

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉE À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE
M. Ing.

PAR
Ernesto VILCHEZ YNCA

ÉTUDE COMPARATIVE D'ALGORITHMES DE GESTION DE L'ÉNERGIE
POUR UN VÉHICULE HYBRIDE À PILE À HYDROGÈNE

MONTREAL, LE 18 NOVEMBRE 2014



Ernesto Vilchez Ynca, 2014



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Louis-A. Dessaint, directeur du mémoire
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

M. Roger Champagne, président du jury
Département de génie logiciel et des TI de l'École de technologie supérieure

M. Souleman Njoya Motapon, examinateur externe
Xzerex Wind

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 31 OCTOBRE 2014

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

AVANT-PROPOS

Le présent document est le résultat du travail que j'ai réalisé au cours de mes études de maîtrise en génie électrique à l'École de Technologie Supérieure (ÉTS). La thématique développée est la conception des algorithmes de gestion de l'énergie pour un système hybride basé sur une pile à hydrogène.

Le travail a été effectué dans le cadre du projet de développement d'une source d'alimentation hybride constituée par une pile à hydrogène et des batteries et des supercondensateurs qui remplacera le système électrique de secours basé sur une éolienne utilisée actuellement dans les avions. Ce projet est mené en partenariat avec l'École de Technologie Supérieure et Bombardier Aéronautique.

Le projet m'a été présenté à l'été 2012 au début de mes études de maîtrise et j'ai accepté d'y participer.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier sincèrement le Dr. Louis-A. Dessaint pour l'opportunité qu'il m'a accordée de participer dans les deux projets qu'il a dirigés à l'ÉTS et de réaliser le travail qui fait l'objet de recherche du présent mémoire. De plus, je le remercie pour le support financier pendant mes études de maîtrise à l'ÉTS. Ce sont les premiers travaux que j'ai faits depuis mon arrivée au Canada. J'espère avoir répondu à la confiance accordée et avoir été à la hauteur de la tâche assignée.

Je tiens à remercier aussi le Dr. Souleman Njoya Motapon pour ses réponses aux questions que je lui ai posées et pour les conseils qu'il m'a donnés pendant la réalisation de mon mémoire.

J'aimerais également remercier Amel Zerigui, étudiante de doctorat à l'ÉTS, à qui je serai toujours reconnaissant pour la recommandation auprès du Dr. Dessaint pour faire partie de son groupe de recherche et pour les conversations que l'on a entretenues pendant les pauses occasionnelles dans nos travaux respectifs dans le bureau que nous partageons.

Finalement, je veux souligner aussi le soutien de mes parents. C'est l'amour pour eux qui me fait toujours persévérer et surmonter toutes les difficultés. Je leur dois tout ce que je suis maintenant. Même s'ils n'ont pas eu l'opportunité de recevoir une éducation formelle, ils se sont toujours efforcés de m'en procurer une en voyant l'amour que j'éprouvais pour les livres et la connaissance. Ils me manquent beaucoup. Nous nous sommes séparés temporairement et j'espère les amener un jour ici avec moi.

ÉTUDE COMPARATIVE D'ALGORITHMES DE GESTION DE L'ÉNERGIE POUR UN VÉHICULE HYBRIDE À PILE À HYDROGÈNE

Ernesto VILCHEZ YNCA

RÉSUMÉ

Ce mémoire réalise une étude comparative des algorithmes de gestion de l'énergie développés pour un véhicule hybride qui a comme sources d'énergie une pile à combustible à hydrogène et une source auxiliaire utilisée comme élément de stockage d'énergie. La caractéristique désirée par les algorithmes développés est d'optimiser la distribution d'énergie entre les sources afin de minimiser la consommation de l'hydrogène de la pile à combustible lors d'un cycle de conduite, en respectant les contraintes de limites de puissance de la PAC et de l'état de charge de la source auxiliaire. De plus, le bilan d'énergie de la source auxiliaire doit être nul à la fin du cycle de conduite.

Un modèle d'un véhicule hybride a été construit au moyen des boîtes à outils SimDriveline et SimPowerSystems du logiciel Matlab/Simulink. Des algorithmes basés sur des règles et sur une optimisation ont été mis au point. Ils sont les suivants : l'algorithme thermostat, l'algorithme proportionnel intégral, l'algorithme de rendement maximal, l'algorithme de logique floue, l'algorithme d'optimisation globale par hybridation des méthodes stochastiques et déterministes, et l'algorithme de minimisation de la consommation équivalente.

Les performances des algorithmes sont évaluées sur trois profils de conduite de courte et longue durée.

Mots Clés : véhicule hybride, pile à combustible, algorithmes de gestion de l'énergie, SimDriveline, SimPowerSystems.

A COMPARATIVE STUDY OF ENERGY MANAGEMENT STRATEGIES FOR A FUEL CELL HYBRID ELECTRIC VEHICLE

Ernesto VILCHEZ YNCA

ABSTRACT

This thesis compares energy management strategies implemented for a hybrid electric vehicle powered by a fuel cell and an energy-storage system. The main goal of these strategies is to control the power flow between the two energy sources in order to minimize the hydrogen consumption of the fuel cell during a driving cycle, while fulfilling the constraints of fuel cell power and state of charge of the energy-storage system. Also, the state of charge at the end of the driving cycle needs to be the same as the one at the beginning.

Using SimDriveline and SimPowerSystems toolboxes of Matlab/Simulink, a simulation model for the fuel cell hybrid vehicle has been built. Rule-based and optimization-based strategies have been implemented. They are the followings: The thermostat strategy, the proportional integral strategy, the maximal efficiency strategy, the global optimization based on hybridization of stochastic and deterministic methods, and the equivalent consumption minimization strategy.

The strategies are tested with three driving cycles of short and long duration.

Keywords: Hybrid vehicles, Fuel Cell, Energy management strategies, SimDriveline, SimPowerSystems.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	5
1.1 Véhicules conventionnels, véhicules électriques (EV) et véhicules électriques hybrides (HEV).....	5
1.1.1 Véhicule électrique hybride série (SHEV).....	5
1.1.2 Véhicule électrique hybride parallèle (PHEV)	7
1.1.3 Véhicule électrique hybride série-parallèle (SPHEV)	7
1.2 Véhicule électrique hybride à pile à combustible (FCHEV)	7
1.3 Composantes du véhicule électrique hybride à pile à combustible (FCHEV).....	9
1.3.1 La pile à combustible (PAC).....	9
1.3.1.1 Les pertes dans la PAC	21
1.3.1.2 Rendements de la PAC	22
1.3.1.3 Résumé de formules.....	25
1.3.2 L'élément de stockage d'énergie (ES)	27
1.3.2.1 La batterie	28
1.3.2.2 Le supercondensateur (SC)	30
1.3.3 Le véhicule et son groupe motopropulseur	32
1.3.3.1 Le système de propulsion (le moteur électrique)	32
1.3.3.2 Le véhicule.....	33
1.3.3.3 La transmission mécanique.....	37
1.3.3.4 Les roues	37
1.3.4 Les convertisseurs de puissance	38
1.4 Les profils de conduite.....	39
1.5 Les outils de simulation	40
1.5.1 Le logiciel ADVISOR.....	40
1.5.2 Matlab/Simulink.....	42
1.6 Simulations vers l'arrière (<i>backward-facing</i>) et vers l'avant (<i>forward-facing</i>).....	44
1.7 Mode de maintien de charge (<i>charge sustaining</i>) et d'épuisement de charge (<i>charge depleting</i>)	45
1.8 Conclusions.....	45
CHAPITRE 2 MODÉLISATION D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE À PAC	47
2.1 Caractéristiques du véhicule	47
2.2 Dimensionnement de la pile à combustible et de l'élément de stockage.....	49
2.3 Modélisation en Matlab/Simulink.....	62
2.4 Conclusions.....	73
CHAPITRE 3 ALGORITHMES DE GESTION DE L'ÉNERGIE	75
3.1 Algorithmes basés sur des règles déterministes.....	83
3.1.1 Thermostat.....	83

3.1.2	Stratégie utilisant des régulateurs classiques (PI)	87
3.1.3	Stratégie de rendement maximal	90
3.2	Algorithmes basés sur des règles de logique floue	93
3.3	Conclusions	98
CHAPITRE 4 ALGORITHMES À BASE D'OPTIMISATION		101
4.1	L'optimisation globale	101
4.1.1	Optimisation par hybridation des méthodes stochastiques et déterministes	102
4.2	Optimisation en temps réel (<i>on line optimisation</i>)	105
4.2.1	Stratégie de minimisation de la consommation équivalente (ECMS) ...	105
4.3	Conclusions	112
CHAPITRE 5 SIMULATIONS SUR UN PROFIL DE CONDUITE DE LONGUE DURÉE		115
5.1	Simulations avec le profil de conduite UDDSx2	116
5.2	Simulations avec le profil de conduite US6	120
5.3	Conclusions	124
CONCLUSIONS		127
RECOMMANDATIONS		131
ANNEXE I ALGORITHMES		133
BIBLIOGRAPHIE		151

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Pouvoir calorifique moyen de quelques combustibles9
Tableau 1.2	Types de pile à combustible 11
Tableau 1.3	Pouvoirs calorifiques de l'hydrogène.....23
Tableau 2.1	Spécifications du design du véhicule.....48
Tableau 2.2	Paramètres de performance du véhicule48
Tableau 2.3	Caractéristiques du système de batteries58
Tableau 2.4	Caractéristiques du système de SC59
Tableau 2.5	Paramètres de la pile à combustible60
Tableau 3.1	Constantes et formules utilisées pour l'exécution des simulations82
Tableau 3.2	Résultats des simulations des algorithmes à base de règles (Profil de conduite de 60 secondes).....98
Tableau 4.1	Résultats des simulations des algorithmes à base de règles et à base d'optimisation (Profil de conduite de 60 secondes)113
Tableau 5.1	Résultats obtenus des simulations avec le profil de conduite UDDSx2 de 2 739 secondes120
Tableau 5.2	Résultats obtenus des simulations avec le profil de conduite US6 de 600 secondes.....124
Tableau 5.3	Tableau comparatif de la consommation et de l'économie de combustible obtenues avec les algorithmes125
Tableau 5.4	Tableau comparatif des caractéristiques des algorithmes PI, de logique floue et ECMS126

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1 Architecture d'un véhicule conventionnel (a) et d'un véhicule électrique EV (b)	6
Figure 1.2 Architecture d'un véhicule électrique hybride série (a), parallèle (b) et série-parallèle (c).....	8
Figure 1.3 Schéma du fonctionnement d'une pile à combustible.....	10
Figure 1.4 Schéma d'un générateur à PAC.....	12
Figure 1.5 Diagramme de Ragone	28
Figure 1.6 Schéma électrique du supercondensateur	30
Figure 1.7 Schéma de la chaîne de traction	32
Figure 1.8 Caractéristiques couple-vitesse (a) d'un moteur électrique (b) d'un moteur à combustion avec système d'engrenages à 4 rapports.....	33
Figure 1.9 Dynamique du véhicule	33
Figure 1.10 Efforts et vitesses angulaire et longitudinale sur une roue	38
Figure 1.11 Architecture électrique du véhicule avec un convertisseur CC/CC pour chaque source d'énergie	39
Figure 1.12 Graphiques des profils de conduite US6, HWFET, UDDS et NEDC.....	40
Figure 1.13 Schéma d'un véhicule à PAC plus élément de stockage développé en ADVISOR	41
Figure 1.14 Librairie <i>Extra Sources</i> de SimPowerSystems.....	43
Figure 1.15 Bibliothèques de SimDriveline première génération	43
Figure 1.16 Blocs de SimDriveline utilisés pour la modélisation du système de transmission et du châssis.....	44
Figure 2.1 Puissance du moteur vs temps d'accélération et vs vitesse constante	51
Figure 2.2 Graphiques de puissance et d'énergie pour les profils de conduite US6, urbaine (UDDS) et d'auto route (HWFET)	52

