motorisation. En revanche, dans le cas du cycle R3 des limitations de puissances du système PAC sont apparues, figure 5-33. La consommation d'hydrogène est donc légèrement sous-estimée. Cet exemple montre le rôle indispensable de la source secondaire d'énergie pour assister le système PAC lors de pointes de puissance de la motorisation.

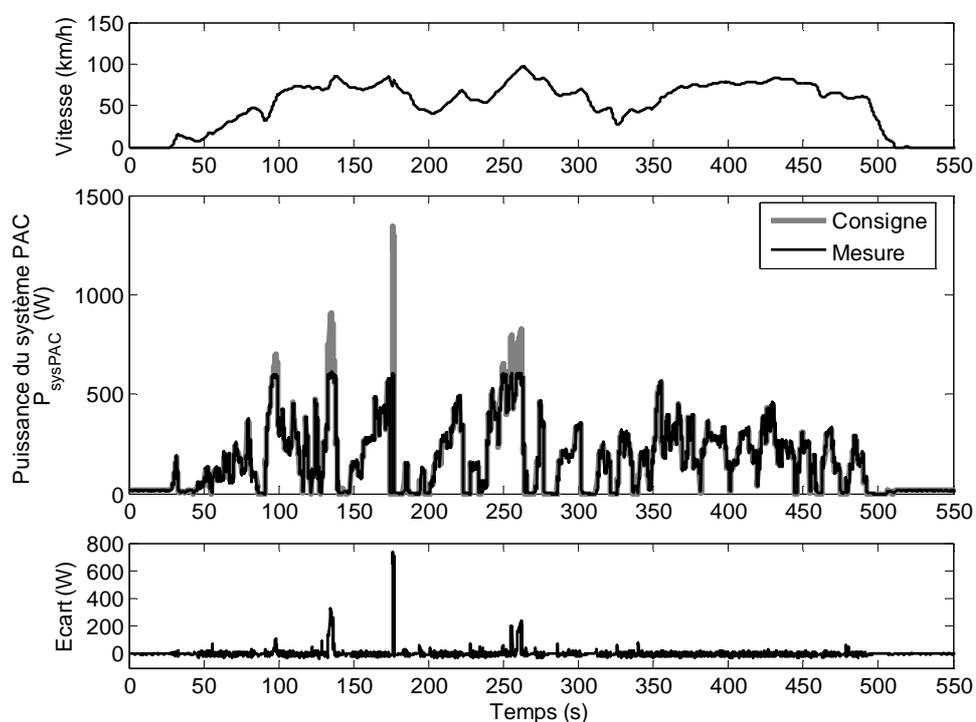


Figure 5-33 : Illustration de la limitation de puissance de PowerPAC sur la première partie du cycle R3.

Les économies d'hydrogène sont exprimées par rapport à la consommation du véhicule sans source secondaire d'énergie, figure 5-34. Donc, la contrainte d'état de charge choisi est nécessairement $\Delta X = 0$ (« charge sustaining »). Il apparaît que les performances sont nettement meilleures dans le cas des supercondensateurs que dans le cas de la batterie.

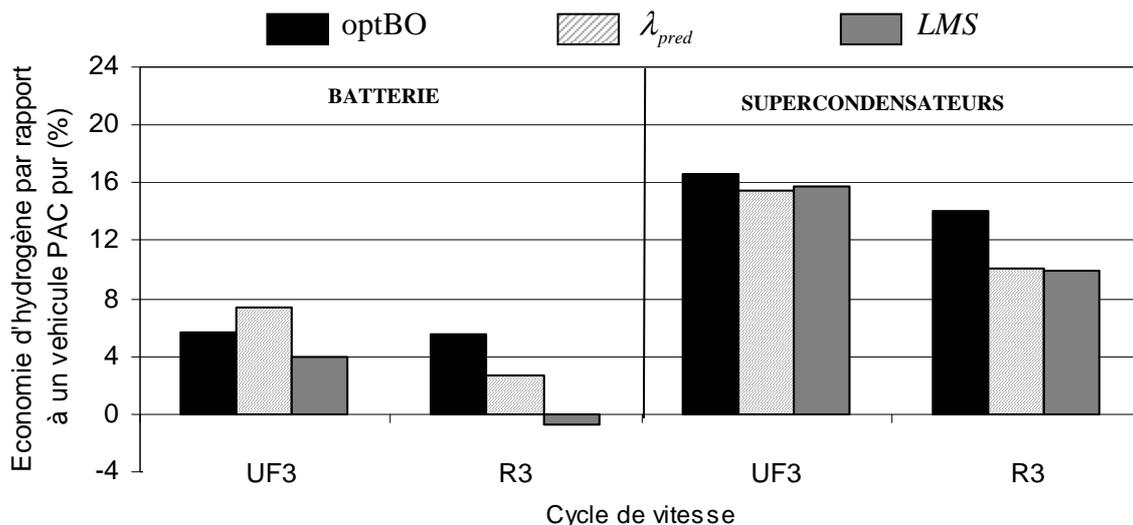


Figure 5-34 : Performances de consommation de la batterie et des supercondensateurs. (Écarts des consommations d'hydrogène pour $\Delta X = 0$ par rapport à la consommation d'hydrogène d'un véhicule non-hybride).

Plusieurs raisons expliquent les faibles économies d'hydrogène obtenues avec la batterie :

- La masse de la source secondaire est intégrée dans le modèle du véhicule :
 - Masse équivalente de la batterie dans le modèle du véhicule : 260 kg ;
 - Masse équivalente des supercondensateurs : 160 kg.

De ce fait, pour un cycle de vitesse considéré, la puissance requise par la motorisation est plus importante ce qui augmente la consommation d'hydrogène.

- Il est apparu au cours des expérimentations que les supercondensateurs avaient un très bon comportement lors de phases de freinage et récupéraient efficacement l'énergie cinétique du véhicule. A l'inverse, la batterie atteignait régulièrement sa puissance de recharge maximale, une partie de l'énergie cinétique récupérable était donc perdue. L'énergie cinétique moyenne récupérée pour la **configuration BATT** et la **configuration SC** est illustrée pour l'ensemble des expérimentations menées, figure 5-35.

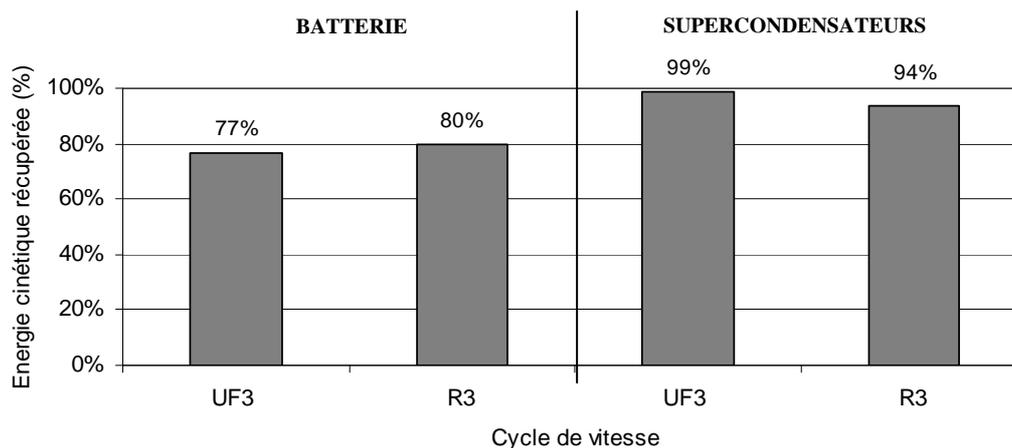


Figure 5-35 : Énergies électriques moyennes récupérées par la source secondaire d'énergie lors des phases de freinage du véhicule (énergies cinétiques récupérées au niveau du bus électrique).

5.3.5. Conclusion

La plateforme d'essais émule les échanges énergétiques d'un véhicule PAC hybride à une échelle réduite. Elle a permis de mettre en œuvre des stratégies de commande temps réel. En particulier, la stratégie λ_{pred} a pu être validée et confrontée à différentes situations de conduite du véhicule (urbain et périurbain).

En outre, la plateforme d'essais permet d'utiliser différentes sources secondaires d'énergie ; ici, une batterie et des supercondensateurs. La batterie au plomb retenue offre de moins bonnes performances que les supercondensateurs en terme de consommation d'hydrogène. Cependant il n'est pas possible de généraliser les résultats et il est probable que la technologie de la batterie utilisée ait influencé de manière significative les résultats obtenus.

5.4. Conclusion

Ce chapitre a présenté la mise en œuvre de stratégies de commandes temps réel sur deux exemples concrets.

Avec le prototype PAC-Car II, le parcours routier était connu a priori et une optimisation globale était donc envisageable pour minimiser la consommation d'hydrogène. A partir des résultats obtenus en simulation, une stratégie de commande en temps réel a été formulée. Le prototype a également permis de valider la modélisation énergétique retenue ; en particulier l'hypothèse de simplification des dynamiques rapides d'un groupe motopropulseur à PAC a été vérifiée et la précision du modèle sur la consommation d'hydrogène était d'environ 2%.

Un banc d'essai émulant un véhicule hybride à pile à combustible a également été développé. Il a permis de tester deux stratégies de commande temps réel : λ_{pred} et LMS. Ces deux stratégies ont fourni des performances satisfaisantes en termes de consommation d'hydrogène.

Outre les résultats obtenus, ce chapitre a présenté une méthodologie permettant d'évaluer de manière synthétique les performances de plusieurs stratégies de commande et/ou plusieurs sources d'énergie secondaire.

Conclusion et perspectives

Les travaux présentés dans ce mémoire ont porté sur l'utilisation de la pile à combustible dans le domaine de la traction automobile. Après un état de l'art dans le domaine des véhicules à PAC, il est apparu que l'hybridation du système pile à combustible était largement adoptée. En effet l'utilisation de batteries ou de supercondensateurs permet de relâcher les contraintes imposées au système PAC et offre la possibilité de réduire la consommation d'hydrogène. A partir de ces observations, la ligne directrice de cette thèse a reposé sur trois aspects étroitement liés avec une volonté permanente de confronter autant que possible les résultats théoriques à des exemples pratiques :

- *les stratégies de commande pour définir la répartition de puissance entre le système PAC et la source secondaire d'énergie ;*
- *la problématique du dimensionnement du système PAC et de la source secondaire d'énergie ;*
- *l'utilisation de batteries ou de supercondensateurs en tant que source secondaire d'énergie.*

La modélisation énergétique des composants a permis d'étudier les stratégies de commande nécessaires pour gérer les flux énergétiques au sein du groupe motopropulseur. En considérant que le cycle de vitesse était a priori connu, il a été possible de formuler un problème d'optimisation globale pour minimiser la consommation d'hydrogène. Ce problème a d'abord été résolu en utilisant la programmation dynamique, puis une approche basée sur la théorie de la commande optimale lui a été préférée pour réduire de façon significative les temps de calcul. Il a été cependant vérifié que les deux algorithmes donnent, aux approximations numériques près, des résultats de simulation identiques. Ces méthodes d'optimisation globale fournissent une référence de consommation d'hydrogène et servent « d'expertise » pour la définition de stratégies de commande temps réel.

Une stratégie de commande temps réel λ_{pred} a été proposée sur la base de l'algorithme de commande optimale. Dans l'approche optimale, et sous certaines hypothèses, la solution est obtenue pour une valeur constante du paramètre de Lagrange λ . Cette valeur est fonction de la variation globale d'état de charge. Pour évoluer vers un algorithme temps réel sans

connaissance du parcours futur, cette contrainte $\lambda = \text{constante}$ doit être relâchée pour garder un degré de liberté permettant de commander l'état de charge. Le problème consiste alors à faire varier $\hat{\lambda}(k)$ de manière à ne pas trop dégrader la solution optimale. λ_{pred} propose de faire varier $\hat{\lambda}(k)$ en fonction d'une estimation de la demande de puissance à venir (qui repose sur un histogramme des puissances calculé sur une fenêtre glissante) et de la dérive de l'état de charge.

Le dimensionnement de la source de puissance d'un véhicule hybride à pile à combustible est un problème délicat. Celui-ci repose sur un ensemble de contraintes défini par un cahier des charges telles que les durées de vie, l'encombrement, les coûts, le confort de conduite, la consommation énergétique... Pour tenter de simplifier le choix des concepteurs, un outil d'aide à la décision a été proposé. Celui-ci permet de choisir parmi un ensemble de couples « système PAC/source secondaire d'énergie » respectant une liste de contraintes ceux dont la consommation d'hydrogène est la plus faible. L'algorithme d'optimisation globale basée sur la théorie de la commande optimale est utilisé pour comparer les différentes architectures et réduire au maximum les temps de calculs. La méthode proposée peut être appliquée pour différents cycles de vitesse et différentes technologies de source secondaire d'énergie.

Sur l'exemple du véhicule Berlingo, il apparaît clairement qu'une architecture hybride à PAC est parfaitement justifiée pour un usage urbain mais n'apportera aucun bénéfice sur un parcours autoroutier. En revanche la méthode ne permet pas de privilégier l'utilisation de batteries ou de supercondensateurs d'un point de vue énergétique ; l'introduction d'autres contraintes ou la prise en compte d'un autre critère est nécessaire. Sur l'exemple du prototype Hy-Muve, l'hybridation permet de réduire considérablement la puissance du système PAC pour satisfaire à des restrictions d'encombrement et de gestion thermique. Cependant, à moins d'envisager une décharge progressive des batteries, la consommation d'hydrogène ne sera pas réduite du fait de la faible dynamique de la demande de puissance. En conclusion, à chaque type de véhicule, défini par un cahier des charges, correspond un dimensionnement adapté ; il n'y a pas de solution « toute faite » et les outils d'aide tel que celui proposé permettent de guider les choix des concepteurs.

Les approches théoriques ont été mises en œuvre sur des applications réelles. D'abord sur le prototype PAC-Car II de l'ETH Zürich qui a été une plateforme expérimentale privilégiée pour

étudier le fonctionnement d'un système pile à combustible dans le domaine de la traction automobile. Un modèle du véhicule a été développé ; les résultats de simulation ont été confrontés avec des enregistrements réels et ont conforté l'approche énergétique de la modélisation (environ 2% d'erreur sur l'estimation de la consommation d'hydrogène). De plus, le prototype évoluant sur une piste fermée, le parcours du véhicule est connu ; la solution au problème d'optimisation globale a donc pu être formulée. Les résultats de l'optimisation ont été interprétés de manière à aboutir à la formulation d'une stratégie de course temps réel.

Enfin, le banc d'essai réalisé au Paul Scherrer Institut a permis de mettre en œuvre des stratégies de commande. Ce banc d'essais repose sur le concept « Hardware In the Loop » et émule à une échelle réduite un véhicule hybride à PAC. La stratégie temps réel λ_{pred} et la stratégie LMS (« Loss Minimization Strategy ») ont été comparées. Les expérimentations réalisées ont mis en lumière certains aspects et amenées des perspectives de recherches :

- Les stratégies de commande temps réel ont fourni des résultats satisfaisant sur le banc d'essais. Cependant, il a été difficile de conserver une température de fonctionnement constante du système PAC ce qui affecte nécessairement les performances énergétiques. La prise en compte d'un modèle thermique dans la modélisation et dans la formulation des stratégies permettrait d'améliorer les résultats.
- Les consommations d'hydrogène relevées en utilisant la batterie étaient plus élevées que celles obtenues en utilisant les supercondensateurs. Cette différence peut s'expliquer par la variation de la masse du véhicule d'une architecture à l'autre, et par la quantité d'énergie cinétique récupérée par la source secondaire d'énergie. Sur ce dernier point, la batterie retenue a clairement montré ses limites et des essais avec une autre technologie sont nécessaires (par exemple, Li-Ion).
- Si l'estimation de l'état de charge des supercondensateurs s'est avérée trivial, celui de la batterie était nettement plus délicat. La méthode d'estimation retenue par intégration du courant n'offre pas une précision suffisante pour exploiter au maximum les possibilités de la batterie.
- La formulation du problème d'optimisation globale peut être modifiée en considérant de nouvelles dynamiques et/ou de nouvelles contraintes. Par exemple, il est apparu aux cours des expérimentations que la température de la PAC avait une influence importante sur les

performances du système ; il est également possible de s'intéresser de manière plus précise à la dynamique de puissance du système PAC (en particulier si l'hydrogène est obtenu par reformage). Cette nouvelle formulation du problème d'optimisation va aboutir à de nouvelles conditions d'optimalités ; par voie de conséquence, ceci peut contribuer à enrichir la formulation de la stratégie de commande temps réel λ_{pred} .

- La stratégie de commande λ_{pred} a été testée dans une situation « idéale », i.e. sur un banc d'essai en laboratoire avec des conditions de fonctionnement maîtrisées. Pour une utilisation dans un véhicule, des perturbations et des fonctionnements dégradés peuvent apparaître (variation des performances du système PAC, des batteries ou des supercondensateurs). Il s'agit alors de s'intéresser au comportement de la stratégie dans ces conditions ; en particulier, la robustesse de la loi de commande est à étudier.

Références

/Ahluwalia et al. 2005/

R.K. Ahluwalia, X. Wang, A. Rousseau, *Fuel economy of hybrid fuel-cell vehicles*, Journal of Power Sources, Vol. 152, pp. 233-244, 2005.

/Amstutz et al. 1999/

A. Amstutz, R. Schelbert, O. Garcia, F.N. Büchi, P. Dietrich, *Fuel cells for transportation – Hardware in the loop simulation of a fuel cell powered car*, European Automotive Congress, Vehicle Systems Technology for the Next Century, Barcelone 1999.

/Ananthachar et Duffy 2005/

V. Ananthachar, J.J. Duffy, *Efficiencies of hydrogen storage systems onboard fuel cell vehicles*, Journal of Solar Energy, Vol. 78 (5), pp. 687-694, Mai 2005.

/André et al. 2006/

M. André , R. Joumard ,R. Vidona , P. Tassela , P. Perret , *Real-world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars*, Atmospheric Environment , Vol. 40 (31), pp. 5944-5953, 2006.

/Barrade et Rufer 2004/

P. Barrade, A. Rufer, *The use of supercapacitors for energy storage in traction systems*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Paris, Octobre 2004.

/Bellman 1957/

R.E. Bellman, *Dynamic Programming*, Princeton University Press, 1957.

/Benbouzid et al. 2004/

S. Benbouzid, G. Dauphin-Tanguy, F. Guillemard, C. Nouillant, *Electrochemical Phenomena Modelling in PEM Fuel Cell with Bond Graph Approach*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Paris, Octobre 2004.

/Bentley 2002/

R.W. Bentley, *Global oil & gas depletion : an overview*, Energy Policy, Vol. 30, pp. 189–205, 2002.

/Beretta et Porcelatto 2003/

J. Beretta, D. Porcelatto, *Is the future of traction batteries will be the future of EV?*, Electric Vehicle symposium (EVS20), Long Beach, Novembre 2003.

/Bergounioux 2001/

M. Bergounioux, *Optimisation et contrôle des systèmes linéaires*, Édition Dunod, collection Science Sup, ISBN 2100056263, 2001.

/Berning et Djilali 2003/

T. Berning, N. Djilali, *Three-dimensional computational analysis of transport phenomena in a PEM fuel cell-a parametric study*, Journal of Power Sources, Vol. 124, pages 440-452, 2003.

/Boettner et al. 2001/

D.D. Boettner, G. Paganelli, Y.G. Guezennec, G. Rizzoni, M.J. Moran, *Component power sizing and limits of operation for proton exchange membrane (PEM) fuel cell/battery hybrid automotive applications*, Proceedings of ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, New York, Novembre 2001.

/Boettner et al. 2002/

D.D. Boettner, G. Paganelli, Y.G. Guezennec, G. Rizzoni, M.J. Moran, *Proton Exchange Membrane (PEM) fuel cell system for automotive vehicle simulation and control*, Journal of Energy Resources Technology (Transactions of the ASME), Vol. 124 (1), pp. 20-27, Mars 2002.

/Borne et al. 1990/

P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J.P. Richard, F. Rotella, I. Zambettakis, *Commande et optimisation des processus, Méthodes et techniques de l'ingénieur*, Éditions Technip, 1990.

/Brahma et al. 2000/

A. Brahma, Y. Guezennec, G. Rizzoni, *Optimal Energy Management in Series Hybrid Vehicles*, Proceedings of the American Control Conferences, Chicago, Juin 2000.

/Büchel et al. 2001/

J.P. Büchel, J.P. Lisse, S. Bernard, *Viabilité des piles à combustibles pour l'application automobile*, Annales de Chimie Science des Matériaux, Vol. 26 (4), pp. 43-48, 2001.

/Büchi et al. 2007/

F.N. Büchi, G. Paganelli, P. Dietrich, D. Laurent, A. Tsukada, P. Varenne, A. Delfino, R. Kötz, S.A. Freunberger, P.A. Magne, D. Walser, D. Olsommer, *Consumption and Efficiency of a Passenger Car with a Hydrogen/Oxygen PEFC based Hybrid Electric Drivetrain*, Fuel Cells, Vol.7, pp. 329-335, 2007.

/Burke 2003/

K.A. Burke, *Fuel Cells for Space Science Applications*, First International Energy Conversion Engineering Conference, Virginia, 17-21 Août 2003.

/Candusso 2002/

D. Candusso, *Hybridation du groupe électrogène à pile à combustible pour l'alimentation d'un véhicule électrique*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2002.

/Canudas-de-Wit 2003/

C. Canudas-de-Wit, P. Tsiotras, E. Velenis, M. Basset, G. Gissinger, *Dynamic Friction Models for Road/Tire Longitudinal Interaction*, Vehicle System Dynamics, Vol. 39 (3), pp. 189-226, 2003.

/CEA 2004/

CEA (Commissariat à l'Énergie Atomique), *L'hydrogène-Les nouvelles technologies de l'énergie*, Clefs CEA, Magazine numéros 50/51, hiver 2004/2005.

/Conte et al. 2001/

M. Conte, A. Iacobazzi, M. Ronchetti, R. Vellone, *Hydrogen economy for a sustainable development: state-of-the-art and technological perspectives*, Journal of Power Sources, Vol. 100, pp. 171–187, 2001.

/Delprat 2002/

S. Delprat, *Évaluation de stratégies de commande pour véhicules hybrides parallèle*, Thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 2002.

/Delprat et al. 2004/

S. Delprat, J. Lauber, T.M. Guerra, J. Rimaux, *Control of a parallel hybrid powertrain : Optimal Control*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 53 (3), pp. 872-881, 2004.

/Dietrich et al. 2003/

P. Dietrich, F. Büchi, A. Tsukada, M. Bärtschi, R. Kötz, G.G. Scherer, P. Rodatz, O. Garcia, M. Ruge, M. Wollenberg, P. Lück P., A. Wiartalla, C. Schönfelder, A. Schneuwly, P. Barrade, *Hy.Power-A technology platform combining a fuel cell system and a supercapacitor*, Handbook of Fuel Cells – Fundamentals, technology and Applications, Vol. 4 (11), pp 1184-1198, 2003.

/Dürr et al. 2006/

M. Dürr, A. Cruden, S. Gair, J.R. McDonald, *Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system*, Journal of Power Sources, Vol. 161, pp.1400–1411, 2006.

/Dustmann 2004/

C.H. Dustmann, *Advances in ZEBRA batteries*, Journal of Power Sources, Vol. 127, pp. 85-92, 2004.

/El Hadri 2001/

A. El Hadri, *Modélisation de véhicules, observation d'état et estimation des forces pneumatiques: Application au contrôle longitudinal*, Thèse de doctorat, Université Versailles Saint Quentin en Yvelines, 2001.

/Emadi et al. 2005/

A. Emadi, K. Rajashekara, S. Williamson, S. Lukic, *Topological Overview of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicular Power System Architectures and Configurations*, IEEE Transaction on Vehicular Technology, Vol.54 (3), Mai 2005.

/Friedman et al. 1999/

D.J. Friedman, *Maximizing direct-hydrogen fuel cell vehicle efficiency - Is hybridization Necessary ?*, SAE Paper Numéro. 1999-01-0539, Society of Automotive Engineers, 1999.

/Gao 2005/

W. Gao, *Performance Comparison of a fuel cell battery hybrid powertrain and a fuel cell ultracapacitor hybrid powertrain*, IEEE Transaction On Vehicular Technology, Vol. 54 (3), Mai 2005.

/Girard et al. 2003/

M. Girard, H. Angelis, M. Girard, *Alimentation à découpage 2^{ème} édition*, Collection Science Sup., Edition Dunod, ISBN 2 10 006940 3, 2003.

/Guay et al. 2004/

P. Guay, L. Barry, L. Stansfield, A. Rochefort, *On the control of carbon nanostructures for hydrogen storage applications*, Carbon, Vol. 42 (11), pp. 2187-2193, 2004.

/Guezennec et al. 2003/

Y. Guezennec, T.Y Choi, G. Paganelli, G. Rizzoni, *Supervisory control of fuel cell vehicles and its link to overall system efficiency and low-level control requirements*, Proceedings of the American Control Conference 2003, Vol. 3, pages 2055-2061, Juin 2003.

/Guzzella et Amstutz 1999/

L. Guzzella and A. Amstutz, *CAE Tools for Quasi-Static Modeling and Optimization of Hybrid Powertrains*, IEEE Transaction on vehicular technology, Vol. 48 (6), Novembre 1999.

/He et Yang 2006/

B. He, M. Yang, *Optimisation-based energy management of series hybrid vehicles considering transient behaviour*, International Journal of Alternative Propulsion, Vol. 1 (1), 2006.

/Helmolt et Eberle 2007/

R. Helmolt, U. Eberle, *Fuel cell vehicles: Status 2007*, Journal of Power Sources, Vol. 165, pp. 833–843, 2007.

/Jeong et Oh 2002/

K.S. Jeong, B.S. Oh, *Fuel economy and life-cost analysis of a fuel cell hybrid vehicle*, Journal of Power Source, Vol. 105, pp. 58-65, 2002.

/Jeong et al. 2005/

K.S. Jeong, W.Y Lee, C.S Kim, *Energy management strategies of a fuel cell/battery hybrid system using fuzzy logics*, Journal of Power Sources, Vol. 145 (2), pp. 319-326, Août 2005.

/Johnson 2002/

V.H. Johnson, *Battery performance models in ADVISOR*, Journal of Power Sources, Vol. 110, pp. 321-329, 2002.

/Kim et Peng 2007/

M.J. Kim, H. Peng, *Power management and design optimization of fuel cell/battery hybrid vehicles*, Journal of Power Source, Vol. 165, pp. 819-832, 2007.