Figure 2.3	Spécifications du supercondensateur.....	53
Figure 2.4	Spécifications de la batterie.....	54
Figure 2.5	Courbe de polarisation (V_{PAC} vs I_{PAC}) et courbes de puissance brute et nette	61
Figure 2.6	Rendement total et global de la PAC en fonction de la puissance	61
Figure 2.7	Le schéma d'un véhicule à traction arrière.....	62
Figure 2.8	Modélisation du système « Transmission et Châssis » en Simulink	63
Figure 2.9	Résultats de la simulation du système de la figure 2.8.....	64
Figure 2.10	Modélisation du moteur électrique.....	65
Figure 2.11	Modèle du conducteur	66
Figure 2.12	Boîte de dialogue du bloc « <i>Fuel Cell Stack</i> » (PAC de 100 kW)	68
Figure 2.13	Courbes de polarisation (V_{PAC} vs I_{PAC}) et de puissance générées par le bloc « <i>Fuel Cell Stack</i> » (PAC de 100 kW).....	68
Figure 2.14	Modélisation du générateur à PAC (GPAC) dans Simulink	69
Figure 2.15	Courbe de polarisation (V_{PAC} vs I_{PAC}) et courbes de puissances (Générateur à PAC de 100 kW).....	70
Figure 2.16	Modélisation d'un véhicule à PAC (FCV)	70
Figure 2.17	Modélisation de la résistance de freinage.....	71
Figure 2.18	Puissances mécanique et électrique (simulation du FCV)	72
Figure 2.19	Puissances de la charge, de la PAC et de la résistance de freinage (simulation du FCV).....	72
Figure 2.20	Profil de conduite, rendement et consommation de la PAC (simulation du FCV).....	73
Figure 3.1	Modèle du véhicule hybride à PAC (FCHEV).....	75
Figure 3.2	Boîte de dialogue du bloc « <i>Supercapacitor</i> » de SPS	76
Figure 3.3	Modèle de la résistance de freinage.....	77

Figure 3.4	Boîte de dialogue du bloc « <i>Fuel Cell Stack</i> » de SPS	78
Figure 3.5	Courbe de polarisation (V_{PAC} vs I_{PAC}) et courbes de puissances (GPAC de 50 kW)	78
Figure 3.6	Courbes de rendement (GPAC de 50 kW)	79
Figure 3.7	Courbe de courant net en fonction de la puissance (GPAC de 50 kW)	79
Figure 3.8	Courbe de consommation de H2 en fonction de la puissance (GPAC de 50 kW)	80
Figure 3.9	Profil de vitesse et puissance électrique (Cycle Test60s).....	81
Figure 3.10	Stratégie de contrôle « thermostat »	83
Figure 3.11	Diagramme Stateflow dans le bloc « <i>chart</i> » (Stratégie « thermostat »)	84
Figure 3.12	Graphique de puissances pour une charge de forte dynamique (Stratégie « thermostat »)	85
Figure 3.13	État de charge du SC pour une charge de forte dynamique (Stratégie « thermostat »)	85
Figure 3.14	Graphique de puissances pour un profil de conduite de 60 secondes (Stratégie « thermostat »)	86
Figure 3.15	SOC, Rendement, Consommation pour un profil de conduite de 60 secondes (Stratégie « thermostat »)	86
Figure 3.16	Stratégie de contrôle PI	87
Figure 3.17	Schéma du convertisseur de la PAC.....	88
Figure 3.18	Graphique de puissances pour un profil de conduite de 60 secondes (Stratégie PI).....	89
Figure 3.19	SOC, Rendement, Consommation pour un profil de conduite de 60 secondes (Stratégie PI)	89
Figure 3.20	Stratégie de contrôle « rendement maximal »	90
Figure 3.21	Diagramme Stateflow dans le bloc <i>chart</i> (Stratégie « rendement maximal »)	91

Figure 3.22	Variation du rendement de la PAC (points en rouge) autour du point de rendement maximal (Stratégie « rendement maximal »).....	91
Figure 3.23	Graphique de puissances pour un profil de conduite de 60 secondes (Stratégie « rendement maximal »)	92
Figure 3.24	SOC, Rendement, Consommation pour un profil de conduite de 60 secondes (Stratégie « rendement maximal »).....	92
Figure 3.25	Stratégie de contrôle de logique floue	94
Figure 3.26	Zones de fonctionnement du GPAC pour déterminer les fonctions d'appartenance de la variable de sortie PFC	94
Figure 3.27	Fonctions d'appartenance de la variable d'entrée SOC (Éditeur de fichiers FIS)	95
Figure 3.28	Fonctions d'appartenance de la variable de sortie PFC (Éditeur de fichiers FIS)	95
Figure 3.29	Définition des règles (Éditeur de fichiers FIS).....	96
Figure 3.30	Configurations additionnelles (éditeur de fichiers FIS)	96
Figure 3.31	Graphique de puissances pour un profil de conduite de 60 secondes (Stratégie de logique floue)	97
Figure 3.32	SOC, Rendement, Consommation pour un profil de conduite de 60 secondes (Stratégie de logique floue).....	97
Figure 4.1	Fenêtre de l'outil d'optimisation (commande optimtool).....	103
Figure 4.2	Stratégie d'optimisation globale.....	103
Figure 4.3	Graphique de puissances pour un profil de conduite de 60 secondes (Stratégie d'optimisation globale)	104
Figure 4.4	SOC, Rendement, Consommation pour un profil de conduite de 60 secondes (Stratégie d'optimisation globale).....	104
Figure 4.5	Modèle Simulink pour le calcul de la consommation équivalente totale.....	107
Figure 4.6	Consommation Équivalente Totale et Puissance du GPAC pour $SOC = 70\%$ et $P_{Load} = 17kW$ ($P_{PAC_optimale} = 45kW$).....	108

Figure 4.7	Consommation Équivalente Totale et Puissance du GPAC pour $SOC = 86.5\%$ et $P_{Load} = 17kW$ ($P_{PAC_optimale} = 8kW$)	108
Figure 4.8	Stratégie de contrôle ECMS	109
Figure 4.9	Diagramme Stateflow dans le bloc « <i>chart</i> » (Stratégie de contrôle ECMS)	110
Figure 4.10	Graphique de la table de recherche pour le calcul du facteur de pondération	110
Figure 4.11	Graphique de puissances pour un profil de conduite de 60 secondes (Stratégie de contrôle ECMS)	111
Figure 4.12	SOC, Rendement, Consommation pour un profil de conduite de 60 secondes (Stratégie de contrôle ECMS)	111
Figure 5.1	Profil de conduite UDDSx2 et puissance électrique	115
Figure 5.2	Profil de conduite US6 et puissance électrique	116
Figure 5.3	Rendement et Consommation_Profil de conduite UDDSx2 (Véhicule à PAC sans ES)	116
Figure 5.4	Graphique de puissances_Profil de conduite UDDSx2 (Stratégie PI)	117
Figure 5.5	SOC, Rendement, Consommation_Profil de conduite UDDSx2 (Stratégie PI)	117
Figure 5.6	Graphique de puissances_Profil de conduite UDDSx2 (Stratégie de logique floue)	118
Figure 5.7	SOC, Rendement, Consommation_Profil de conduite UDDSx2 (Stratégie de logique floue)	118
Figure 5.8	Graphique de puissances_Profil de conduite UDDSx2 (Stratégie de contrôle ECMS)	119
Figure 5.9	SOC, Rendement, Consommation_Profil de conduite UDDSx2 (Stratégie de contrôle ECMS)	119
Figure 5.10	Rendement et Consommation_Profil de conduite US6 (Véhicule à PAC sans ES)	120
Figure 5.11	Graphique de puissances_Profil de conduite US6 (Stratégie PI)	121

Figure 5.12	SOC, Rendement, Consommation_Profil de conduite US6 (Stratégie PI).....	121
Figure 5.13	Graphique de puissances_Profil de conduite US6 (Stratégie de logique floue)	122
Figure 5.14	SOC, Rendement, Consommation_Profil de conduite US6 (Stratégie de logique floue)	122
Figure 5.15	Graphique de puissances_Profil de conduite US6 (Stratégie de contrôle ECMS)	123
Figure 5.16	SOC, Rendement, Consommation_Profil de conduite US6 (Stratégie de contrôle ECMS)	123

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ADVISOR	Ad vanced VehI cle SimulatOR
BUS CC	Bus de courant continu
CA	Courant Alternatif
CC	Courant Continu
CNTP	Conditions Normales de Température et de Pression (25 °C et 1 atm)
DOD	Depth of Discharge
DOE	Département de l'énergie des États-Unis
ECMS	Stratégie de minimisation de la consommation équivalente
ES	Élément de stockage
EV	Véhicule Électrique
FCHEV	Véhicule Électrique Hybride à Pile à Combustible
FCV	Véhicule à Pile à Combustible
FIS	Fuzzy Inference System
GPAC	Générateur à Pile à Combustible
GPIB	General Purpose Interface Bus
HEV	Véhicule Électrique Hybride
HWFET	Cycle de conduite d'autoroute (HighWay Fuel Economy Test)
ICE	Moteur à combustion interne
Li-Ion	Lithium-Ion
LPM	Litres par minute
MPPT	Maximum power point tracking

XXIV

Ni-Cd	Nickel-Cadmium
Ni-MH	Nickel-Metal Hydride
NREL	National Renewable Energy Laboratory
PAC	Pile à Combustible
PCI	Pouvoir calorifique inférieur
PCS	Pouvoir calorifique supérieur
PEM	Membrane Échangeuse de Protons
PHEV	Véhicule Électrique Hybride Parallèle
RPM	Tours par minute
SC	Supercondensateur
SHEV	Véhicule Électrique Hybride Série
SOC	State of charge
SPHEV	Véhicule Électrique Hybride Série-Parallèle
UDDS	Cycle de conduite urbaine (Urban Dynamometer Driving Schedule)

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

W_e	Travail maximal électrique que la PAC peut fournir
ΔG	Énergie libre de Gibbs
ΔG^0	Énergie libre de Gibbs dans les conditions CNTP
ΔG_T^0	Énergie libre de Gibbs dans les conditions CNTP à la température T
E	Tension nominale théorique de la PAC donnée par l'équation de Nerst
E^0	Tension nominale théorique de la PAC aux conditions CNTP (1,229Volts)
E_T^0	Tension nominale théorique de la PAC dans les conditions CNTP à la température T
z	Nombre de moles d'électrons
F	Constante de Faraday ($F = 96400 \text{ Coulombs / mol } e^-$)
R	Constante idéale des gaz = 8.3145 J/mol.K
p_{H_2}	Pression partielle de l'hydrogène
p_{O_2}	Pression partielle de l'oxygène
p_{H_2O}	Pression partielle de l'eau
T_0	Température standard (25 °C), en Kelvin (298 K)
ΔS^0	Changement d'entropie dans les conditions CNTP (-164 J/mol.K)
$N_{\text{moles de } H_2}^r$	Nombre de moles de H_2 qui réagissent dans l'anode
Q	Charge transférée par $N_{\text{moles de } H_2}^r$
$q_{H_2}^r$	Débit molaire en mol/s
I_{PAC}	Courant de la PAC
$W_{H_2}^r [\text{kg/s}]$	Débit massique en kg/s
$W_{H_2}^{in} [\text{lpm}]$	Débit massique en lpm
m_{H_2}	Masse molaire de H_2 ($2.02 \times 10^{-3} \text{ Kg/mol}$)

$q_{H_2}^{in}$	Débit molaire à l'entrée de la vanne (mol/s)
$q_{H_2}^{out}$	Débit molaire à la sortie de la vanne (mol/s)
$q_{H_2}^r$	Débit molaire qui réagit dans la vanne (mol/s)
$x\%$	Concentration d'hydrogène dans le combustible
$y\%$	Concentration d'oxygène dans l'air
Uf_{H_2}	Utilisation d'hydrogène
Uf_{O_2}	Utilisation d'oxygène
p_{fuel}	Pression du combustible
p_{air}	Pression de l'air fourni par le compresseur
V_{PAC_1cell}	Tension réelle d'une seule cellule de la PAC
V_{PAC}	Tension de la PAC (N_c cellules)
ΔV_{act}	Pertes d'activation
ΔV_r	Pertes ohmiques
r	Résistance interne de la PAC (Ω)
ΔH	Enthalpie de formation ou pouvoir calorifique
V_{n_1bat}	Tension nominale d'un module de batteries
η_{th}	Rendement théorique de la PAC
η_v	Rendement tension de la PAC
η_{mat}	Rendement matière de la PAC
η_{syst}	Rendement système de la PAC
η_{global}	Rendement global de la PAC
η_F	Rendement faradique de la PAC
η_{tot}	Rendement total de la PAC
C_{bat}	La capacité de la batterie
E_{bat}	Énergie stockée par la batterie