/Kuhn et al. 2004/

E. Kuhn, C. Forgez, G. Friedrich, *Application of a 42V NiMH battery model to design a control law for a mild hybrid vehicle*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Paris, Octobre 2004.

/Lachaize 2004/

J. Lachaize , *Etude des stratégies et des structures de commande pour le pilotage des systèmes énergétiques à Pile à Combustible (PAC) destinés à la traction*, Thèse de doctorat, Laboratoire d'Électrotechnique et d'Électronique Industrielle, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2004.

/Lin et al. 2004/

C.C Lin, S. Jeon, H. Peng, J.M. Lee, *Driving Pattern Recognition for Control of Hybrid Electric Trucks*, Vehicle System Dynamics, International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility, Vol. 42 (1,2), pages 41-58 Décembre 2004.

/Lin et al 2006/

C.C Lin, M.J Kim, H. Peng, *System-Level Model and Stochastic Optimal Control for a PEM Fuel Cell Hybrid Vehicle*, Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 128 (4), pp.878-890, Décembre 2006.

/Magyar et al. 1990/

J.A. Magyar, M.A. Kepros, R.F. Nelson, *Reference electrode and gassing studies of lead/acid charge/discharge processes*, Journal of Power Sources, Vol. 31, pp. 93-106, 1990.

/Mann et al. 2000/

R.F. Mann, J.C. Amphlett, M.A.I. Hooper, H.M. Jensen, B.A. Peppley, P.R. Roberge, *Development and application of a generalised steady-state electrochemical model for a PEM fuel cell*, Journal of Power Sources, Vol. 86, pp. 173-180, 2000.

/Marie-Francoise et al. 2005/

J.N. Marie-Francoise, H. Gualous, R. Outbib, A. Berthon, *42 V Power Net with supercapacitor and battery for automotive application*, Journal of Power Sources, Vol. 143, pages 275-283, 2005.

/Markel et al. 2003/

T. Markel , M. Zolot , K.B. Wipke , A.A. Pesaram , *Energy storage requirements for hybrid fuel cell vehicles*, Advanced Automotive Battery Conference, Nice, France, Juin 2003.

/Mierlo et al. 2003/

J. Van Mierlo, P. Van den Bossche, G. Maggetto, *Models of energy sources for EV and HEV: fuel cells, batteries, ultracapacitors, flywheels and engine-generators*, Journal of Power Sources, Vol. 128, pp. 76-89, 2004.

/Mierlo et al. 2006/

J.V. Mierlo, G. Maggetto, Ph. Lataire, *Which energy source for road transport in the future? A comparison of battery, hybrid and fuel cell vehicles*, Energy Conversion and Management, Vol. 47 (17), pp. 2748-2760, Octobre 2006.

/Müller et al. 2007/

E.A. Müller, A.G. Stefanopoulou, L. Guzzella, Optimal Power Control of Hybrid Fuel Cell Systems for an Accelerated System Warm-Up, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 15 (2), Mars 2007.

/Newman et al. 2003/

J. Newman, K.E. Thomas, H. Hafezi, D.R. Wheeler, *Modeling of lithium-ion batteries*, Journal of Power Sources, Vol. 119-121, pp. 838-843, 2003.

/Paganelli 1999/

G. Paganelli, *Conception et commande d'une chaîne de traction pour véhicule hybride parallèle thermique et électrique*, thèse de doctorat, Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis, 1999.

/Paganelli et al. 2002/

G. Paganelli, Y. Guezennec, G. Rizzoni, *Optimizing Control Strategy for Hybrid Fuel Cell Vehicle*, SAE World Congress & Exhibition, Detroit, Mars 2002.

/Pede et al. 2004/

G. Pede, A. Iacobazzi, S. Passerini, A. Bobbio, G. Botto, *FC vehicle hybridisation: an affordable solution for an energy-efficient FC powered drive train*, Journal of Power Sources, Vol. 125, pp. 280-291, 2004.

/Pinard 2007/

M. Pinard, *Convertisseurs et Electronique de puissance-Commande, description et mise en œuvre*, Édition Dunod, Collection L'Usine Nouvelle, ISBN 978-2-10-049674-7, 2007.

/Pisu et Rizzoni 2005/

P. Pisu, G. Rizzoni, *A Supervisory Control Strategy for Series Hybrid Electric Vehicles with Two Energy Storage Systems*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Chicago, 2005.

/Prater 1992/

K.B. Prater, *Solid polymer fuel cell developments at Ballard*, Journal of Power Sources, Volume 37 (1-2), pages 181-188, Janvier 1992.

/Pukrushpan et al. 2004/

J.T. Pukrushpan, A.G. Stefanopoulou, H. Peng, *Control Of Fuel Cell Power Systems: Principles, Modeling, Analysis, and Feedback Design*, Springer, Technology & Industrial Arts, ISBN 1852338164, 2004.

/Rodatz 2003/

P. Rodatz, *Dynamics of the Polymer Electrolyte Fuel Cell: experiments and model-based analysis*, thèse de doctorat, ETH Zürich, 2003.

/Rodatz et al. 2003/

P. Rodatz, G. Paganelli, A. Sciarretta, L. Guzzella, *Optimal power management of an experimental fuel cell/supercapacitor-powered hybrid vehicle*, Control Engineering Practice, Vol. 13, pp. 41-53, 2005.

/Rogg et al. 2003/

S. Rogg, M. Höglinger, E. Zwittig, C. Pfender, W. Kaiser, T. Heckenberger, *Cooling Modules for Vehicles with a Fuel Cell Drive*, Fuel Cells, Willey Interscience, Vol. 3 (3) , pp. 153-158, 2003.

/Ruge 2003/

M.D. Ruge, *Entwicklung eines flüssigkeitsgekühlten Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellenstapels mit einer Leistung von 6,5 kW*, Thèse de doctorat, ETH Zürich, 2003.

/Sabatier et al. 2006/

J. Sabatier, M. Aoun, A. Oustaloup, G. Grégoire, F. Ragot, P. Roy, *Fractional system identification for lead acid battery state of charge estimation*, Signal Processing, Vol. 86, pp. 2645-2657, 2006.

/Saïssset et al. 2004/

R. Saïssset, C. Turpin, S. Astier, J.M. Blaquière, *Electricity generation starting from a fuel Cell hybridised with a storage device*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Paris, Octobre 2004.

/Santin et al. 2007/

J.J. Santin, C.H. Onder, J. Bernard, D.Isler, P.Kobler, F.Kolb, N. Weidmann, L. Guzzella, *The world's most fuel efficient vehicle – Design and development of PAC-Car II*, Edition VDF Hochschulverlag AG, ETH Zürich, ISBN 978-3-7281-3134-8, 2007.

/Santis et al. 2004/

M. Santis, D. Schmid, M. Ruge, G. Paganelli, F.N. Büchi, *“PowerPac”, a portable 1 kW fuel cell system*, Paul Scherrer Institut Scientific Report, Vol. 5: General Energy, 2003.

/Schell et al. 2005/

A. Schell, H. Peng , D. Tran, E. Stamos, C.C Lin , M.J. Kim, *Modelling and control strategy development for fuel cell electric vehicles*, Annual Reviews in Control, Vol. 29, pp. 159-168, 2005.

/Schneuwly et al. 2002/

A. Schneuwly, M. Bärtschi, V. Hermann, G. Sartorelli, R. Gallay, R. Koetz, *BOOSTCAP Double-Layer Capacitors for Peak Power Automotive Applications*, International Advance Automotive battery conference (AABC), Las Vegas , Février 2002.

/Schoffield et al. 2005/

N. Schoffield, H.T. Yap, C.M. Bingham, *Hybrid energy sources for electric and fuel cell vehicle propulsion*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Chicago, Septembre 2005.

/Sciarretta et Guzzella 2007/

A. Sciarretta, L. Guzzella, *Control of Hybrid Electric Vehicles - A Survey of Optimal Energy-Management Strategies*, IEEE Control Systems Magazine, Vol. 27 (2), pp 60-70, 2007.

/Scordia 2004/

J. Scordia, *Approche systématique de l'optimisation du dimensionnement et de l'élaboration de lois de gestion d'énergie de véhicules hybrides*, Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2004.

/Seiler & Schröder 1998/

J. Seiler, D. Schröder, *Hybrid vehicle operating strategies*, Electric Vehicle Symposium EVS15, Bruxelles, 1998.

/Serrao et al. 2005/

L. Serrao, Z. Chehab, Y. Guezennec, G. Rizzoni, *An Aging Model of Ni-MH Batteries for Hybrid Electric Vehicles*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Chicago, 2005.

/Soria et al. 2006/

M.L. Soria, F. Trinidad, J.M. Lacadenaa, A. Sánchez, J. Valencianoa, *Advanced valve-regulated lead-acid batteries for hybrid vehicle applications*, Journal of Power Sources, Vol. 168 (1), pp. 12-21 Mai 2007.

/Spotnitz 2005/

R. Spotnitz, *Advanced EV and HEV Batteries*, IEEE Vehicle and Power Propulsion Conference, Chicago, September 2005.

/Sugeno 1985/

M. Sugeno, *Industrial applications of fuzzy control*, Edition North-Holland, ISBN 0-444-87829-7, 1985.

/Suh et Stefanopoulou 2006/

K.W. Suh, A.G. Stefanopoulou, *Effects of Control Strategy and Calibration on Hybridization Level and Fuel Economy in Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle*, SAE World Congress & Exhibition, Detroit, Avril 2006.

/Sundström et Stefanopoulou 2007a/

O. Sundström, A. Stefanopoulou, *Optimum Battery Size for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle-Part I*, Journal of Fuel Cell Science and Technology, Mai 2007, Vol. 4 (2), pp. 167-175.

/Sundström et Stefanopoulou 2007b/

O. Sundström, A. Stefanopoulou, *Optimum Battery Size for Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle With Transient Loading Consideration-Part II*, Journal of Fuel Cell Science and Technology, Vol. 4 (2), pp 176-184, Mai 2007.

/Trélat 2005/

E. Trélat, *Commande Optimale : Théorie et Applications*, Edition Vuibert, Collection Mathématiques Concrètes, ISBN 2-7117-7175-X, 2005.

/Wee 2007/

J.H. Wee, *Applications of proton exchange membrane fuel cell systems*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 11, pp. 1720-1738, 2007.

/Wipke et al. 2001/

K.B Wipke, T. Markel, D. Nelson, *Optimizing energy management strategy and degree of hybridization for a hydrogen fuel cell SUV*, Electric Vehicle Symposium EVS 18, Berlin, 2001.

/Wong 2001/

J.Y. Wong, *Theory of Ground Vehicles-Third Edition*, Edition Wiley-Interscience 2001.

/Wu et al. 2004/

Y. Wu, H. Gao, R. Sharma, *Optimal design for fuel cell and supercapacitor hybrid electric vehicle*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Paris, Octobre 2004.

/You and Liu 2006/

L. You, H. Liu, *A two-phase flow and transport model for PEM fuel cells*, Journal of Power Sources, Vol. 155, pages 219–230, 2006.

/Zhou 2005/

L. Zhou, *Progress and problems in hydrogen storage methods*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 9 (4), pp. 395-408, Août 2005.

/Zolot et al. 2004/

M. Zolot, T. Markel, A.A. Pesaran, *Analysis of fuel cell vehicle hybridization and implications for energy storage devices*, Advanced Automotive Battery Conference, San Fransisco, Juin 2004.

/Züttel 2003/

A. Züttel, *Materials for hydrogen storage*, Materials Today, Vol. 6 (9), pages 24-33, Septembre 2003.

Sites Internet

/Advisor/

Logiciel Advisor, *Advanced Vehicle Simulator*, logiciel de simulation de véhicule hybride du National Renewable Energy Laboratory (NREL), U.S Department of Energy, <http://www.nrel.gov/>.

/AFH2/

Association Française de l'hydrogène, *Le programme DaimlerChrysler*, Mémento de l'hydrogène, Fiche 9.1.1, Novembre 2004 <http://www.afh2.org/>.

/Axane/

Société Axane, *Typologie des piles à combustible*, 2005, <http://www.axane.net/>.

/CCFA/

Comité des Constructeurs Français d'automobile, *Parc automobile mondiale en 2005*, <http://www.ccfa.fr/>.

/ClubPac/

ClubPac, site internet d'informations sur la pile à combustible, <http://club.pac.free.fr/>.

/Dupont/

Dupont, entreprise de fabrication de membranes Nafion, <http://www.dupont.com/>.

/Fuel Cell Today/

Fuel Cell Today, site d'actualité sur la pile à combustible, <http://www.fuelcelltoday.com/>.

/GM/

General Motors, *Technical Data of HydroGen3*, Donnée techniques 2004, <http://www.gmeurope.com/marathon/>.

/Honda/

Honda, *Honda Fuel Cell Vehicle*, <http://world.honda.com/FuelCell/>.

/Michelin/

Michelin, *Hy-Light – Le concept car Michelin de la mobilité propre*, <http://www.michelin.fr/>.

/Nissan/

Nissan, *Fuel Cell Vehicle X-Trail FCV*, Notes techniques 2006, <http://www.nissan-global.com/>.

/PAC-Car/

ETH Zürich, *PAC-Car II*, site internet consacré au prototype PAC-Car II, <http://www.paccar.ethz.ch/>.

/PSA/

PSA, *La pile à combustible - une énergie d'avenir*, Communiqué de presse 2006, <http://www.psa-peugeot-citroen.com/>.