$E_{utilisable_bat}$	Énergie utilisable par la batterie
E_{totale_bat}	Énergie totale de la batterie
C_{sc}	Capacité du SC [F]
V_0	Tension à vide du supercondensateur [V]
E_{sc}	Énergie stockée par le supercondensateur
E_{sc_max}	Énergie maximale qui peut être stockée dans le SC
$E_{utilisable_sc}$	Énergie utilisable par le SC
F_d	Force à la résistance de l'air sur le véhicule
F_r	Force de résistance totale des roues sur le sol
V_w	Composante de la vitesse du vent en la direction du mouvement
V_f	Vitesse finale du véhicule
V_b	Vitesse de base du moteur électrique
P_{t_a}	La puissance de traction totale pour accélérer le véhicule de zéro jusqu'à la vitesse finale en t_a secondes
P_m	Puissance mécanique du moteur
T_m	Couple du moteur
N_{moteur}	Vitesse du moteur en tours par minute (<i>rpm</i>)
i_g	Rapport de transmission
i_0	Rapport de transmission finale
M_v	Masse totale du véhicule [kg]
g	Accélération de la pesanteur [m/s^2]
f_r	Coefficient de résistance au roulement
C_D	Coefficient de pénétration dans l'air
ρ_a	Masse volumique de l'air [kg/m^3]

A_f	Surface frontale du véhicule [m^2]
r_d	Rayon de la roue [m]
h	Hauteur du CG au-dessus du sol [m]
a	Distance du CG à l'axe des roues avant [m]
b	Distance du CG à l'axe des roues arrière [m]
n_t	Rendement du système de transmission
n_m	Rendement du moteur
δ	Facteur de la masse
V_{max}	Vitesse maximale du véhicule
t_a	Temps d'accélération [s]
i_{max}	Pente maximale [%]
V_{nom_ibat}	Tension nominale d'un module de batteries
N_{bat}	Nombre de modules de batteries connectés en série
V_{bus_CC}	Tension du bus de CC
$Weight_{ibat}$	Poids d'un module de batteries
$E_{spécifique}$	Énergie spécifique [Wh/kg]
$P_{spécifique}$	Puissance spécifique [W/kg]
N_s	Nombre de modules de SC connectés en série
N_p	Nombre de modules de SC connectés en parallèle
$Weight_{lsc}$	Poids d'un module de SC
V_{0min}	Tension à vide minimale du SC
V_{0max}	Tension à vide maximale du SC
P_{CC}	Puissance dans le bus de CC
P_{PAC}	Puissance de la PAC

P_{ES}	Puissance de l'élément de stockage
SOC_{ini}	SOC initial
SOC_{ref}	SOC de référence
SOC_{max}	SOC maximal
SOC_{min}	SOC minimal
V_{BUS_ref}	Tension de référence du bus CC
V_{BUS_min}	Tension minimale du bus CC
V_{BUS_max}	Tension maximale du bus CC
ΔV_{BUS}	Variation de tension du bus CC ($\Delta V_{BUS} = V_{BUS_ref} - V_{BUS_min}$)
Δ_{SOC}	Variation du SOC ($\Delta_{SOC} = SOC_{ref} - SOC_{min}$)
I_{SC_max}	Courant de charge maximal du SC
P_{PAC_max}	Puissance maximale de la PAC

INTRODUCTION

Actuellement, alors que les degrés de pollution de l'air causée par la consommation de combustibles fossiles atteignent des niveaux alarmants, l'utilisation extensive d'une source d'énergie alimentée par un combustible moins polluant est envisagée.

L'hydrogène présente de bonnes caractéristiques pour devenir le combustible du futur telles qu'un haut pouvoir calorifique et une combustion propre sans produire de polluant, mais la technologie des piles à combustible à hydrogène n'est pas encore maîtrisée. En 2014, bien que des voitures et des autobus à hydrogène aient commencé à circuler sur les rues, cette technologie n'est pas encore parfaitement contrôlée. Ainsi, son utilisation sur les avions et sur d'autres applications fait encore l'objet de recherches.

Une pile à combustible (PAC) alimentée par hydrogène est une source d'énergie non polluante qui génère de l'électricité par la réaction chimique de l'hydrogène et l'oxygène. Ceux-ci doivent alimenter de façon continue la PAC afin qu'elle puisse fournir la puissance électrique demandée par une charge. Dans des applications embarquées, l'hydrogène qui alimente la PAC est généralement stocké dans le système alors que l'oxygène est obtenu de l'atmosphère par un compresseur. En raison de la constante de temps mécanique du compresseur, le système PAC est caractérisé par un temps de réponse lent face aux changements de charge et une source d'énergie auxiliaire, telle que les batteries ou les supercondensateurs, est utilisée pour le soutenir dans les besoins d'énergie de la charge.

Le présent mémoire mène une étude comparative des stratégies de commande ou algorithmes qui sont ici développées pour le contrôle de la distribution d'énergie entre la pile à hydrogène et la source d'énergie auxiliaire dans un véhicule hybride à PAC. La caractéristique désirée par les algorithmes à développer est de minimiser la consommation de combustible de la PAC lors d'un parcours du véhicule, en respectant les contraintes de la puissance de la PAC et de l'état de charge de la source auxiliaire. De plus, le bilan d'énergie de la source auxiliaire doit être nul à la fin du parcours.

Cette recherche vise à poursuivre les travaux de recherche sur la pile à hydrogène effectués à l'École de Technologie Supérieure. À l'École de Technologie Supérieure, on a mis sur pied un laboratoire de recherche sur la pile à hydrogène en vue du développement d'un système hybride d'alimentation d'urgence pour les avions. Ce système hybride combine une pile à hydrogène et des éléments de stockage comme une batterie et un supercondensateur et remplacera le système d'urgence électromécanique actuellement disponible dans les avions.

Le mémoire est divisé en 5 chapitres.

Dans le chapitre 1, on détermine les équations mathématiques qui décrivent le comportement de la pile à combustible (PAC), du véhicule et de la source auxiliaire qui servent à construire les modèles de ces dispositifs.

Dans le chapitre 2, les paramètres du véhicule et la performance sollicitée sont établis en vue du dimensionnement du véhicule, de la PAC et de la source auxiliaire. Ensuite, au moyen des équations déterminées dans le chapitre précédent, on procède à réaliser la modélisation des éléments du véhicule. Deux outils de modélisation, ADVISOR et Matlab/Simulink, sont présentés.

Dans le chapitre 3, on présente la mise en œuvre des stratégies de commande à base des règles déterministes et de logique floue. Les stratégies sont évaluées par simulation sur le modèle du véhicule hybride développé et en utilisant un parcours court de 60 secondes. Les résultats des simulations sont présentés sur des graphiques et sur un tableau.

Dans le chapitre 4, on présente la mise en œuvre des stratégies de commande à base d'optimisation. Les stratégies sont évaluées par simulation sur le modèle du véhicule hybride développé et en utilisant un parcours court de 60 secondes. Les résultats des simulations sont présentés sur des graphiques et sur un tableau.

Dans le chapitre 5, on réalise l'évaluation des algorithmes les plus performants des chapitres précédents, cette fois-ci, sur des profils de conduite de longue durée.

Les conclusions finales et les recommandations clôturent le présent mémoire.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Véhicules conventionnels, véhicules électriques (EV) et véhicules électriques hybrides (HEV)

Un véhicule conventionnel avec un moteur à combustion interne (ICE) comme la source de puissance présente un faible rendement, une faible économie de combustible et est hautement polluant. Par contre, un véhicule électrique (EV) propulsé par un accumulateur d'énergie (batteries) et associé à un moteur électrique présente un haut rendement et une pollution environnementale nulle. En plus, l'EV permet la récupération de l'énergie lors de freinages, qui sera stockée dans la batterie. Mais, son autonomie d'opération est courte par rapport à celle des véhicules à combustion du fait de la basse densité d'énergie de la batterie par rapport à celle de l'essence. Afin de profiter de bonnes caractéristiques de ces deux types de véhicules, on construit des véhicules électriques hybrides.

Les véhicules électriques hybrides (HEV) utilisent deux sources d'énergie associées à un moteur électrique, à savoir un moteur à combustion interne (ICE) et un accumulateur d'énergie. Le flux de l'énergie de l'ICE et du moteur électrique vers les roues du véhicule définit le type d'architecture du HEV. Ainsi, il y aura : une architecture série, une architecture parallèle ou une combinaison des deux, c'est-à-dire une architecture série-parallèle (Zhang et Mi, 2011).

1.1.1 Véhicule électrique hybride série (SHEV)

Dans un SHEV, l'ICE et le moteur électrique sont en série et le flux d'énergie est de l'ICE au moteur électrique et de là, vers les roues du véhicule. Donc, c'est le moteur électrique qui donne toute la force de traction pour contrôler le véhicule. Le moteur à combustion interne (ICE), moyennant un générateur électrique, charge la batterie ou donne de la puissance électrique au moteur. Donc, il n'y a aucun lien mécanique entre l'ICE et la transmission ce

que permet de faire travailler l'ICE au rendement maximal en mettant au point sa vitesse et son couple. De plus, le moteur électrique fonctionne comme un générateur lors de freinages permettant la récupération de l'énergie cinétique qui est stockée dans la batterie.

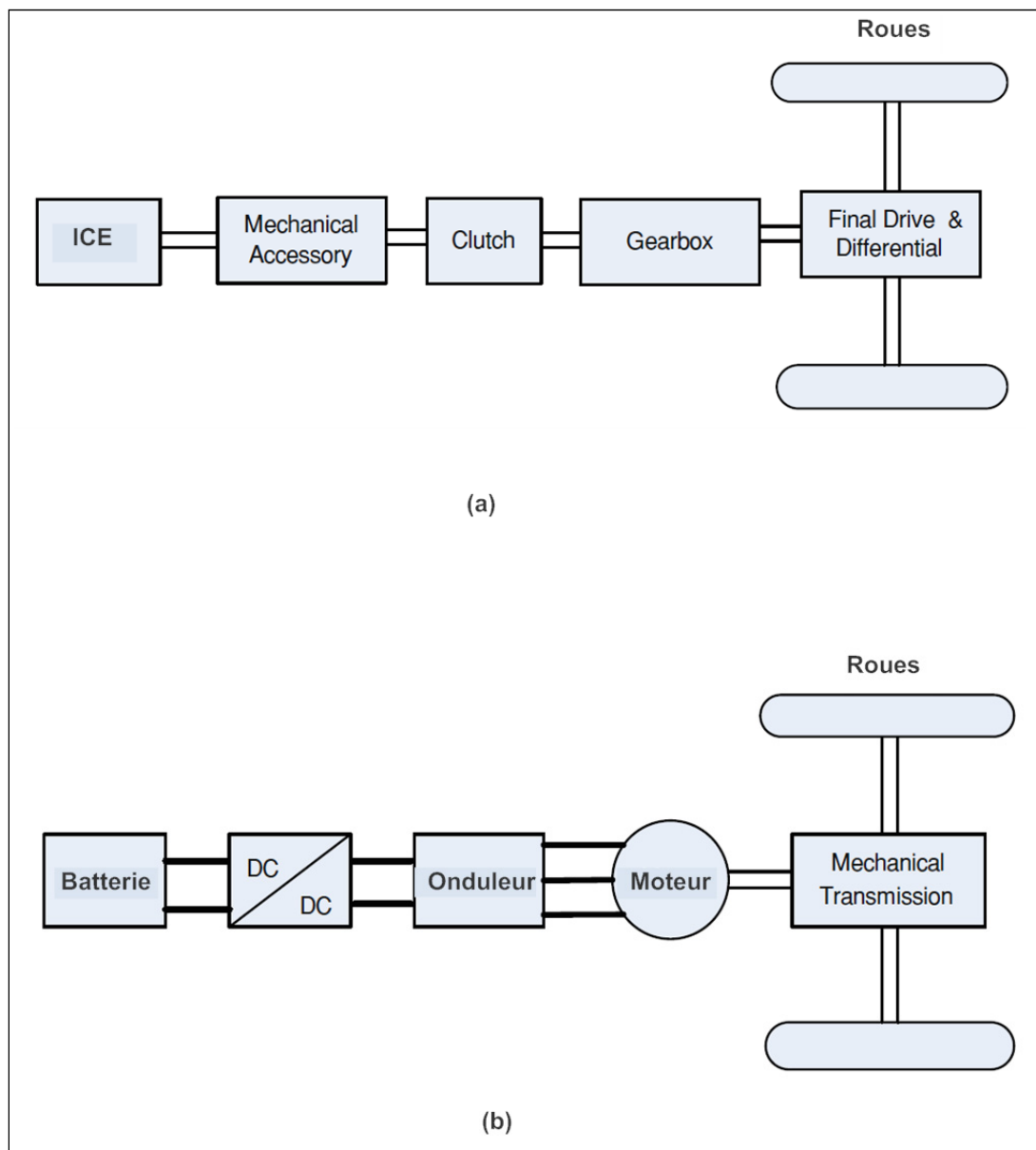


Figure 1.1 Architecture d'un véhicule conventionnel (a)
et d'un véhicule électrique EV (b)
Adaptée de Zhang et Mi (2011, pp. 14, 15)

1.1.2 Véhicule électrique hybride parallèle (PHEV)

Dans un PHEV, l'ICE et le moteur électrique sont en parallèle et branchés à la transmission moyennant un dispositif de couplage mécanique. Dépendant des conditions de conduite, la force de traction pour contrôler le véhicule peut être fournie par le moteur électrique, par l'ICE ou par les deux dispositifs ensemble. Le moteur fonctionne comme générateur lors de freinages pour récupérer de l'énergie. L'ICE charge aussi la batterie par l'intermédiaire du moteur électrique fonctionnant comme générateur, mais, dans ce cas, celui-ci ne peut pas fournir la force de traction parce qu'il lui est impossible d'accomplir les deux fonctions en même temps (cette architecture ne comporte qu'un seul moteur électrique).

1.1.3 Véhicule électrique hybride série-parallèle (SPHEV)

La configuration hybride série parallèle profite des bonnes caractéristiques de chacune des deux architectures précédemment mentionnées. Dans ce cas-ci, le système comporte deux moteurs électriques : un moteur associé à la batterie et un autre associé à l'ICE (voir la figure 1.2 c).

1.2 Véhicule électrique hybride à pile à combustible (FCHEV)

Un véhicule hybride à pile à combustible est caractérisé par la même structure qu'un véhicule hybride série dans laquelle les fonctions du système ICE-générateur électrique sont assurées par une pile à combustible. Alors, cette architecture comporte deux sources d'énergie qui alimentent le moteur électrique : une source d'énergie primaire (la pile à combustible) et une source d'énergie auxiliaire appelée élément de stockage (ES) dans la suite de ce document.

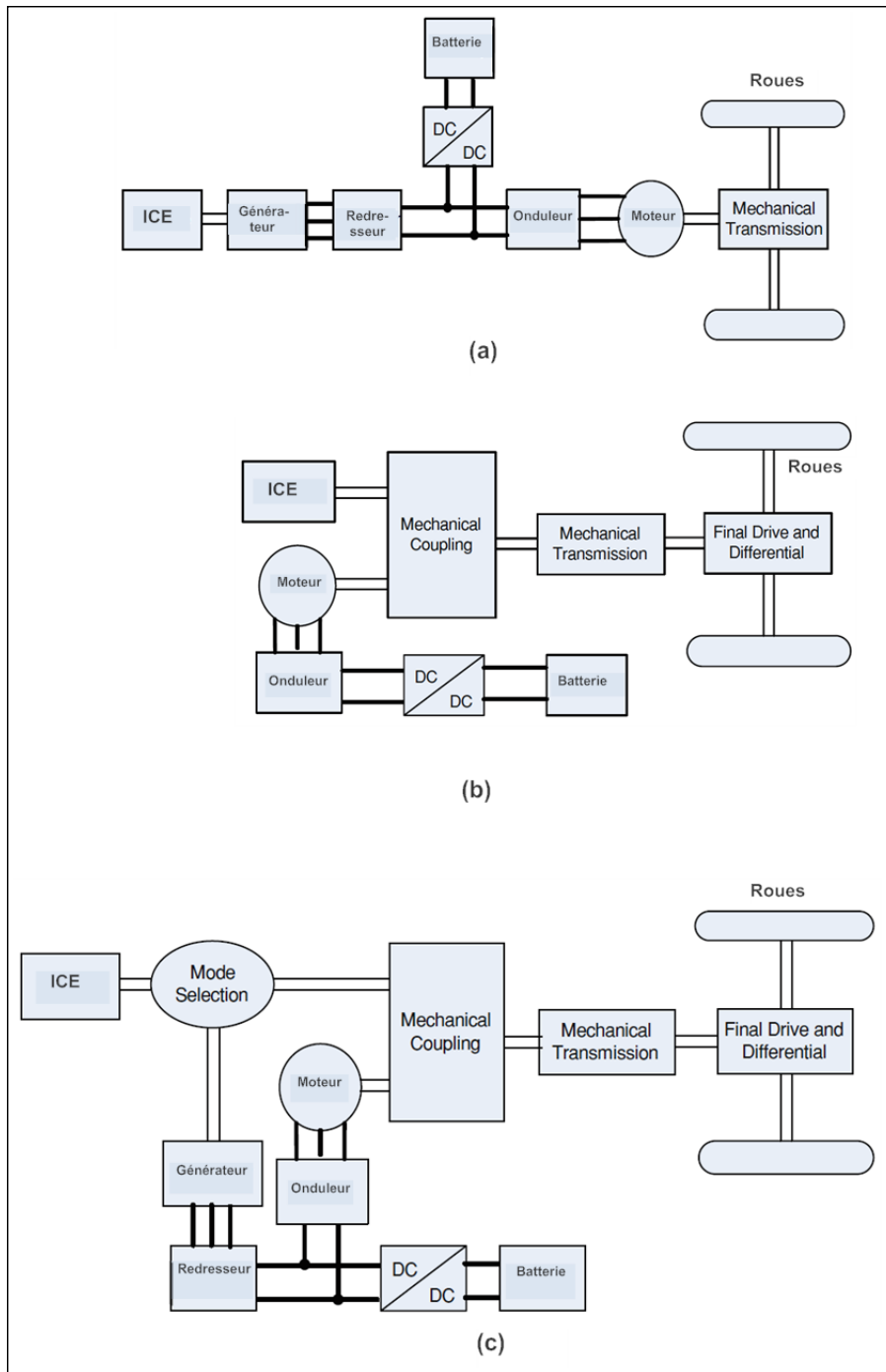


Figure 1.2 Architecture d'un véhicule électrique hybride
série (a), parallèle (b) et série-parallèle (c)
Adaptée de Zhang et Mi (2011, pp. 16-18)

1.3 Composantes du véhicule électrique hybride à pile à combustible (FCHEV)

1.3.1 La pile à combustible (PAC)

À vrai dire, « une pile à combustible est un convertisseur d'énergie et non une source d'énergie. Elle convertit l'énergie d'un combustible (hydrogène) en électricité et en chaleur. » (Blunier et Miraoui, 2009, p. 3). Le produit rejeté résultant de la transformation est de l'eau non polluante, ce qui fait de la PAC une option intéressante pour des applications véhiculaires. De plus, son rendement est de l'ordre de 35 % à 55 % ce qui est supérieur à celui du moteur à combustion (de l'ordre de 20 %). L'hydrogène, qui alimente la PAC, est un combustible avec un haut pouvoir calorifique (voir le tableau 1.1). Mais, il n'existe pas comme gaz à l'état naturel et il faut une procédure de transformation afin de le produire, par exemple : à partir de l'électrolyse de l'eau ou à partir des hydrocarbures ou des alcools). Dans le premier cas, l'énergie électrique requise pour l'électrolyse est trop élevée tandis que dans le deuxième cas, même si les PAC ne sont pas par elles-mêmes polluantes, la production de l'hydrogène pour les alimenter dégage d'importantes quantités de polluants.

Tableau 1.1 Pouvoir calorifique moyen de quelques combustibles
Tiré de Wikipédia (Consulté le 2013)
« http://fr.wikipedia.org/wiki/Pouvoir_calorifique »

Combustible	MJ/kg	kJ/L	kJ/mol
Hydrogène	141,79	12,75	286
Essence	47,3	35 475	4200
Gazole (carburant Diesel)	44,8	38 080	7600
Éthanol	29,7	21 300	1 300
Propane	50,35	---	2 219
Butane	49,51	---	2 800
Bois	15	---	---
Charbon	15-27	---	---

Donc, à la différence des batteries ou accumulateurs qui se suffisent eux-mêmes, les PAC ont besoin d'être alimentées par un combustible (de l'hydrogène) et un carburant (de l'oxygène) afin de produire de l'électricité. Ces éléments devront être stockés près de la PAC ou produits dans le véhicule. L'oxygène est normalement tiré de l'atmosphère par un compresseur tandis que l'hydrogène, sous forme gazeuse, est stocké à une haute pression (de l'ordre de 200 à 700 bars) à cause de sa légèreté (l'hydrogène est l'élément chimique le plus léger du tableau périodique). La figure suivante présente le schéma du fonctionnement d'une PAC.

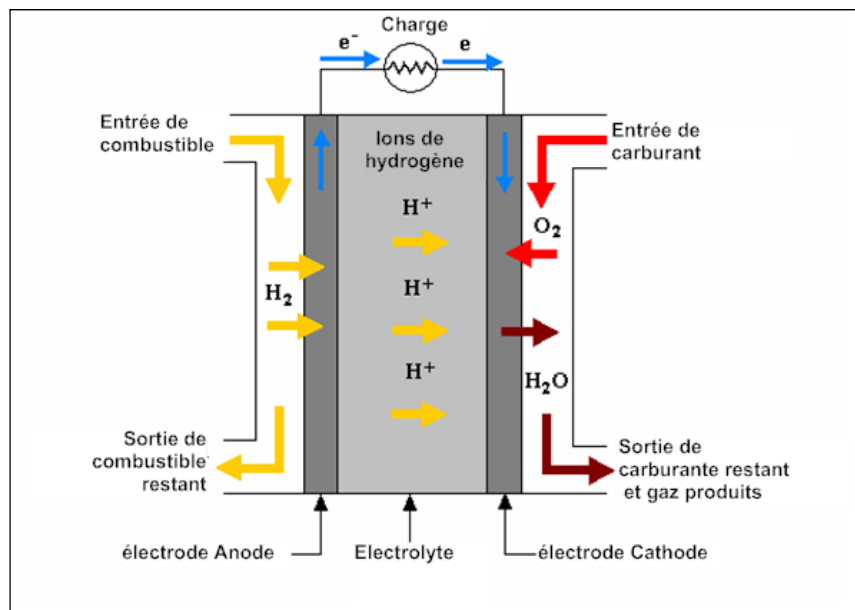


Figure1.3 Schéma du fonctionnement d'une pile à combustible

Adaptée de Wikimedia commons (Consulté le 2013)

« http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PEM_fuel_cell.svg »

Tableau 1.2 Types de pile à combustible
Adaptée de Benard (2008, p.12)

Type de PAC	Électrolyte	Température de fonctionnement (°C)	Réaction Chimique
à membrane échangeuse de protons (PEMFC)	Solid organic polymer poly-perfluorosulfonic acid	60-100	Anode: $\text{H}_2 \longrightarrow 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^-$ Cathode: $1/2 \text{O}_2 + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2 \text{O}$ Cell: $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2 \text{O}$
à électrolyte alcalin(AFC)	Aqueous solution of potassium hydroxide soaked in a matrix	90-100	Anode: $\text{H}_2 + 2(\text{OH})^- \longrightarrow 2 \text{H}_2 \text{O} + 2 \text{e}^-$ Cathode: $1/2 \text{O}_2 + \text{H}_2 \text{O} + 2 \text{e}^- \longrightarrow 2(\text{OH})^-$ Cell: $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2 \text{O}$
à acide phosphorique (PAFC)	Liquid phosphoric acid soaked in a matrix	175-200	Anode: $\text{H}_2 \longrightarrow 2\text{H}^+ + 2 \text{e}^-$ Cathode: $1/2 \text{O}_2 + 2 \text{H}^+ + 2 \text{e}^- \longrightarrow \text{H}_2 \text{O}$ Cell: $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2 \text{O}$
à carbonate fondu (MCFC)	Liquid solution of Li, Na, K carbonates soaked in a matrix	600-1000	Anode: $\text{H}_2 + \text{CO}_3^{2-} \longrightarrow \text{H}_2 \text{O} + \text{CO}_2 + 2 \text{e}^-$ Cathode: $1/2 \text{O}_2 + \text{C O}_2 + 2 \text{e}^- \longrightarrow \text{CO}_3^{2-}$ Cell: $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 + \text{C O}_2 \longrightarrow \text{H}_2 \text{O} + \text{C O}_2$
à oxyde solide (SOFC)	Solid zirconium oxide with small amount of yttria added	600-1000	Anode: $\text{H}_2 + \text{O}^{2-} \longrightarrow \text{H}_2 \text{O} + 2 \text{e}^-$ Cathode: $1/2 \text{O}_2 + 2 \text{e}^- \longrightarrow \text{O}^{2-}$ Cell: $\text{H}_2 + 1/2 \text{O}_2 \longrightarrow \text{H}_2 \text{O}$

Le tableau 1.2 montre cinq types de PAC qui se différencient principalement par le type d'électrolyte utilisé et par la température de fonctionnement.