/SAE/

SAE (Society of automotive Engineer), *History of Fuel Cells*, <http://www.sae.org/technology/>.

/Shell/

Shell Eco-Marathon, <http://www.shell.com/>.

/Toyota/

Toyota, *Toyota's Fuel-Cell Hybrid Vehicles (FCHV)*, <http://www.toyota.com/>.

/Vairex/

Société Vairex, fabricant de compresseurs d'air pour pile à combustible, <http://www.vairex.com/>.

Références personnelles

Revue

Bernard J., Delprat S., Büchi F.N., Guerra T.M., *Fuel Cell Hybrid Vehicles: Global optimization based on optimal control theory*, International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.), Vol. 1, n. 3. Juillet-Août 2006.

Chapitre d'ouvrage

Santin J-J., Onder C.H., Bernard J., Isler D., Kobler P., Kolb F., Weidmann N., Guzzella L., *The World's Most Fuel efficient Vehicle: Design and Development of PAC-Car II*, Vdf Hochschulverlag AG et ETH Zürich, ISBN 978-3-7281-3134-8, 2007.

Conférences

Bernard J., Delprat S., Büchi F.N., Guerra T.M., *Fuel Cell / Battery hybrid vehicle: From global optimization to real time power management*, Session plénière, International Conference on Advances in Vehicle Control and Safety AVCS'07, Buenos Aires, 8-10 Février 2007.

Bernard J., Delprat S., Büchi F.N., Guerra T.M., *Global Optimisation in the power management of a Fuel Cell Hybrid Vehicle (FCHV)*, Best paper award, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Windsor, 6-8 Septembre 2006.

Bernard J., Lenoir Y., Delprat S., Guerra T.M., Santin J.J., Paganelli G., *Optimizing energy consumption of an air supply system: application to a PEM Fuel Cell*, IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Paris, 6-8 Octobre 2004.

Séminaires

Bernard J., Delprat S., Guerra T.M., Santin J.J., Büchi F.N., *Optimisation des performances des véhicules à pile à combustibles*, Groupe de Travail Automatique et Automobile GDR MACS CNRS, Valenciennes, 5 Avril 2006.

Delprat S., Bernard J., Guerra T.M., *Stratégie de commande pour véhicule hybride parallèle*, Journées ADV : Automatique et Diagnostic pour le Véhicule Groupe de Travail Automatique et Automobile GDR MACS, Marseille, 10 Juin 2005.

Delprat S., Bernard J., Guerra T.M., *Stratégie de commande pour véhicule hybride parallèle*, Groupe de Travail Automatique et Automobile GDR MACS, Compiègne, 6 Avril 2005.

ANNEXES

ANNEXE 1. Modèle statique de la pile à combustible.....	198
ANNEXE 2. Cartographies de consommation d'hydrogène du prototype Hy-Muve.....	203
ANNEXE 3. Résolution du problème d'optimisation globale du prototype PAC-Car II par programmation dynamique.	206
ANNEXE 4. Stratégie de commande basée sur la minimisation des pertes (« Loss Minimization Strategy »)	209

ANNEXE 1. Modèle statique de la pile à combustible

Le modèle de la cellule élémentaire d'une pile à combustible est issu de /Pukrushpan et al. 2004/. Il s'agit d'un modèle constitué majoritairement d'équations empiriques.

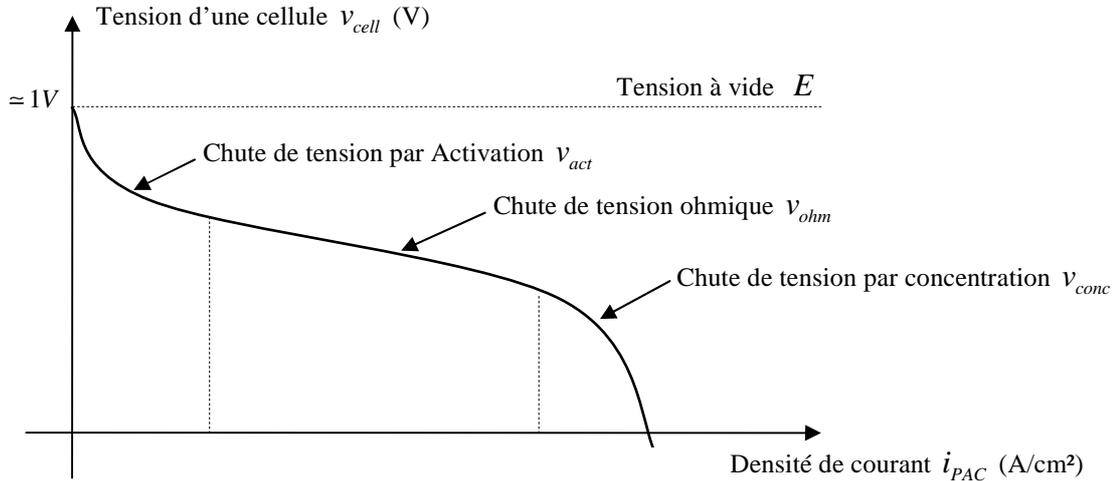


Figure 6-1 : Courbe de polarisation d'une cellule de pile à combustible PEM.

La courbe de polarisation d'une cellule de pile à combustible comporte 3 zones distinctes (figure 6-1). Chaque zone est caractérisée par une chute de tension prédominante :

1. Chute de tension par activation

La chute de tension par activation v_{act} est donnée par la relation :

$$v_{act} = v_0 + v_a \cdot (1 - e^{-c_1 \cdot i_{PAC}}) \quad (6.1)$$

avec i_{PAC} la densité de courant (A/cm^2)

2. Chute de tension ohmique

La chute de tension ohmique v_{ohm} est donnée par la relation :

$$v_{ohm} = i_{PAC} \cdot R_{ohm} \quad (6.2)$$

La résistance équivalente R_{ohm} ($\Omega \cdot cm^2$) est fonction de l'épaisseur de la membrane t_m (cm)

et de la conductivité de la membrane σ_m ($\Omega^{-1} \cdot cm^{-1}$) :

$$R_{ohm} = \frac{t_m}{\sigma_m} \quad (6.3)$$

La conductivité de la membrane σ_m est fonction son humidité et de sa température T_{PAC} (K) :

$$\sigma_m = b_1 \cdot \exp\left(b_2 \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{PAC}}\right)\right) \quad (6.4)$$

avec b_1 fonction de la quantité d'eau dans la membrane λ_m :

$$b_1 = b_{11} \cdot \lambda_m - b_{12}$$

La valeur de λ_m est comprise entre 0 et 14 (correspondant respectivement à une humidité relative de 0% et de 100%).

3. Chute de tension par concentration :

La chute de tension par concentration est donnée par :

$$v_{conc} = i_{PAC} \cdot \left(c_2 \cdot \frac{i_{PAC}}{i_{max}}\right)^{c_3} \quad (6.5)$$

4. Tension de cellule

Finalement, la tension d'une cellule v_{cell} en fonction de la densité de courant i_{PAC} est donnée par :

$$v_{cell} = E - v_{act} - v_{ohm} - v_{conc} \quad (6.6)$$

avec E la tension à vide d'une cellule (V).

Les paramètres E , v_0 , v_a , c_1 , t_m , b_1 , b_2 , c_2 , c_3 et i_{max} sont obtenus par régression sur des mesures réelles /Pukrushpan et al. 2004/ :

$$E = 1,229 - 8,5 \times 10^{-4} \cdot (T_{PAC} - 298,15) + 4,308 \times 10^{-5} \cdot T_{PAC} \cdot \left[\ln\left(\frac{P_{H_2}}{1,01325}\right) + \frac{1}{2} \ln\left(\frac{P_{O_2}}{1,01325}\right) \right]$$

$$v_0 = 0,279 - 8,5 \times 10^{-4} \cdot (T_{PAC} - 298,15) + 4,308 \times 10^{-5} \cdot T_{PAC} \cdot \left[\ln\left(\frac{p_{ca} - p_{sat}}{1,01325}\right) + \frac{1}{2} \cdot \ln\left(\frac{0,1173 \cdot (p_{ca} - p_{sat})}{1,01325}\right) \right]$$

$$v_a = \left(-1,618 \times 10^{-5} \cdot T_{PAC} + 1,618 \times 10^{-2}\right) \cdot \left(\frac{P_{O_2}}{0,1173} + p_{sat}\right)^2 + \left(1,8 \times 10^{-4} \cdot T_{PAC} - 0,166\right) \cdot \left(\frac{P_{O_2}}{0,1173} + p_{sat}\right) + \left(-5,8 \times 10^{-4} \cdot T_{PAC} + 0,5736\right)$$

$$c_1 = 10$$

$$t_m = 0,0145$$

$$b_1 = 0,005139 \cdot \lambda_m - 0,00326$$

$$b_2 = 350$$

$$c_2 = \begin{cases} \left(7,16 \times 10^{-4} \cdot T_{PAC} - 0,622 \right) \left(\frac{p_{O_2}}{0,1173} + p_{sat} \right) & \text{si } \left(\frac{p_{O_2}}{0,1173} + p_{sat} \right) < 2 \text{ atm} \\ + \left(-1,45 \times 10^{-3} \cdot T_{PAC} + 1,68 \right) & \\ \\ \left(8,66 \times 10^{-5} \cdot T_{PAC} - 0,068 \right) \left(\frac{p_{O_2}}{0,1173} + p_{sat} \right) & \text{si } \left(\frac{p_{O_2}}{0,1173} + p_{sat} \right) \geq 2 \text{ atm} \\ + \left(-1,6 \times 10^{-4} \cdot T_{PAC} + 0,54 \right) & \end{cases}$$

$$i_{max} = 2,2$$

$$c_3 = 2$$

avec T_{PAC} la température de la pile à combustible (K), p_{ca} la pression à la cathode (atm), p_{O_2} la pression partielle d'oxygène (atm), p_{H_2} la pression partielle d'hydrogène (atm) et p_{sat} la pression de vapeur saturante d'hydrogène (atm).

La pression de vapeur saturante p_{sat} peut être approximée par la formule de Rankine :

$$\ln(p_{sat}) = 13,7 - \frac{5120}{T_{PAC}} \quad (6.7)$$

La tension à vide E et chutes de tensions d'activation v_{act} , ohmique v_{ohm} et de concentration v_{conc} pour une température de fonctionnement de 80 °C et une pression de 2 atm sont illustrées à la figure 6-2.

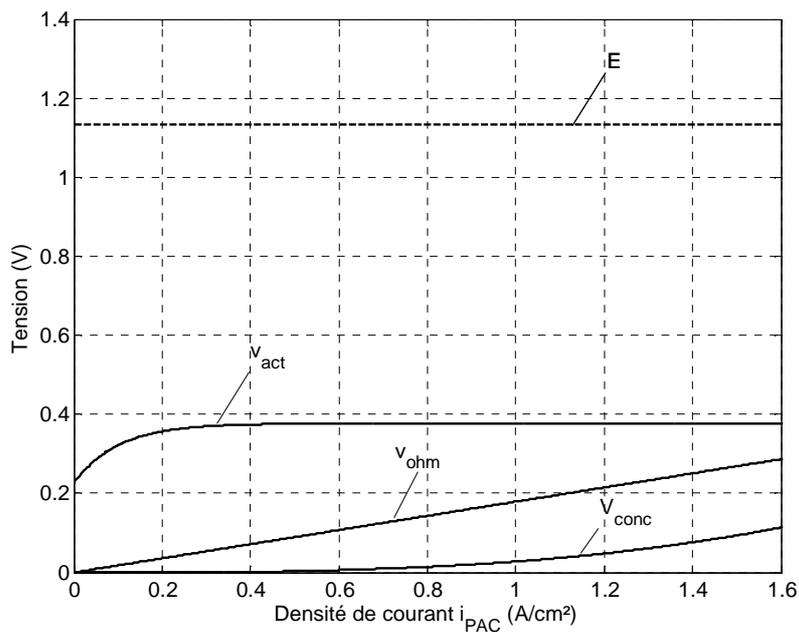


Figure 6-2 : Tension à vide E et chutes de tensions d'activation v_{act} , ohmique v_{ohm} et de concentration v_{conc} pour une température de fonctionnement de 80 °C et une pression de 2 atm.

Des exemples de courbes de polarisation obtenues à partir du modèle statique sont donnés à la figure 6-3 et à la figure 6-4 pour différentes températures et différentes pressions de fonctionnement.

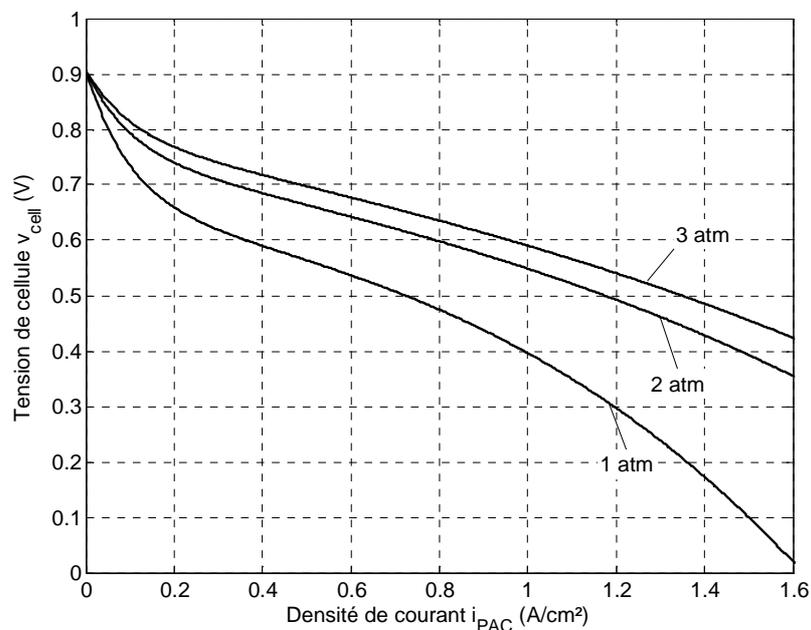


Figure 6-3 : Courbes de polarisation pour une température de 80 °C et différentes pressions.

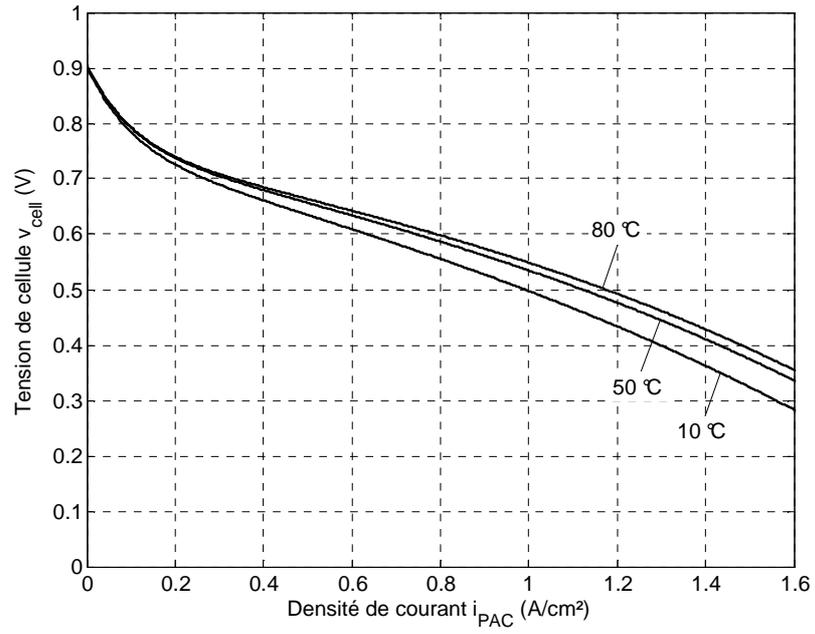


Figure 6-4 : Courbes de polarisation pour une pression de 2 atm et différentes températures.

ANNEXE 2. Cartographies de consommation d'hydrogène du prototype Hy-Muve

Les cartographies de consommation d'hydrogène sont exprimées en gramme. Pour l'ensemble des figures :

- l'étoile * représente le dimensionnement optimal en terme de consommation d'hydrogène ;
- le point • à $N_{ESS} = 0$ correspond à la consommation minimale obtenue sans utiliser de batteries.

Configuration n°1

Système PAC : $T_{10\% \rightarrow 90\%} = 0\text{ s}$, $P_{\text{sysPAC}_{\text{min}}} = 0$

Batteries : $I_{\text{batt}_{\text{max}}} = 35\text{ A}$, $\Delta\text{SOC} = 0\%$

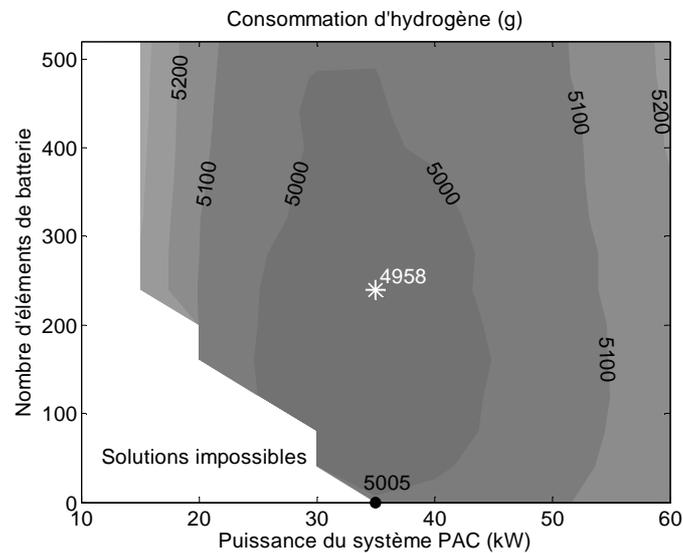


Figure 6-5 : Consommation d'hydrogène pour la Configuration n°1 du Hy-Muve.

Configuration n°2

Système PAC : $T_{10\% \rightarrow 90\%} = 0 \text{ s}$, $P_{\text{sysPAC}_{\text{min}}} = 0$

Batteries : $I_{\text{batt}_{\text{max}}} = 35 \text{ A}$, $\Delta\text{SOC} = -60\%$

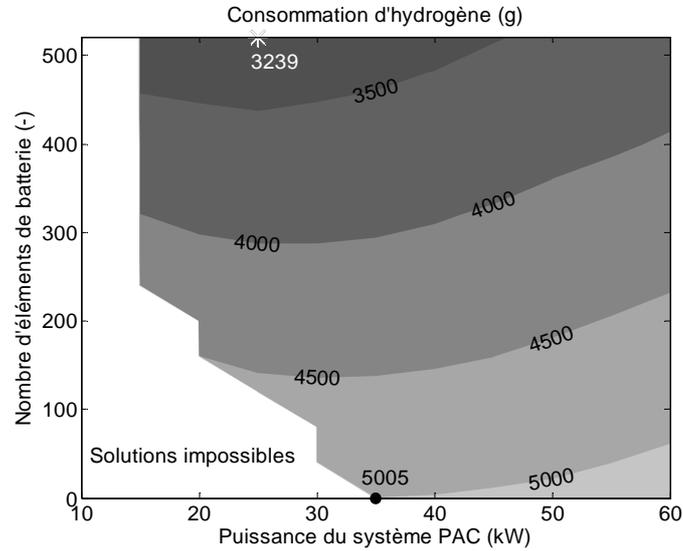


Figure 6-6 : Consommation d'hydrogène pour la **Configuration n°2** du Hy-Muve.

Configuration n°3

Système PAC : $T_{10\% \rightarrow 90\%} = 0 \text{ s}$, $P_{\text{sysPAC}_{\text{min}}} = 0$

Batteries : $I_{\text{batt}_{\text{max}}} = 70 \text{ A}$, $\Delta\text{SOC} = -60\%$

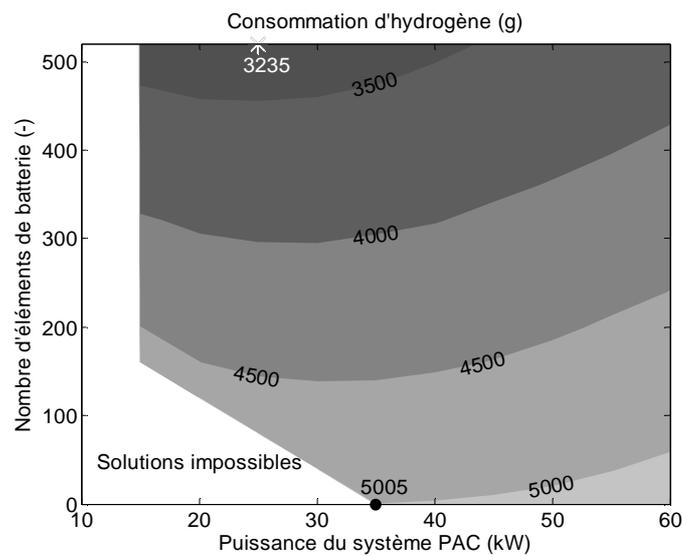


Figure 6-7 : Consommation d'hydrogène pour la **Configuration n°3** du Hy-Muve.

Configuration n°4

Système PAC : $T_{10\% \rightarrow 90\%} = 20\text{ s}$, $P_{\text{sysPAC}_{\min}} = 0$

Batteries : $I_{\text{batt}_{\max}} = 70\text{ A}$, $\Delta\text{SOC} = -60\%$

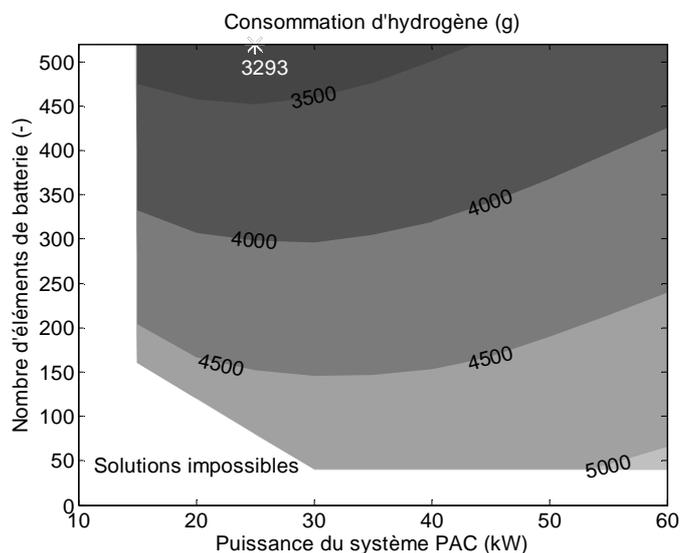


Figure 6-8 : Consommation d'hydrogène pour la Configuration n°4 du Hy-Muve.

Configuration n°5

Système PAC : $T_{10\% \rightarrow 90\%} = 20\text{ s}$, $P_{\text{sysPAC}_{\min}} = 17,5\% \times P_{\text{sys}_{\max}}$

Batteries : $I_{\text{batt}_{\max}} = 70\text{ A}$, $\Delta\text{SOC} = -60\%$

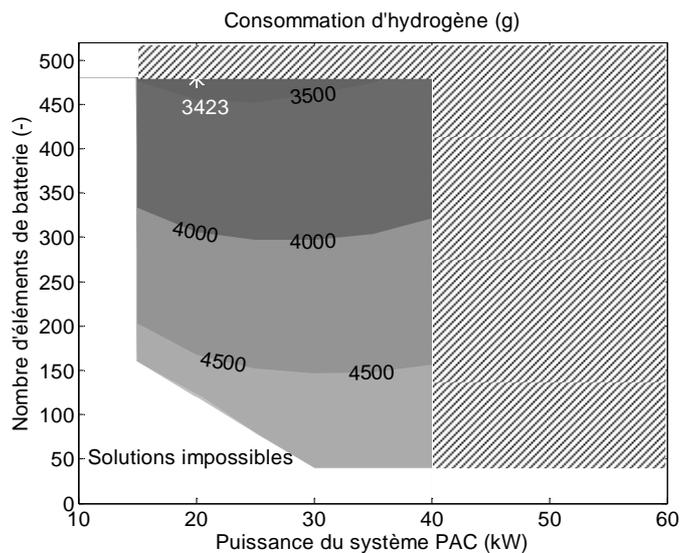


Figure 6-9 : Consommation d'hydrogène pour la Configuration n°5 du Hy-Muve.

ANNEXE 3. Résolution du problème d'optimisation globale du prototype PAC-Car II par programmation dynamique

1. Formulation du problème

- Critère à minimiser :

$$J = \int_0^{T_f} \dot{m}_{H_2} (F_{traction}(u), V_{veh}(u)) \cdot du \quad (\text{Consommation d'hydrogène})$$

- Système :

$$X_{veh}(t) = \frac{1}{M_{veh}} \cdot \int \int_0^t (F_{traction}(u) - F_{aero}(u) - F_{roul}(u) - F_{pente}(u)) \cdot du$$

(Dynamique du véhicule)

- Contraintes :

$$0 \leq F_{traction}(t) \leq \bar{F}_{traction}(V_{veh}(t)) \quad (\text{Effort de traction limite})$$

$$T_f \leq T_{max} \quad (\text{Durée limite})$$

La variable de décision choisie est l'effort de traction $F_{traction}$ et la variable d'état correspond à la position X_{veh} du véhicule sur le parcours.

2. Définition de l'espace d'état

La borne supérieure de l'espace d'état \bar{X}_{veh} (figure 6-10) est obtenue en appliquant l'effort de traction maximal $\bar{F}_{traction}$ au véhicule du véhicule à partir de $t = 0$:

$$\bar{X}_{veh}(t) = \frac{1}{M_{veh}} \cdot \int \int_0^t (\bar{F}_{traction}(V_{veh}(u)) - F_{aero}(u) - F_{roul}(u) - F_{pente}(u)) \cdot du \quad (6.8)$$

La trajectoire le long de cette borne correspond à la durée minimale requise T_{min} pour parcourir l'ensemble du parcours. Le véhicule arrivera avant la fin de la durée imposée T_{max} .

La borne inférieure de l'espace d'état \underline{X}_{veh} (figure 6-10) est également obtenues en appliquant l'effort de traction maximal $\bar{F}_{traction}$, à la différence que le véhicule démarre la course à $t = T_{crit}$.