Dans les applications de transport, la PAC utilisée est du type membrane échangeuse de protons (PEM) dont les caractéristiques principales sont : une basse température de fonctionnement (qui entraîne un temps de mise en fonctionnement court et des réponses rapides à la demande de puissance), un électrolyte solide (pas de fuites dues aux vibrations) et surtout une puissance massique élevée qui rend la PAC compacté et économique. De plus, l'eau produite par la transformation d'énergie sort sous forme liquide.

Comme le montre la figure 1.4, afin de fonctionner, la PAC a besoin d'un grand nombre d'auxiliaires, tels que (Blunier et Miraoui, 2009) :

- un circuit de refroidissement qui permet d'évacuer la chaleur produite par la réaction chimique dans la PAC;

- un circuit d'humidification de l'oxygène et de l'hydrogène qui permet d'éviter l'assèchement de la membrane de la pile;
- un régulateur de pression qui permet de conserver un niveau adéquat de pression du combustible à l'entrée de la PAC (de l'ordre de 2 à 3 bars);
- un compresseur qui permet d'extraire de l'oxygène de l'atmosphère.

Dans la suite de ce document, on appellera générateur à PAC (GPAC) le système présenté à la figure 1.4.

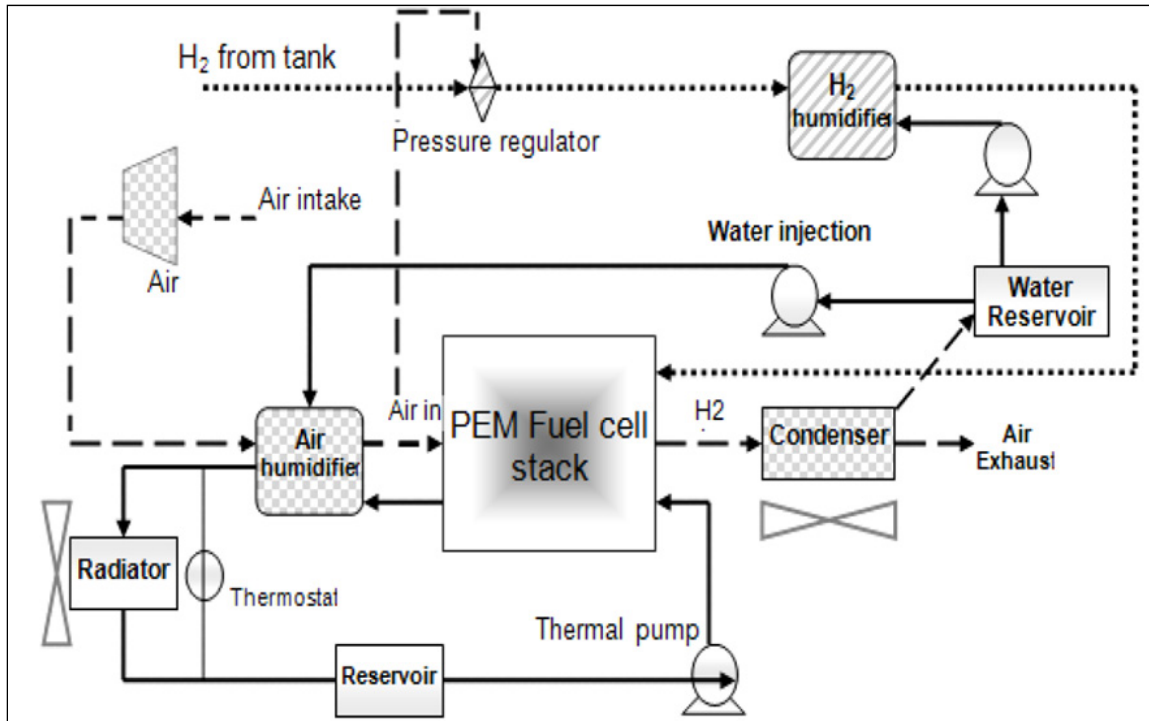
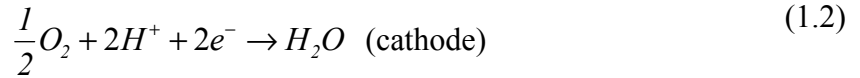


Figure 1.4 Schéma d'un générateur à PAC
Tirée de Omimi, Pourabedin et Nekofa (2009)

Donc, une PAC transforme l'énergie livrée par une réaction chimique en énergie électrique. Les réactions chimiques élémentaires qui ont lieu dans l'anode et la cathode de la pile sont les suivantes (Blunier et Miraoui, 2007) :





La réaction chimique globale est décrite par l'équation :



Cette réaction est spontanée, c'est-à-dire, elle n'a pas besoin d'un apport d'énergie pour se faire). L'énergie livrée lors de la réaction pour la formation de l'eau, appelée énergie libre de Gibbs (ΔG), dépend de la température, de la pression de fonctionnement de la pile et de l'état de l'eau à la sortie (qui peut être sous forme liquide ou sous forme de gaz). Donc, le travail maximal électrique W_e que la PAC peut fournir est égal au produit de la charge par la tension nominale théorique E :

$$W_e = z.F.E = -\Delta G \quad (1.4)$$

D'où :

$$E = \frac{-\Delta G}{z.F} \quad (1.5)$$

z est le nombre de moles d'électrons échangées pour la formation d'une mole de l'eau et F est la constante de Faraday qui représente la charge globale d'une mole d'électrons ($F = 96400 \text{ Coulombs /mol } e^-$).

L'énergie libre de Gibbs à conditions normales de température et de pression (CNTP), à savoir 25 °C et 1 atm, dénotée ΔG^0 , est égale à $-237.2 \text{ kJ/mol}_{d'eau}$. L'eau est produite sous forme liquide et le signe négatif indique que l'énergie est livrée lors de la réaction. La tension nominale théorique dans les conditions CNTP (dénotée E^0) est donc :

$$E^0 = \frac{-\Delta G^0}{z.F} = \frac{-(-237,2 \frac{kJ}{mol_{d'eau}})}{2 \frac{mol e^-}{mol_{d'eau}} \times 96400 \frac{Coulombs}{mol e^-}} = 1,229 Volts \quad (1.6)$$

E^0 constitue la tension en circuit ouvert d'une seule cellule de la PAC, à conditions normales de température et de pression (25 °C et 1 atm).

La variation de ΔG avec la pression et la température s'exprime comme suit (dédue des lois de la thermodynamique et des gaz parfaits) :

$$\Delta G = \Delta G_T^0 + R.T.\ln\left(\frac{p_{H_2O}}{p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{1/2}}\right) \quad (1.7)$$

Où :

R est la constante idéale des gaz = 8,3145 J/mol.K;

$p_{H_2}, p_{O_2}^{1/2}, p_{H_2O}$ sont les pressions partielles de l'hydrogène, de l'oxygène et de l'eau;

ΔG_T^0 est la variation de l'énergie de Gibbs dans les conditions CNTP à la température T qui peut être déduite de 1.5 :

$$\Delta G_T^0 = -z.F.E_T^0 \quad (1.8)$$

Où, E_T^0 est la force électromotrice de la pile dans les conditions CNTP à la température T qui est, à son tour, donnée par l'équation suivante :

$$E_T^0 = E^0 + (T - T_0) \cdot \left(\frac{\Delta S^0}{z.F} \right) \quad (1.9)$$

Où :

$$E^0 = 1,229 \text{ Volts};$$

T_0 est la température standard (25 °C), en Kelvin (298 K);

ΔS^0 est le changement d'entropie considéré constant est égal à -164 J/mol.K.

Comme on l'a précédemment mentionné, pour une PAC du type PEM, l'eau est obtenue sous forme liquide. Alors, l'activité de l'eau est égale à 1 ($p_{H_2O} = 1$). L'expression 1.7 devient :

$$\Delta G = \Delta G_T^0 + R.T.\ln\left(\frac{1}{p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{1/2}}\right) \quad (1.10)$$

Ainsi, en utilisant les expressions 1.8, 1.9 et 1.10, la tension nominale théorique E devient :

$$E = \frac{-\Delta G}{z.F} = \frac{-\Delta G_T^0 - R.T.\ln\left(\frac{1}{p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{1/2}}\right)}{z.F} = E_T^0 - \frac{R.T}{z.F} \cdot \ln\left(\frac{1}{p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{1/2}}\right) \quad (1.11)$$

$$E = E^0 + (T - T_0) \cdot \left(\frac{\Delta S^0}{z.F}\right) - \frac{R.T}{z.F} \cdot \ln\left(\frac{1}{p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{1/2}}\right) \quad (1.12)$$

L'expression 1.12 est l'équation de Nernst qui représente la tension à circuit ouvert d'une seule cellule de la PAC (c'est-à-dire, à intensité de courant nulle) en fonction de la température et de la pression.

En remplaçant les constantes numériques dans 1.12, on obtient :

$$E = 1,229 - 0,85 \times 10^{-3} \cdot (T - 298) + 4,3085 \times 10^{-5} \cdot T \cdot \ln(p_{H_2} \cdot p_{O_2}^{1/2}) \quad (1.13)$$

D'un autre côté, de l'expression 1.1, deux électrons sont transférés par mole de H_2 qui réagit dans l'anode. La charge Q transférée par N moles qui réagissent ($N_{moles\ de\ H_2}^r$) est donc :

$$Q = 2.F.N_{moles\ de\ H_2}^r \rightarrow N_{moles\ de\ H_2}^r = \frac{Q}{2.F} \quad (1.14)$$

En divisant par le temps, on obtient le débit molaire en mol/s :

$$q_{H_2}^r = \frac{I_{PAC}}{2.F} \text{ [mol/s]} \quad (1.15)$$

Où I_{PAC} est le courant de la PAC.

Pour exprimer cette expression comme débit massique en kg/s, il faut simplement multiplier l'expression 1.15 par la masse molaire de H_2 , dénotée m_{H_2} , qui est égale à 2.02×10^{-3} Kg/mol.

$$W_{H_2 [kg/s]}^r = m_{H_2} \cdot \frac{I_{PAC}}{2.F} \quad (1.16)$$

L'expression 1.16 représente le débit massique de l'hydrogène qui réagit dans la pile à combustible pour produire de l'électricité.

Il existe trois types de débit molaire (ou de débit massique) dans la vanne anode ou cathode d'une PAC. Par exemple, pour l'hydrogène dans l'anode on a : le débit molaire à l'entrée ($q_{H_2}^{in}$), le débit molaire à la sortie ($q_{H_2}^{out}$) et le débit molaire qui réagit dans l'anode ($q_{H_2}^r$). Ceux-ci sont liés par l'expression suivante dérivée de la loi des gaz parfaits :

$$\frac{d}{dt} p_{H_2} = \frac{\bar{R}_{H_2} \cdot T}{V_{anode}} (q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^{out} - q_{H_2}^r) \quad (1.17)$$

Où :

p_{H_2} est la pression partielle de l'hydrogène;

$$\bar{R}_{H_2} = \frac{R}{m_{H_2}} = \frac{Cte. universelle des gaz}{masse molaire d'hydrogène} = \frac{8.3145 \text{ J/mol.K}}{2.02 \times 10^{-3} \text{ Kg/mol}} ;$$

T est la température en degrés K;

V_{anode} est le volume de l'anode de la PAC.