La valeur T_{crit} correspond à l'instant de démarrage critique sur la grille de départ au-delà

duquel il sera impossible au véhicule de terminer la course dans les temps. La borne inférieure \underline{X}_{veh} correspond donc à une translation temporelle de la borne \bar{X}_{veh} :

$$\begin{cases} \underline{X}_{veh}(t) = 0 & \text{si } t < T_{crit} \\ \bar{X}_{veh}(t) = \bar{X}_{veh}(t - T_{crit}) & \text{sinon} \end{cases} \quad (6.9)$$

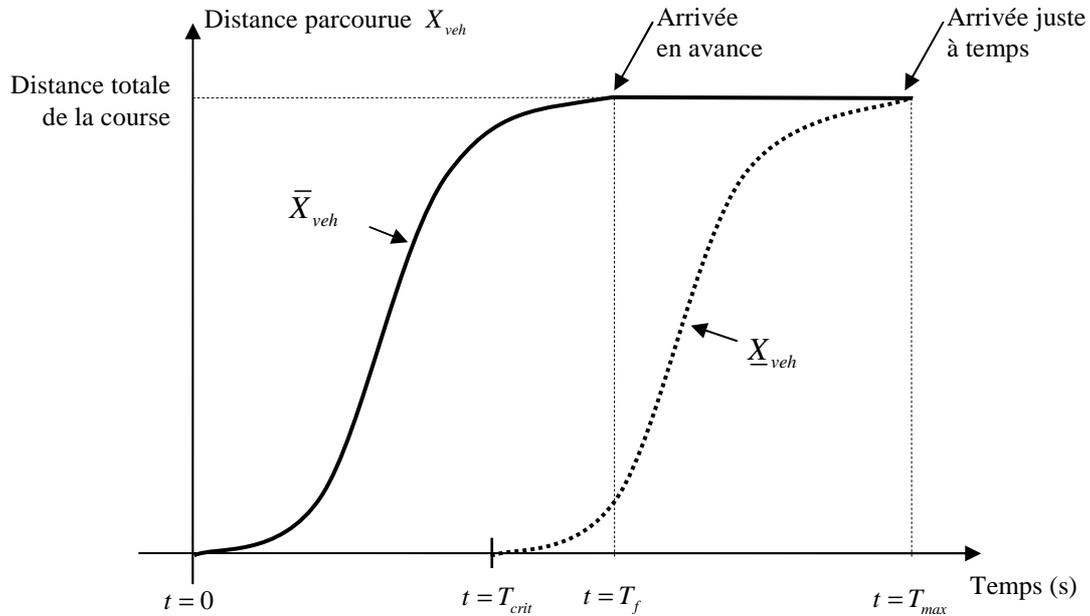


Figure 6-10 : Définition de l'espace d'état.

Le temps et l'espace d'état sont ensuite discrétisés pour pouvoir appliquer l'algorithme de programmation dynamique.

3. Algorithme de programmation dynamique

Le principe de l'algorithme de programmation dynamique est donné à la figure 6-11 avec les définitions suivantes :

- $X_i(k) = (\delta x \cdot i, T_e \cdot k)$
avec $i \in \mathbb{N}$, $k \in \{1 \dots N\}$ et δx le pas de quantification
- soit Ω_k , l'ensemble des valeurs de $X_{veh}(k)$ possibles à chaque instant k :
$$X(k) \in \Omega_k, \Omega_k = \{X_{veh,i}(k) \in [\underline{X}_{veh}(k), \bar{X}_{veh}(k)]\} \quad (6.10)$$

- $S(X_{veh}^i(k))$ représente le cout total (hydrogène consommé) pour joindre l'état $X_{veh}(N)$ à l'état $X_{veh}^i(k)$.
- $C_{i \rightarrow j}(k)$ représente le cout pour joindre l'état $X_{veh}^i(k)$ à l'état $X_{veh}^j(k-1)$.
- La relation de récurrence permettant de calculer $S(X_{veh}^j(k-1))$ est :

$$S(X_{veh}^j(k-1)) = \min_j (S(X_{veh}^i(k)) + C_{i \rightarrow j}(k)) \quad (6.11)$$

- La vitesse $V_{veh}^j(k-1)$ d'un vecteur se calcul selon :

$$V_{veh}^j(k-1) = \frac{X_{veh}^i(k) - X_{veh}^j(k-1)}{T_e} \quad (6.12)$$

- L'effort de traction d'un vecteur se calcul selon :

$$F_{traction}^j(k-1) = M_{veh} \cdot \frac{V_{veh}^i(k) - V_{veh}^j(k-1)}{T_e} + F_{roul}^j(k-1) + F_{pente}^j(k-1) + F_{aero}^j(k-1) \quad (6.13)$$

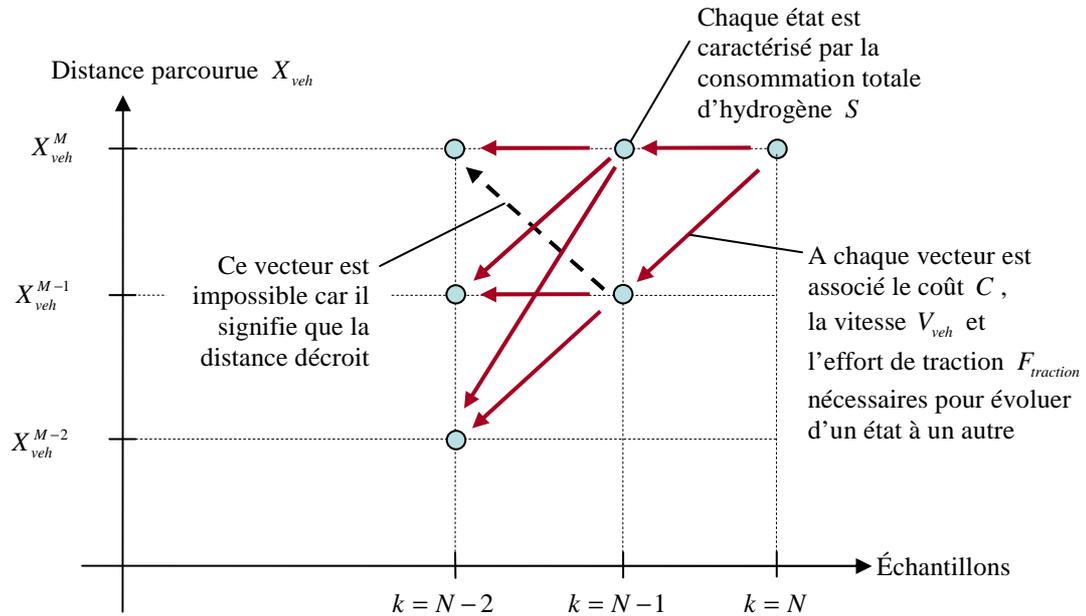


Figure 6-11 : Principe de la programmation dynamique.

ANNEXE 4. Stratégie de commande basée sur la minimisation des pertes (« Loss Minimization Strategy »)

Les exemples et illustrations de cette section sont fournis pour la configuration de véhicule suivante :

Configuration LMS:

Véhicule Berlingo,
Système pile à combustible de 40 kW,
200 éléments de batterie Ni-MH.

1. Principe

La stratégie LMS est proposée par /Seiler & Schröder 1998/. A partir de la connaissance des pertes des différents organes du groupe motopropulseur, il est possible de formuler une stratégie qui minimise à chaque instant la somme de toutes les pertes de puissance. Dans le cas d'un véhicule hybride à pile à combustible, la somme des pertes à minimiser L_{tot} est :

$$L_{tot}(k) = L_{sysPAC}(P_{sysPAC}(k)) + L_{SSE}(P_{SSE}(k), X(k)) \quad (6.14)$$

avec L_{sysPAC} les pertes du système PAC et L_{SSE} les pertes de la source secondaire d'énergie.

Pour calculer les pertes du système PAC, il est nécessaire dans un premier temps de définir la consommation spécifique. La consommation spécifique $\dot{m}_{H_2}^{specifique}$ est le rapport entre la consommation instantanée d'hydrogène et la puissance obtenue en sortie du système PAC (convertisseur de puissance inclus) :

$$\dot{m}_{H_2}^{specifique}(P_{sysPAC}) = \frac{\dot{m}_{H_2}(P_{sysPAC})}{P_{sysPAC}} \quad (6.15)$$

La consommation spécifique est proportionnelle à l'inverse du rendement du système PAC et n'est pas définie pour $P_{sysPAC} = 0$.

Les pertes L_{sysPAC} sont définies de la manière suivante :

$$L_{sysPAC}(P_{sysPAC}) = \frac{\dot{m}_{H_2}(P_{sysPAC})}{\min(\dot{m}_{H_2}^{specifique})} - P_{sysPAC} \quad (6.16)$$

Les pertes sont tracées à la figure 6-12 pour un système PAC de 40 kW. Il apparaît que les pertes sont nulles pour la puissance de sortie P_{sysPAC} où le rendement est maximal (ou la consommation spécifique minimale).

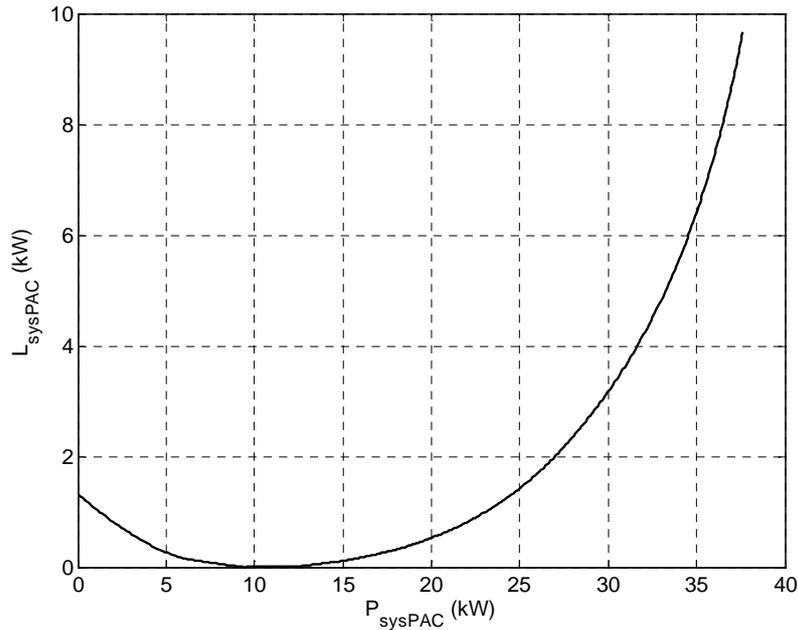


Figure 6-12 : Pertes du système PAC.

Les pertes de la source secondaire d'énergie correspondent à la différence entre la puissance apparente P_{SSE} et la puissance réellement prélevée $Q(P_{SSE}, X)$:

$$L_{SSE}(P_{SSE}, X) = -(P_{SSE} + Q(P_{SSE}, X)) \quad (6.17)$$

Les pertes L_{SSE} sont tracées à la figure 6-13 pour le pack de batteries considéré. Les pertes sont minimales pour une puissance P_{SSE} nulle (la perte minimale n'est pas nulle car elle correspond à la consommation permanente du convertisseur de puissance). Par changement de variable ($P_{mot}(k) = P_{sysPAC}(k) + P_{SSE}(k)$), les pertes \tilde{L}_{SSE} sont exprimées en fonction de la variable de décision P_{sysPAC} :

$$\tilde{L}_{SSE}(P_{sysPAC}(k), X(k)) = L_{SSE}(P_{SSE}(k), X(k)) \quad (6.18)$$

La valeur de la variable de décision est obtenue par minimisation des pertes à chaque instant :

$$\forall k \in \{1 \dots N\}, P_{\text{sysPAC}}(k) = \underset{\tilde{P}_{\text{sysPAC}_{\min}}(k) \leq P_{\text{sysPAC}}(k) \leq \tilde{P}_{\text{sysPAC}_{\max}}}{\text{argmin}} \left(L_{\text{tot}}(k) \right) \quad (6.19)$$

avec $L_{\text{tot}}(k) = L_{\text{sysPAC}}(P_{\text{sysPAC}}(k)) + \tilde{L}_{\text{SSE}}(P_{\text{sysPAC}}(k), X(k))$

et les limites $\tilde{P}_{\text{sysPAC}_{\min}}$, $\tilde{P}_{\text{sysPAC}_{\max}}$ définies au chapitre 3.

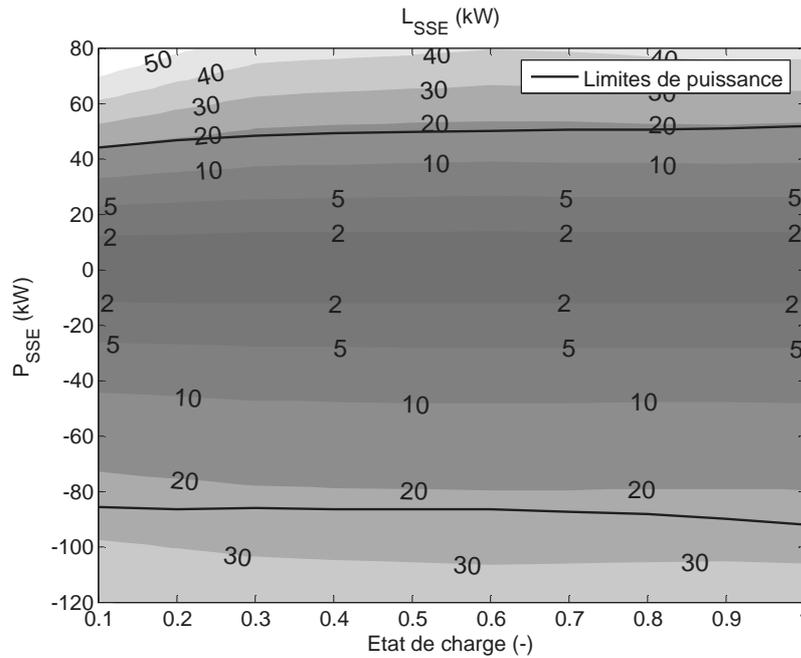


Figure 6-13 : Pertes de la source secondaire.