Dans l'état stable, on a :

$$q_{H_2}^{out} = q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^r \quad (1.18)$$

De plus, le rapport entre le débit molaire q d'un gaz traversant une vanne et la pression partielle p de ce gaz à l'intérieur de la canalisation, peut être exprimé par :

$$\frac{q_{gaz}}{p_{gaz}} = \frac{K_{vanne}}{\sqrt{M_{gaz}}} \quad (1.19)$$

Où, M_{gaz} est la masse molaire du gaz [kg/kmol];

et K_{vanne} est la constante de la vanne [$\sqrt{kmol.kg} / atm.s$].

Donc, pour l'hydrogène dans l'anode, on aura :

$$\frac{q_{H_2}}{p_{H_2}} = \frac{K_{anode}}{\sqrt{M_{H_2}}} = K_{H_2} \quad (1.20)$$

Alors,

$$q_{H_2}^{out} = K_{H_2} \cdot p_{H_2} \quad (1.21)$$

En utilisant 1.18, la pression partielle de l'hydrogène est donc :

$$p_{H_2} = \frac{q_{H_2}^{out}}{K_{H_2}} = \frac{(q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^r)}{K_{H_2}} \quad (1.22)$$

S'il n'y a pas débite de courant, il n'y a pas débite molaire qui réagit, donc $q_{H_2}^r = 0$

$$p_{H_2}^{in} = \frac{q_{H_2}^{in}}{K_{H_2}} \rightarrow K_{H_2} = \frac{q_{H_2}^{in}}{p_{H_2}^{in}} \quad (1.23)$$

En remplaçant la valeur de K_{H_2} dans 1.22, on obtient l'équation :

$$p_{H_2} = \frac{q_{H_2}^{out}}{K_{H_2}} = \frac{(q_{H_2}^{in} - q_{H_2}^r)}{q_{H_2}^{in}} \cdot p_{H_2}^{in} \quad (1.24)$$

Posons l'utilisation d'hydrogène (Uf_{H_2}) comme égale au rapport entre l'hydrogène qui réagit et celui-ci qui entre dans la pile :

$$Uf_{H_2} = \frac{q_{H_2}^r}{q_{H_2}^{in}} = \frac{W_{H_2}^r}{W_{H_2}^{in}} \quad (1.25)$$

La pression partielle de l'hydrogène est donc :

$$p_{H_2} = (1 - Uf_{H_2}) \cdot p_{H_2}^{in} \quad (1.26)$$

Un gaz est une partie d'un mélange. Alors, si l'on appelle $x\%$ la concentration d'hydrogène dans le combustible et, $y\%$ la concentration d'oxygène dans l'air, les pressions partielles de l'hydrogène et de l'oxygène entrant à la PAC peuvent être exprimées par :

$$p_{H_2}^{in} = x\% \cdot p_{fuel} \quad (1.27)$$

$$p_{O_2}^{in} = y\% \cdot p_{air}$$

Où, p_{fuel} est la pression du combustible et p_{air} est la pression de l'air fourni par le compresseur.

Donc, l'expression 1.26 devient :

$$p_{H_2} = (1 - Uf_{H_2}) \cdot x\% \cdot p_{fuel} \quad (1.28)$$

Et pour l'oxygène :

$$p_{O_2} = (1 - Uf_{O_2}) \cdot y\% \cdot p_{air} \quad (1.29)$$

Puis, de l'expression 1.25 :

$$W_{H_2}^{in} [kg/s] \cdot Uf_{H_2} = W_{H_2}^r [kg/s] \quad (1.30)$$

Pour exprimer le débit massique W en litres par minute (lpm), il faut d'abord diviser l'expression de W en kilogrammes par seconde par la masse volumique de l'hydrogène ρ qui est calculée de l'équation des gaz parfaits suivante :

$$p_{H_2} \cdot \frac{1}{\rho_{[kg/m^3]}} = \bar{R}_{H_2} \cdot T \quad (1.31)$$

et ensuite, faire un changement d'unités (de secondes à minutes et de m^3 à litres).
L'expression du débit massique en litres par minute est donc :

$$W_{H_2[lpm]}^{in} \cdot Uf_{H_2} = 60 \cdot 10^3 \cdot W_{H_2[kg/s]}^r \cdot \frac{\bar{R}_{H_2} \cdot T}{p_{H_2}^{in}} \quad (1.32)$$

En utilisant les expressions 1.16 et 1.27, on obtient :

$$Uf_{H_2} = 60 \cdot 10^3 \cdot \frac{I_{PAC}}{2 \cdot F} \cdot \frac{R \cdot T}{p_{fuel} \cdot W_{H_2[lpm]}^{in} \cdot x\%} \quad (1.33)$$

En suivant la même procédure pour l'utilisation d'oxygène (Uf_{O_2}), mais dans ce cas 4 électrons sont transférés par mole de O_2 qui réagit dans la cathode (voir l'équation 1.2), on obtient :

$$Uf_{O_2} = 60 \cdot 10^3 \cdot \frac{I_{PAC}}{4 \cdot F} \cdot \frac{R \cdot T}{p_{air} \cdot W_{O_2[lpm]}^{in} \cdot y\%} \quad (1.34)$$

Avec :

p_{fuel} et p_{air} : les pressions du combustible et de l'air en Pa (pascals);

T : la température du système en Kelvin;

R : la constante idéale des gaz égale à 8.3145 J/mol.K;

$W_{H_2[lpm]}^{in}$: le débit de l'hydrogène fourni à la pile en litres par minute;

$W_{O_2[lpm]}^{in}$: le débit de l'oxygène fourni à la pile en litres par minute;

$x\%$: la concentration d'hydrogène dans le combustible;

$y\%$: la concentration d'oxygène dans l'air.

1.3.1.1 Les pertes dans la PAC

Comme on l'a déjà mentionné, la tension à vide de la PAC s'exprime par l'équation de Nernst donnée par 1.12 :

Quand la PAC débite un courant, il y a des pertes qui entraînent une chute de tension telles que (Motapon, 2008) :

Pertes d'activation : elles sont dues à la lenteur de la réaction ayant lieu à la surface des électrodes. La chute de tension provoquée est exprimée par l'équation de Tafel.

$$\Delta V_{act} = A \cdot \ln \left(\frac{I_{PAC}}{I_0} \right) \quad (1.35)$$

Où :

$A = \frac{R.T}{z.\alpha.F}$ est la pente de la droite de Tafel (avec T , la température d'opération en Kelvin et

α , le coefficient de transfert de la charge)

Et,

$I_0 = \frac{z.F.k.(p_{H_2} + p_{O_2})}{R.h} \cdot e^{\frac{-\Delta G}{RT}}$ est le courant d'échange.

Pertes ohmiques : elles sont dues à la résistance électrique des électrodes, à la résistance de contact et à la résistance de l'électrolyte au passage des ions. La chute de tension provoquée est exprimée par la loi d'Ohm.

$$\Delta V_r = I_{PAC} \cdot r \quad (1.36)$$

Où « r » est la résistance interne de la PAC en ohms (Ω).

Donc, la tension réelle d'une seule cellule de la PAC est donnée par la formule suivante :

$$V_{PAC_1cell} = E - \Delta V_{act} - \Delta V_r \quad (1.37)$$

$$V_{PAC_1cell} = E - A \cdot \ln \left(\frac{I_{PAC}}{I_0} \right) - I_{PAC} \cdot r \quad (1.38)$$

1.3.1.2 Rendements de la PAC

Les rendements de la PAC sont (Blunier et Miraoui, 2007):

- le rendement théorique η_{th} , défini comme le rapport entre l'énergie produite utilisable (l'énergie libre de Gibbs) et l'énergie thermique qui serait libérée par la réaction chimique (l'enthalpie de formation ou le pouvoir calorifique ΔH).

$$\eta_{th} = \frac{W_e}{(-\Delta H)} = \frac{\Delta G}{\Delta H} = \frac{-z.F.E}{\Delta H} \quad (1.39)$$

Le pouvoir calorifique ΔH est une propriété des combustibles dont la valeur dépend de l'état de l'eau produit dans la réaction chimique (liquide ou gazeux). Ainsi, il existe le pouvoir calorifique inférieur (PCI), *lower heating value* (LHV) en anglais, où la vapeur d'eau est supposée non condensée (gaz), et le pouvoir calorifique supérieur (PCS), *higher heating value* (HHV) en anglais, où la vapeur d'eau est condensée (liquide). Les valeurs des pouvoirs calorifiques de l'hydrogène sont présentées dans le tableau 1.2.

Tableau 1.3 Pouvoirs calorifiques de l'hydrogène
 Tiré de Wikipédia (Consulté le 2013)
 « http://fr.wikipedia.org/wiki/Pouvoir_calorifique_inférieur »

PCS (HHV)		PCI (LHV)	
-141.9 kJ/g	-285.84 kJ/mol	-120.1 kJ/g	-241.83 kJ/mol

- le rendement tension η_v , défini comme le rapport entre la tension réelle de la PAC et la force électromotrice E théorique de la pile (donnée par l'équation de Nernst).

$$\eta_v = \frac{V_{PAC_1cell}}{E} \quad (1.40)$$

- le rendement faradique η_F , défini comme le rapport entre le courant débité et le courant maximal correspondant à la réaction globale.

$$\eta_F = \frac{I_{PAC}}{I_{max}} \quad (1.41)$$

- le rendement total de la pile η_{tot} , donné par l'expression suivante :

$$\eta_{tot} = \eta_{th} \cdot \eta_v \cdot \eta_F \quad (1.42)$$

En utilisant 1.39 et 1.40 et en considérant que $\eta_F = 1$, alors

$$\eta_{tot} = \frac{V_{PAC_1cell}}{\left(\frac{\Delta H}{-z.F} \right)} \quad (1.43)$$

En utilisant les valeurs en kJ/mol du tableau 1.2 et avec $F = 96400$ Coulombs/mole et $z=2$, le rendement total de la pile est :

$$\eta_{tot} = \frac{V_{PAC_1cell}}{1.25}, \text{ si l'eau est produite sous forme gazeuse} \quad (1.44)$$

Ou

$$\eta_{tot} = \frac{V_{PAC_1cell}}{1.48}, \text{ si l'eau est produite sous forme liquide} \quad (1.45)$$

- le rendement matière η_{mat} ou le coefficient d'utilisation du combustible, défini comme le rapport entre l'hydrogène consommé et l'hydrogène fourni.

$$\eta_{mat} = \frac{H_{2consommé}}{H_{2fourni}} = U_{f_{H_2}} \quad (1.46)$$

- le rendement système η_{syst} , défini comme le rapport entre la puissance nette que fournit le générateur à PAC (le système) et la puissance brute que fournit la PAC.

$$\eta_{syst} = \frac{P_{nette}}{P_{brute}} = \frac{P_{brute} - P_{aux}}{P_{brute}} \quad (1.47)$$

Où P_{aux} est la puissance consommée par les auxiliaires du générateur à PAC.

Parmi les auxiliaires, le compresseur d'air, utilisé pour fournir de l'oxygène à la pile, est l'élément consommant une importante quantité de puissance de la PAC. La puissance du compresseur est exprimée par la formule suivante :

$$P_{comp} = \frac{W_{air} \cdot T_e \cdot C_p}{\eta_c \cdot \eta_m} \left(\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right) \quad (1.48)$$

Où :

η_c est le rendement du compresseur;

η_m est le rendement électrique du moteur du compresseur;

γ est le coefficient isentropique de l'air;

W_{air} est le débit massique d'air [kg/s];

p_2 est la pression absolue de sortie du compresseur [atm];

p_1 est la pression atmosphérique [atm];

c_p est la capacité thermique de l'air [J/kg.K];

T_e est la température d'entrée de l'air [K].

- le rendement global du système η_{global} , donné par l'expression suivante :

$$\eta_{global} = \eta_{tot} \cdot \eta_{mat} \cdot \eta_{syst} = \frac{-z \cdot F \cdot Uf_{H_2} \cdot V_{PAC_1cell}}{\Delta H} \cdot \eta_{syst} \quad (1.49)$$

1.3.1.3 Résumé de formules

$$V_{PAC_1cell} = E - A \cdot \ln\left(\frac{I_{PAC}}{I_0}\right) - I_{PAC} \cdot r \quad (1.50)$$

$$q_{H_2}^r [mol/s] = \frac{I_{PAC}}{2 \cdot F} \quad (1.51)$$

$$W_{H_2}^r [kg/s] = m_{H_2} \cdot \frac{I_{PAC}}{2 \cdot F} \quad (1.52)$$

$$W_{H_2}^{in} [lpm] \cdot Uf_{H_2} = 60 \cdot 10^3 \cdot W_{H_2}^r [kg/s] \cdot \frac{\bar{R}_{H_2} \cdot T}{P_{H_2}^{in}} \quad (1.53)$$

$$Uf_{H_2} = 60000 \cdot \frac{I_{PAC}}{2.F} \cdot \frac{R.T}{p_{fuel} \cdot W_{H_2[lpm]}^{in} \cdot x\%} \quad (1.54)$$

$$Uf_{O_2} = 60000 \cdot \frac{I_{PAC}}{4.F} \cdot \frac{R.T}{p_{air} \cdot W_{O_2[lpm]}^{in} \cdot y\%} \quad (1.55)$$

$$\eta_{stack} = \frac{-z.F.Uf_{H_2} \cdot V_{PAC_1cell}}{\Delta H} \times 100\% \quad (1.56)$$

$$\eta_{syst} = \frac{P_{nette}}{P_{brute}} = \frac{P_{brute} - P_{aux}}{P_{brute}} \quad (1.57)$$

$$\eta_{global} = \frac{-z.F.Uf_{H_2} \cdot V_{PAC_1cell}}{\Delta H} \cdot \eta_{syst} \times 100\% \quad (1.58)$$

Dans le but d'obtenir de grandes valeurs de tension et de puissance, plusieurs cellules de PAC sont branchées en série. Donc, pour une pile à combustible de N_c cellules, les formules précédentes deviennent :

$$V_{PAC} = N_c \cdot \left(E - A \cdot \ln \left(\frac{I_{PAC}}{I_0} \right) - I_{PAC} \cdot r \right) \quad (1.59)$$

$$q_{H_2[mol/s]}^r = \frac{N_c \cdot I_{PAC}}{2.F} \quad (1.60)$$

$$W_{H_2[kg/s]}^r = m_{H_2} \cdot \frac{N_c \cdot I_{PAC}}{2.F} \quad (1.61)$$

$$W_{H_2[lpm]}^{in} \cdot Uf_{H_2} = 60 \cdot 10^3 \cdot W_{H_2[kg/s]}^r \cdot \frac{\bar{R}_{H_2} \cdot T}{p_{H_2}^{in}} \quad (1.62)$$

$$Uf_{H_2} = 60000 \cdot \frac{N_c \cdot I_{PAC}}{2 \cdot F} \cdot \frac{R \cdot T}{P_{fuel} \cdot W_{H_2[in]}^{in} \cdot x\%} \quad (1.63)$$

$$Uf_{O_2} = 60000 \cdot \frac{N_c \cdot I_{PAC}}{4 \cdot F} \cdot \frac{R \cdot T}{P_{air} \cdot W_{O_2[in]}^{in} \cdot y\%} \quad (1.64)$$

$$\eta_{stack} = \frac{-z \cdot F \cdot Uf_{H_2} \cdot V_{PAC}}{N_c \cdot \Delta H} \times 100\% \quad (1.65)$$

$$\eta_{syst} = \frac{P_{nette}}{P_{brute}} = \frac{P_{brute} - P_{aux}}{P_{brute}} \quad (1.66)$$

$$\eta_{global} = \frac{-z \cdot F \cdot Uf_{H_2} \cdot V_{PAC}}{N_c \cdot \Delta H} \cdot \eta_{syst} \times 100\% \quad (1.67)$$

1.3.2 L'élément de stockage d'énergie (ES)

Deux types d'ES sont considérés dans l'hybridation de véhicules : des batteries et des supercondensateurs. Le diagramme de Ragone dans la figure 1.5, montre les différences de puissance et d'énergie de quelques types de condensateurs et de batteries.

L'énergie spécifique représente combien d'énergie électrique par unité de masse peut être stockée par une source d'énergie alors que la puissance spécifique représente combien de puissance par unité de masse peut être fournie par une source d'énergie. La puissance spécifique représente aussi l'habilité de la source à fournir ou récupérer de l'énergie. Plus grande la puissance spécifique plus vite la source fournira ou récupérera de l'énergie.

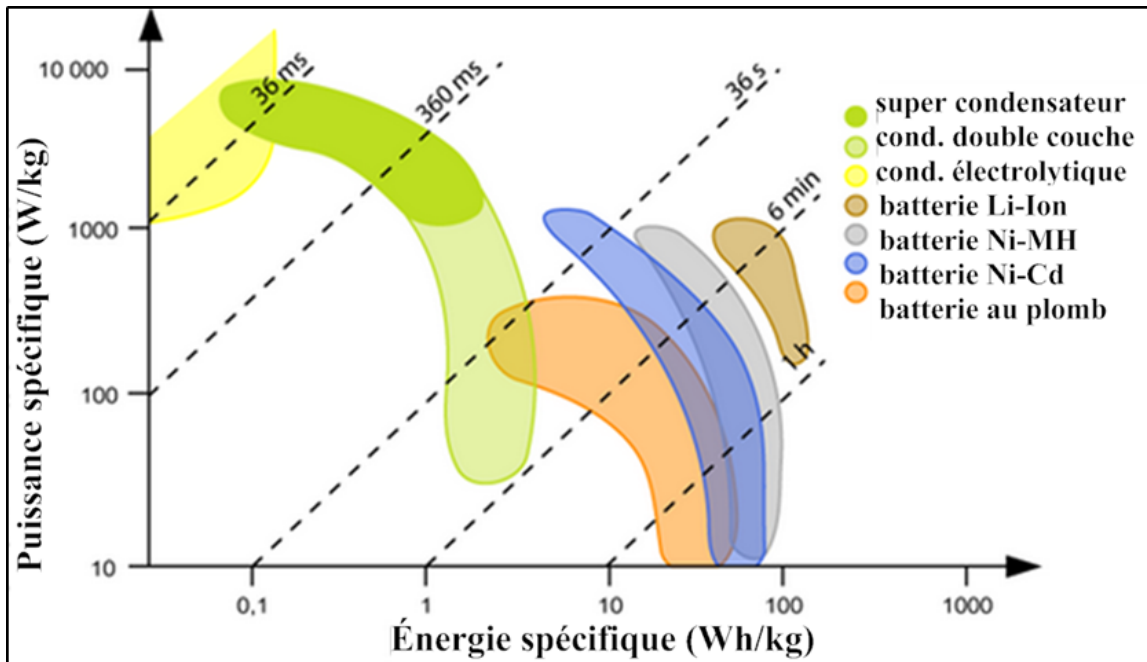


Figure 1.5 Diagramme de Ragone

Adaptée de Wikimedia commons (Consulté le 2013)

« <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Energiespeicher2.svg> »

1.3.2.1 La batterie

Comme le montre le diagramme de Ragone, la batterie est principalement une source d'énergie caractérisée par une basse capacité de puissance. Il existe différents types de batteries tels que *Nickel-Cadmium* (Ni-Cd), *Nickel-Metal Hydride* (Ni-MH), *lithium-ion* (Li-Ion), et il faut prendre en considération le prix lors du choix de la technologie de la batterie.

Les éléments clés qui caractérisent la batterie sont les suivants :

- la capacité de la batterie (C_{bat}), à savoir la quantité de charge électrique que la batterie peut fournir avant de se décharger au complet. Elle est exprimée en ampère-heure (Ah). La valeur de C_{bat} dépend du débit du courant de la batterie.

$$C_{bat}(t) = C_{bat}(0) - \int_0^t i_{bat} . dt \quad (1.68)$$

Le courant de la batterie i_{bat} est positif dans la décharge et négatif dans la recharge.

- l'énergie stockée par la batterie (E_{bat}), définie comme le produit de la tension de la batterie V_{bat} par la capacité de la batterie C_{bat} .

$$E_{bat} = C_{bat} . V_{bat} \quad (1.69)$$

- la profondeur de décharge (DOD), représentée par le pourcentage de la capacité de la batterie qui peut être déchargé de la batterie.
- l'état de la charge (SOC) de la batterie, représentée par le pourcentage de la capacité maximale de la batterie qui est stocké dans la batterie à un instant déterminé.

$$SOC(t) = \frac{C_{bat}(t)}{C_{bat_max}} \quad (1.70)$$

Se pose ici le problème du calcul de l'état de la charge de la batterie : celui-ci ne peut pas être calculé avec exactitude en raison de la difficulté de déterminer $C_{bat}(0)$ (Bernard, page 76).

Il est important de faire une distinction entre l'énergie totale de la batterie et l'énergie disponible. Une batterie avec une énergie utilisable $E_{utilisable_bat}$ et une profondeur de décharge %DOD aura une énergie totale E_{totale_bat} donnée par l'expression suivante :

$$E_{totale_bat} = \frac{E_{utilisable_bat}}{\%DOD} \quad (1.71)$$

1.3.2.2 Le supercondensateur (SC)

Contrairement à la batterie, le SC est principalement une source de puissance avec une basse capacité d'énergie. L'énergie stockée dans le SC est donnée par l'équation suivante :

$$E_{sc} = \frac{1}{2} \cdot C_{sc} \cdot V_0^2 \quad (1.72)$$

Où V_0 est la tension derrière l'impédance R_{sc} dans le schéma électrique du SC (voir la figure 1.6) et C_{sc} est la capacité du SC en farads [F].

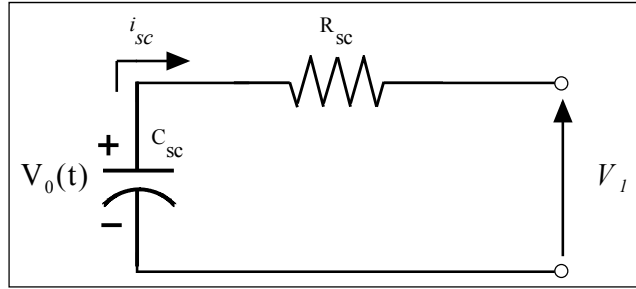


Figure 1.6 Schéma électrique du supercondensateur

La tension V_0 est calculée de la façon suivante :

$$V_0(t) = V_0(0) - \frac{1}{C_{sc}} \int_0^t i_{sc} \cdot dt \quad (1.73)$$

L'énergie maximale E_{sc_max} qui peut être stockée dans le SC est donc :

$$E_{sc_max} = \frac{1}{2} \cdot C_{sc} \cdot V_{0max}^2 \quad (1.74)$$

L'état de charge (SOC) du SC correspond au rapport entre l'énergie contenue dans le SC et l'énergie maximale admissible :

$$SOC = \frac{E_{sc}}{E_{sc_max}} \quad (1.75)$$

À la différence de la batterie, la tension à vide $V_0(0)$ peut être mesurée de manière fiable. Donc, il est relativement simple d'estimer SOC(t) à partir de l'équation précédente.