L'exemple de la figure 6-14 illustre les résultats obtenus avec LMS pour la configuration du véhicule retenue. L'état de charge initial est de 60 %, la variation d'état de charge de + 3,1 % et la consommation d'hydrogène de 1,76 kg/100km. Dans cet exemple, la variation d'état de charge reste faible mais elle n'est pas contrôlée ; l'introduction d'une fonction de sensibilité permet de remédier à ce problème.

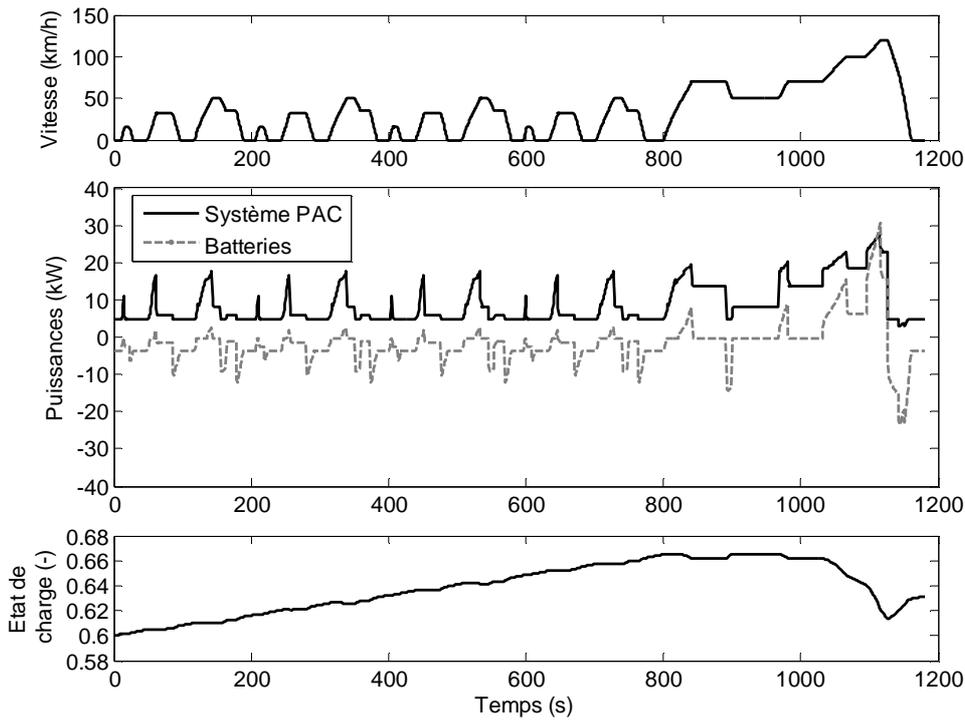


Figure 6-14 : Résultats de la stratégie LMS pour le cycle CEN.

2. Prise en compte de la variation d'état de charge

La sensibilité va permettre de modifier les commandes calculées par minimisation des pertes pour maintenir l'état de charge dans ses limites. La sensibilité correspond à la variation des pertes totale sur la variation de la puissance secondaire :

$$S(P_{sysPAC}(k), X(k)) = \begin{cases} 0 & \text{si } P_{sysPAC}(k) = P_{sysPAC}^*(k) \\ \frac{L_{tot}(P_{sysPAC}(k), X(k)) - L_{tot}(P_{sysPAC}^*(k), X(k))}{P_{SSE}(k) - P_{SSE}^*(k)} & \text{sinon} \end{cases} \quad (6.20)$$

avec $P_{sysPAC}^*(k)$ et P_{SSE}^* les solutions obtenues en (6.19)

La sensibilité représente le coût (en termes de variation des pertes) associé à variation de la puissance de la source secondaire d'énergie. Pour maîtriser ce coût (i.e. ces pertes supplémentaires) tout en garantissant un maintien de l'état de charge, une consigne de sensibilité S_{cons} est définie en fonction de la variation d'état de charge ΔX (figure 6-15). La valeur de la variable de décision P_{sysPAC} est choisie en tenant compte de la sensibilité :

$$\forall k \in \{1 \dots N\},$$

$$\exists P_{sysPAC}(k) / S(P_{sysPAC}(k), X(k)) = S_{cons}(\Delta X) \quad (6.21)$$

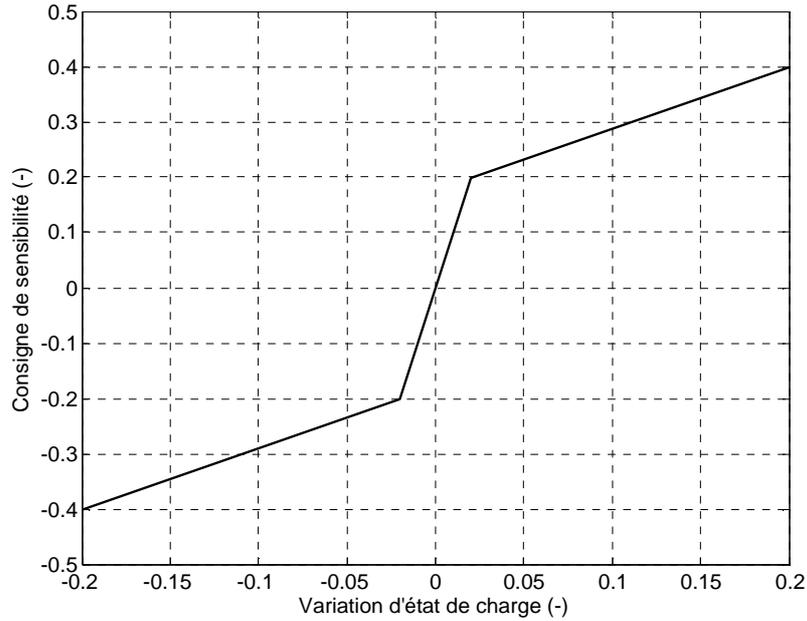


Figure 6-15 : Consigne de sensibilité en fonction de la variation d'état de charge.

Les résultats de la stratégie LMS avec prise en compte de la sensibilité sont présentés à la figure 6-16 pour le cycle CEN. La variation d'état de charge est de $-0,04\%$ et la consommation d'hydrogène de $1,66\text{ kg}/100\text{ km}$. La fonction de sensibilité permet de contrôler l'état de charge, mais son principal défaut est que l'élaboration de la consigne S_{cons} (figure 6-15) reste empirique.

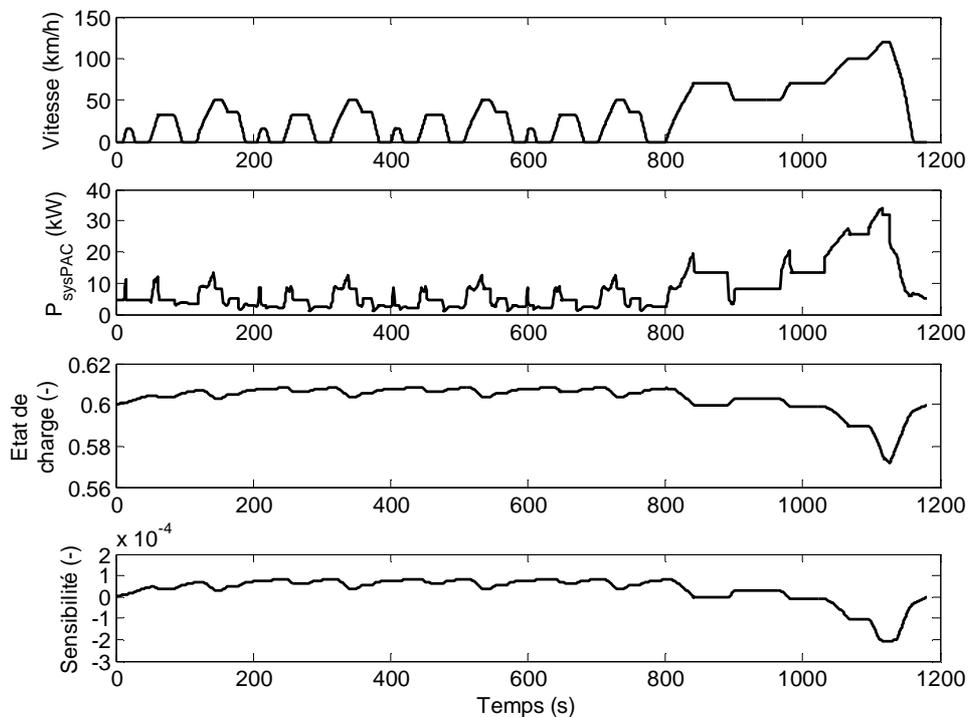


Figure 6-16 : Résultats de la stratégie LMS sur le cycle CEN avec fonction de sensibilité.

Liste des figures

Figure 1-1 : L'expérience de Sir William Grove /ClubPac/.....	14
Figure 1-2 : Technologies des piles à combustible et domaines d'application.	16
Figure 1-3 : Schéma de principe de la pile à combustible PEM.....	18
Figure 1-4 : Exemple d'assemblage d'une cellule élémentaire /Ruge 2003/.....	19
Figure 1-5 : Exemple d'un assemblage de pile à combustible /Ruge 2003/.....	20
Figure 1-6 : Courbe de polarisation classique d'une cellule de pile à combustible PEM.	21
Figure 1-7 : Architecture d'un système à pile à combustible /Boettner et al. 2002/.....	22
Figure 1-8 : Puissances caractéristiques d'un système PAC (puissances brutes, nette et auxiliaires).....	24
Figure 1-9 : Rendements caractéristiques de la PAC et du système PAC.....	24
Figure 1-10 : Exemple d'architecture de groupe motopropulseur à pile à combustible.....	25
Figure 1-11 : Exemple d'architecture de véhicule à pile à combustible hybride.	31
Figure 1-12 : Plan de Ragone /Schneuwly et al. 2002/.....	32
Figure 1-13 : Exemple des puissances mise en jeu en accélération et en maintien de vitesse du véhicule.	34
Figure 1-14 : Stratégies de commande thermostatique et proportionnelle.....	37
Figure 2-1 : Structure des sous-modèles (gauche) et exemple du moteur électrique (droite)	42
Figure 2-2 : Exemples de modèles à flux unique (batterie, à gauche, et véhicule, à droite)	43
Figure 2-3 : Courbe de polarisation et puissance brute d'une cellule	44
Figure 2-4 : Rendement du groupe moto-compresseur en fonction du débit d'air normalisé.....	47
Figure 2-5 : Puissance brute et nette d'une cellule et consommation des auxiliaires.....	47
Figure 2-6 : Courbes de rendement de la pile à combustible et du système.....	49
Figure 2-7 : Consommation instantanée d'hydrogène.....	49
Figure 2-8 : Schéma électrique équivalent d'un élément de batterie.	52
Figure 2-9 : Tension à vide d'un élément de batterie.....	53
Figure 2-10 : Résistance interne d'un élément de batterie.....	53
Figure 2-11 : Schéma électrique équivalent d'un supercondensateur.....	54
Figure 2-12 : Schéma de la chaîne de traction.....	56
Figure 2-13 : Bilan des forces s'exerçant sur le véhicule.....	57
Figure 2-14 : Schéma simplifié du convertisseur de puissance.....	61
Figure 2-15 : Rendement d'un convertisseur de puissance	62
Figure 2-16 : Schéma de puissance du groupe motopropulseur.....	65
Figure 2-17 : Schéma d'un véhicule PAC hybride avec batteries.....	66
Figure 2-18 : Cycle Européen Normalisé.....	67
Figure 2-19 : Exemples de cycle de vitesse réels.....	67
Figure 2-20 : Cartographie de rendement de la machine électrique.....	69
Figure 2-21 : Exemple de résultats pour le Cycle CEN.....	70
Figure 3-1 : Schéma énergétique simplifié du groupe motopropulseur.....	76
Figure 3-2 : Cartographie Q pour 200 éléments de batteries Ni-MH.....	77

Figure 3-3 : Cartographie Q pour 200 supercondensateurs.	77
Figure 3-4 : Définition de l'espace d'état pour la programmation dynamique.	81
Figure 3-5 : Principe de l'algorithme de programmation dynamique.	82
Figure 3-6 : Cycle de vitesse ECE.	83
Figure 3-7 : Temps de calcul et consommation d'hydrogène en fonction de la précision sur l'état de charge (configuration CV1).	84
Figure 3-8 : Solution obtenue par programmation dynamique (configuration CV2).	85
Figure 3-9 : Cartographie $Q(\cdot)$ pour $P_{SSE} = 30kW$ (haut) et résultat de la dérivée partielle $\frac{\partial \hat{Q}(\cdot)}{\partial X}$ (bas).	88
Figure 3-10 : Solution de la commande optimale avec $\lambda(0) = 1,2 \times 10^{-5}$ (configuration CV2).	90
Figure 3-11 : Solution de la commande optimale avec $\lambda(0) = 2,3 \times 10^{-5}$ (configuration CV2).	90
Figure 3-12 : Variation de l'état de charge et consommation d'hydrogène en fonction de $\lambda(0)$	91
Figure 3-13 : Algorithme de résolution du problème d'optimisation.	92
Figure 3-14 : Solution de la commande optimale pour $\Delta X = 0$ et une précision ε de 0,1 % (configuration CV2).	93
Figure 3-15 : Solution de la commande optimale pour une variation d'état de charge nulle (configuration CV3). La contrainte sur l'état n'est pas considérée dans le problème d'optimisation.	94
Figure 3-16 : Fonction de pénalité $p(X)$	95
Figure 3-17 : Énergie cinétique récupérée et consommation d'hydrogène en fonction de la pondération r (configuration CV3).	97
Figure 3-18 : Solution de la commande optimale pour variation d'état de charge nulle (configuration CV3). La contrainte sur l'état est considérée dans l'algorithme d'optimisation.	98
Figure 3-19 : Comparaison des résultats obtenus avec la programmation dynamique et la commande optimale (configuration CV3).	99
Figure 3-20 : Solution de la commande optimale pour $\Delta X = 0$ pour $T_{10\% \rightarrow 90\%} = 0s$ et $T_{10\% \rightarrow 90\%} = 60s$ (configuration CV2).	101
Figure 3-21 : Consommation d'hydrogène en fonction de la variation globale d'état de charge pour $T_{10\% \rightarrow 90\%} = 0s$ et $T_{10\% \rightarrow 90\%} = 60s$ (configuration CV2).	101
Figure 3-22 : Schéma de principe de la stratégie de commande temps réel basée sur la commande optimale.	103
Figure 3-23 : $\Pi(P_{mot}(k), \hat{\lambda}(0))$ (configuration CV2).	105
Figure 3-24 : Comparaison de la solution optimale des Cas 1 et Cas 2 pour $\lambda(0) = \hat{\lambda}(0) = 1,7595 \times 10^{-5} \Leftrightarrow \Delta X = 0$ (configuration CV2).	107
Figure 3-25 : Variations d'état de charge ΔX en fonction de $\lambda(0)$ pour le Cas 1 et $\hat{\lambda}(0)$ pour le Cas 2 (configuration CV2).	108
Figure 3-26 : Histogramme des demandes de puissance $P_{mot}(k)$	109
Figure 3-27 : Variation d'état de charge ΔX en fonction de $\lambda(0)$ (configuration CV2).	109

Figure 3-28 : Principe de la stratégie λ_{pred}	111
Figure 3-29 : Exemple académique de la stratégie λ_{pred} (configuration CV2 sur cycle répétitif).....	113
Figure 3-30 : Stratégie λ_{pred} et commande optimale pour le cycle CEN (configuration CV2).	114
Figure 4-1 : Domaine D_1 pour les batteries (gauche) et les supercondensateurs (droite).....	120
Figure 4-2 : Temps d'accélération T_{acc} en fonction de la masse de la source de puissance.	120
Figure 4-3 : Domaine D_2 pour les batteries (gauche) et les supercondensateurs (droite).	122
Figure 4-4 : Domaine D pour les batteries (gauche) et les supercondensateurs (droite).	122
Figure 4-5 : Cycles de vitesse considérés.....	124
Figure 4-6 : Grille d'expériences pour l'estimation de la consommation d'hydrogène.	124
Figure 4-7 : Cartographie de consommation d'hydrogène (kg/100km) pour le cycle CEN.....	125
Figure 4-8 : Économie d'hydrogène pour le cycle CEN (batterie, gauche, et supercondensateur, droite).....	126
Figure 4-9 : Économie d'hydrogène pour le cycle urbain UF3 (batterie, gauche, et supercondensateur, droite).	127
Figure 4-10 : Économie d'hydrogène pour le cycle périurbain R3 (batterie, gauche, et supercondensateur, droite).	127
Figure 4-11 : Économie d'hydrogène pour le cycle autoroutier A2 (batterie, gauche, et supercondensateur, droite).	127
Figure 4-12 : Dimensionnements optimaux du système pile à combustible en fonction du cycle de vitesse considéré et de la technologie de la source secondaire d'énergie (batterie ou supercondensateur).	129
Figure 4-13 : Économies d'hydrogène optimale du système pile à combustible en fonction du cycle de vitesse considéré et de la technologie de la source secondaire d'énergie (batterie ou supercondensateur).	130
Figure 4-14 : Le véhicule Hy-Muve.....	131
Figure 4-15 : Architecture de puissance du véhicule Hy-Muve.....	131
Figure 4-16 : Rendement du système pile à combustible (gauche) et consommation instantanée d'hydrogène pour un système de 20kW (droite).	132
Figure 4-17 : Schéma électrique de la source de puissance.	134
Figure 4-18 : Profil de demande de puissance du véhicule	135
Figure 4-19 : Configurations du Hy-Muve étudiées.	136
Figure 4-20 : Profil de demande de puissance final du véhicule.....	138
Figure 4-21 : Consommation d'hydrogène et évaluation des pertes de puissance pour la configuration n°6	139
Figure 5-1 : Le prototype PAC-Car II.....	143
Figure 5-2 : Schéma du groupe motopropulseur de PAC-CAR II.	144
Figure 5-3 : Consommation instantanée d'hydrogène $\dot{m}_{H_2}(F_{traction}, V_{veh})$	145
Figure 5-4 : Résultats de l'optimisation de PAC-Car II (circuit de Nogaro, 7 tours, haut, et 1 tour lancé, bas)...	147
Figure 5-5 : Stratégie de course utilisée sur le circuit de Nogaro.....	148
Figure 5-6 : Profil de vitesse simulé et réel enregistré pendant la course.	148
Figure 5-7 : Illustration de la plateforme expérimentale.	150
Figure 5-8 : Schéma de la plateforme expérimentale.....	151
Figure 5-9 : Illustration du convertisseur de puissance.....	152

Figure 5-10 : Schéma du circuit de puissance du hacheur série.....	152
Figure 5-11 : Réponse à un échelon de courant du convertisseur de puissance.	154
Figure 5-12 : Illustration de PowerPAC.....	155
Figure 5-13 : Courbe de polarisation de la PAC à 50°C.	156
Figure 5-14 : Courbe de polarisation de PowerPAC.	156
Figure 5-15 : Consommation des auxiliaires de PowerPAC.	157
Figure 5-16 : Rendement du système PowerPAC.	157
Figure 5-17 : Illustration de la batterie (haut) et des supercondensateurs (bas) utilisés sur la plateforme d'essais.	158
Figure 5-18 : Tension à vide (gauche) et résistance interne de la batterie (droite) en fonction de l'état de charge.	159
Figure 5-19 : Puissances d'entrée en fonction de la puissance de sortie du convertisseur ($V_{bus} = 16V$).	160
Figure 5-20 : Rendement du convertisseur de puissance.	160
Figure 5-21 : Commande optimale pour la configuration BATT et le cycle R3.	163
Figure 5-22 : Consommation en fonction de la variation d'état de charge pour la commande optimale (Cycle R3, configuration BATT).	164
Figure 5-23 : Commande optimale pour la configuration SC et le cycle UF3.	166
Figure 5-24 : Consommation en fonction de la variation d'état de charge pour la commande optimale (Cycle UF3, configuration SC).	167
Figure 5-25 : Résultats pour λ_{pred} , la configuration BATT et le cycle R3.	169
Figure 5-26 : Résultats pour λ_{pred} , la configuration SC et le cycle R3.	170
Figure 5-27 : Résultats pour LMS , la configuration BATT et le cycle R3.	171
Figure 5-28 : Résultats pour LMS , la configuration SC et le cycle R3.	172
Figure 5-29 : Synthèse des résultats pour la configuration BATT et le cycle R3.	174
Figure 5-30 : Synthèse des résultats pour la configuration BATT et le cycle UF3.	174
Figure 5-31 : Synthèse des résultats pour la configuration SC et le cycle R3.	175
Figure 5-32 : Synthèse des résultats pour la configuration SC et le cycle UF3.	176
Figure 5-33 : Illustration de la limitation de puissance de PowerPAC sur la première partie du cycle R3.....	177
Figure 5-34 : Performances de consommation de la batterie et des supercondensateurs.	178
Figure 5-35 : Énergies cinétiques moyennes récupérées au niveau du bus électrique.	179
Figure 6-1 : Courbe de polarisation d'une cellule de pile à combustible PEM.	198
Figure 6-2 : Tension à vide E et chutes de tensions d'activation v_{act} , ohmique v_{ohm} et de concentration v_{conc} pour une température de fonctionnement de 80 °C et une pression de 2 atm.	201
Figure 6-3 : Courbes de polarisation pour une température de 80 °C et différentes pressions.....	201
Figure 6-4 : Courbes de polarisation pour une pression de 2 atm et différentes températures.....	202
Figure 6-5 : Consommation d'hydrogène pour la Configuration n°1 du Hy-Muve.....	203
Figure 6-6 : Consommation d'hydrogène pour la Configuration n°2 du Hy-Muve.....	204
Figure 6-7 : Consommation d'hydrogène pour la Configuration n°3 du Hy-Muve.....	204
Figure 6-8 : Consommation d'hydrogène pour la Configuration n°4 du Hy-Muve.....	205

Figure 6-9 : Consommation d'hydrogène pour la Configuration n°5 du Hy-Muve.....	205
Figure 6-10 : Définition de l'espace d'état.....	207
Figure 6-11 : Principe de la programmation dynamique.....	208
Figure 6-12 : Pertes du système PAC.....	210
Figure 6-13 : Pertes de la source secondaire.....	211
Figure 6-14 : Résultats de la stratégie LMS pour le cycle CEN.....	212
Figure 6-15 : Consigne de sensibilité en fonction de la variation d'état de charge.....	213
Figure 6-16 : Résultats de la stratégie LMS sur le cycle CEN avec fonction de sensibilité.....	213

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Les principaux types de piles à combustible.....	16
Tableau 1-2 : Exemples de véhicules à pile à combustible.....	28
Tableau 1-3 : Flux énergétiques au sein du groupe motopropulseur.....	30
Tableau 2-1 : Conditions de fonctionnement du système pile à combustible.	43
Tableau 2-2 : Caractéristiques du système PAC.	51
Tableau 2-3 : Caractéristique des éléments de la source secondaire d'énergie.	56
Tableau 2-4 : Caractéristiques du véhicule considéré.	69
Tableau 3-1 : Écarts obtenus par programmation dynamique et commande optimale (configuration CV3).	98
Tableau 4-1 : Caractéristiques électrique d'un élément de batterie.....	133
Tableau 5-1 : Caractéristiques principales du prototype PAC-Car II.....	143
Tableau 5-2 : Écarts entre mesures et simulation pour la configuration BATT et le cycle R3.	164
Tableau 5-3 : Moyennes des écarts entre mesures et simulation pour la configuration SC et le cycle UF3.	165
Tableau 5-4 : Paramètres des stratégies λ_{pred} et <i>LMS</i>	168

Véhicules hybrides à pile à combustible : dimensionnement et stratégies de commande.

La pile à combustible (PAC) produit de l'énergie électrique à partir d'hydrogène et d'oxygène sans rejets de polluants. Son utilisation dans le secteur automobile est donc envisagée à long terme pour répondre au problème de mobilité durable.

Dans un véhicule hybride à PAC, la motorisation électrique est alimentée par une pile à combustible assistée par une source secondaire d'énergie (SSE). Cette source secondaire d'énergie est composée soit de batteries, soit de supercondensateurs. L'architecture hybride obtenue offre un degré de liberté dans la gestion des flux énergétiques et dans le dimensionnement du groupe motopropulseur.

La répartition de puissance optimale entre la PAC et la SSE est obtenue grâce à des algorithmes d'optimisation globale qui minimisent la consommation d'hydrogène pour un parcours routier connu a priori. Les résultats obtenus avec ces algorithmes servent d'expertise et de référence de consommation mais sont inapplicables en temps réel. Ici, une stratégie de commande temps réel, nécessairement sous-optimale, a été construite à partir l'algorithme de commande optimale.

La consommation d'hydrogène est également influencée par le dimensionnement de la PAC et de la SSE. Celui-ci doit garantir un confort de conduite acceptable (vitesses, accélérations) sans pénaliser les performances énergétiques du véhicule ; un outil d'aide au dimensionnement est nécessaire et proposé dans ce mémoire.

Enfin, les approches théoriques développées dans cette thèse sont illustrées par des mises en applications sur des exemples concrets (prototype PAC-Car II, prototype Hy-Muve, banc d'essai).

Fuel Cell Hybrid Vehicles : powertrain sizing and power management strategies.

A fuel cell consumes hydrogen and oxygen to produce clean electric energy. The only by-products are water and heat. Therefore fuel cell vehicles are considered for the long term sustainable mobility.

In a fuel cell hybrid vehicle (FCHV), the electric powertrain is powered by a fuel cell system (FCS) and an energy storage system (ESS). This energy storage system can be either batteries or supercapacitors. The hybrid architecture allows defining power management strategies and offers opportunities in the powertrain sizing.

Global optimisation algorithms provide a power split between the FCS and the ESS which minimizes the hydrogen consumption for a priori known driving cycles. The optimal results obtained cannot be used in real time application but they define benchmarks for control strategies evaluation. In this thesis, a sub-optimal real time strategy is proposed based on the optimal control algorithm.

The hydrogen consumption also relies on the powertrain sizing. The FCS and ESS sizes should respect the vehicle dynamic capabilities (speed, acceleration) without penalizing the energetic aspects. A sizing tool which helps in the powertrain design is proposed.

Finally in this thesis, the theoretical approaches concerning control strategies and sizing procedures are illustrated and validated by real applications (PAC-Car II prototype, Hy-Muve prototype, test bench).