Si V_{0min} est la tension minimale que le supercondensateur peut avoir, alors son énergie utilisable sera :

$$E_{utilisable_sc} = \frac{I}{2} \cdot C_{sc} \cdot V_{0max}^2 - \frac{I}{2} \cdot C_{sc} \cdot V_{0min}^2 = \frac{I}{2} \cdot C_{sc} \cdot V_{0max}^2 \cdot \left(1 - \frac{V_{0min}^2}{V_{0max}^2} \right) \quad (1.76)$$

De l'équation 1.74 :

$$E_{sc_max} = \frac{E_{utilisable_sc}}{\left(1 - \frac{V_{0min}^2}{V_{0max}^2} \right)} \quad (1.77)$$

Donc, la capacité minimale du SC en farads [F] est :

$$C_{sc_min} = \frac{E_{utilisable_sc}}{\frac{I}{2} \cdot V_{0max}^2 \cdot \left(1 - \frac{V_{0min}^2}{V_{0max}^2} \right)} \quad (1.78)$$

1.3.3 Le véhicule et son groupe motopropulseur

La chaîne de traction d'un FCHEV comporte quatre éléments qui sont montrés dans la figure suivante :

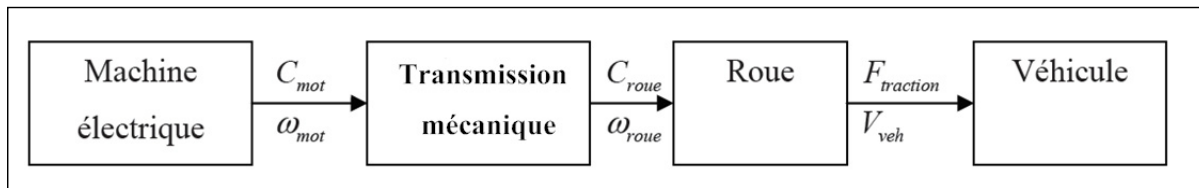


Figure 1.7 Schéma de la chaîne de traction

1.3.3.1 Le système de propulsion (le moteur électrique)

Pour les applications automotrices, la performance idéale du système de propulsion est d'avoir une puissance constante sur toute la plage de vitesse. De ce fait, le couple change de façon hyperbolique avec la vitesse. À une vitesse faible, le couple est contraint à être constant afin de ne pas dépasser le couple maximal qui garantit l'adhésion entre les roues et le sol (Ehsani et al, 2004, p. 34).

Le moteur électrique avec contrôleur s'approche plus de ces caractéristiques que le moteur à combustion, qui aura besoin d'engrenages multiples pour pouvoir suivre la courbe idéale. La figure 1.8 montre les caractéristiques couple vitesse du moteur électrique d'un véhicule électrique et d'un moteur à combustion avec système d'engrenages à 4 rapports d'un véhicule conventionnel.

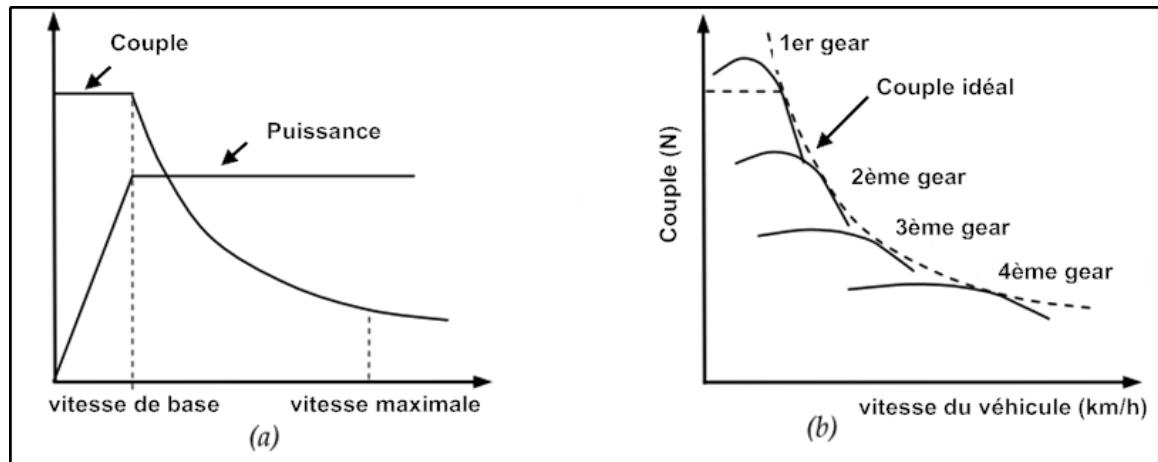


Figure 1.8 Caractéristiques couple-vitesse (a) d'un moteur électrique
(b) d'un moteur à combustion avec système d'engrenages à 4 rapports
Adaptée de Livint *et al.* (2011, p. 41)

1.3.3.2 Le véhicule

La figure suivante montre les efforts auxquels un véhicule est soumis lors de la montée en côte.

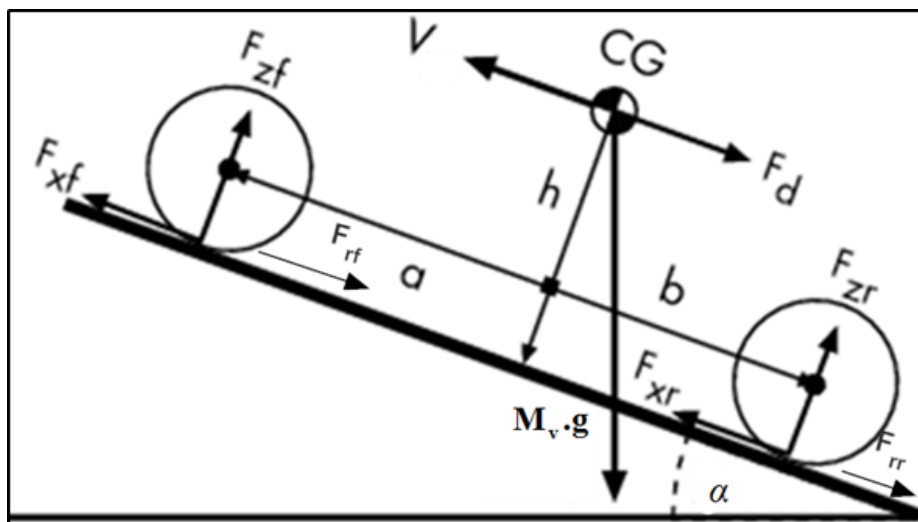


Figure 1.9 Dynamique du véhicule
Adaptée du site MATLAB (Consulté le 2013)

« <http://www.mathworks.com/help/physmod/sdl/drive/longitudinalvehicledynamics.html> »

Les efforts et les paramètres dans la figure 1.9 sont identifiés ci-dessous :

F_{xf} = force de traction (roues avant);

F_{xr} = force de traction (roues arrière);

F_d = force à la résistance de l'air sur le véhicule (*Aerodynamic drag force*);

F_{zf} = force verticale sur le véhicule (roues avant);

F_{zr} = force verticale sur le véhicule (roues arrière);

$M_v \cdot g$ = poids du véhicule (masse du véhicule par l'accélération de la pesanteur);

V = vitesse du véhicule;

CG = centre de gravité du véhicule;

h = hauteur du CG au-dessus du sol;

a = Distance du CG à l'axe des roues avant;

b = Distance du CG à l'axe des roues arrière;

α = Angle d'inclination du sol;

F_{rf} = force de résistance des roues sur le sol (roues avant);

F_{rr} = force de résistance des roues sur le sol (roues arrière).

Les expressions de la force à la résistance de l'air sur le véhicule (F_d) et de la force de résistance totale des roues sur le sol ($F_r = F_{rf} + F_{rr}$) sont les suivantes :

$$F_d = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot C_D \cdot (V + V_w)^2 \quad (1.79)$$

$$F_r = M_v \cdot g \cdot f_r \cdot \cos \alpha \quad (1.80)$$

Où :

f_r = coefficient de résistance au roulement

C_D = coefficient de pénétration dans l'air (*Aerodynamic drag coefficient*)

A_f = surface frontale du véhicule

ρ_a = masse volumique de l'air

V_w = la composante de la vitesse du vent en la direction du mouvement

Lorsque le véhicule monte ou (descend) une côte, son poids entraîne une force de résistance à la pente (F_g) donnée par l'équation :

$$F_g = M_v \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (1.81)$$

Donc, la force totale des résistances au mouvement est :

$$F_{tr} = F_r + F_d + F_g \quad (1.82)$$

Ainsi, la force totale de traction est :

$$F_t = F_{xf} + F_{xr} \quad (1.83)$$

L'équation dynamique du mouvement du véhicule est exprimée par la deuxième loi de Newton :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{F_t - F_{tr}}{\delta M_v} \quad (1.84)$$

Alors, en utilisant 1.79, 1.80 et 1.81, la force totale de traction est :

$$F_t = M_v \cdot g \cdot f_r \cdot \cos \alpha + M_v \cdot g \cdot \sin \alpha + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot C_D \cdot (V + V_w)^2 + \delta M_v \frac{dV}{dt} \quad (1.85)$$

Où δ est un facteur de la masse.

Posons: $i = \frac{H}{L} = \tan\alpha$ (α est l'angle d'inclination du sol – figure 1.9)

Si l'on néglige V_w et si l'angle α est petit (donc $i = \tan\alpha \approx \sin\alpha$ et $\cos\alpha \approx 1$), l'équation résultante est :

$$F_t = M_v \cdot g \cdot (f_r + i) + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot C_D \cdot V^2 + \delta M_v \cdot \frac{dV}{dt} \quad (1.86)$$

Donc, la puissance mécanique du moteur requise pour conduire le véhicule à une vitesse V sera :

$$P_m = \frac{F_t \times V}{n_t} = \frac{(M_v \cdot g \cdot (f_r + i) + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot C_D \cdot V^2 + \delta M_v \cdot \frac{dV}{dt}) \cdot V}{n_t} \quad (1.87)$$

Où n_t est le rendement du système de transmission.

La puissance de traction totale pour accélérer le véhicule de zéro jusqu'à la vitesse finale V_f en t_a secondes est donnée par :

$$P_{t_a} = \frac{\frac{\delta M_v}{2t_a} \cdot (V_f^2 + V_b^2) + \frac{2}{3} M_v \cdot g \cdot f_r \cdot V_f + \frac{1}{5} \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot C_D \cdot V_f^3}{n_t} \quad (1.88)$$

Où V_b est la vitesse de base du moteur électrique (voir la figure 1.8 (a)).

1.3.3.3 La transmission mécanique

La transmission mécanique comporte des engrenages pour adapter les vitesses de rotation et les couples entre le moteur électrique et les roues, et d'un bloc différentiel chargé de répartir le couple de sortie des engrenages aux roues motrices. À la différence des véhicules conventionnels à ICE, qui ont besoin d'engrenages multiples, les véhicules électriques utilisent des engrenages simples, ce qui permet des accélérations et freinages plus doux. La force de traction sur les roues (F_t) et la vitesse du véhicule (V) peuvent être exprimées par les équations suivantes (Ehsani et al, 2004, p. 105) :

$$F_t = \frac{T_m \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t}{r_d} \quad (1.89)$$

$$V = \frac{\pi \cdot N_{moteur} \cdot r_d}{30 \cdot i_g \cdot i_0} \text{ [m/s]} \quad (1.90)$$

Où :

T_m est le couple du moteur;

N_{moteur} est la vitesse du moteur en tours par minute (*rpm*);

i_g est le rapport de transmission;

i_0 est le rapport de transmission finale;

r_d est le rayon des roues du véhicule;

η_t est le rendement du système de transmission.

1.3.3.4 Les roues

Les roues transforment le couple du moteur en forces sur le véhicule (voir la figure 1.10). Un couple à une vitesse Ω et appliqué sur l'axe d'une roue tournant sur le sol entraîne une

force longitudinale F_x qui propulse le véhicule et une force verticale F_z qui maintient le véhicule sur le sol. La force F_x prend en compte la force de résistance des roues (F_r) donnée par l'équation 1.80 et entraînée par l'interaction pneu-chaussée.



Figure 1.10 Efforts et vitesses angulaire et longitudinale sur une roue
Tirée du site MATLAB (Consulté le 2013)
« <http://www.mathworks.com/help/physmod/sdl/drive/tire.html?searchHighlight=tire> »

1.3.4 Les convertisseurs de puissance

Les convertisseurs de puissance de type hacheur ou convertisseur de courant continu à courant continu (CC/CC) et de type onduleur ou convertisseur de courant continu à courant alternatif (CC/CA) sont utilisés pour la connexion des dispositifs électriques de puissance du véhicule, à savoir la machine électrique, la PAC et l'ES, au bus de courant continu (bus CC). L'architecture électrique du véhicule spécifie la manière dont la connexion est effectuée. Il existe différents types d'architectures électriques pour un véhicule. La figure suivante présente l'architecture électrique la plus complète.

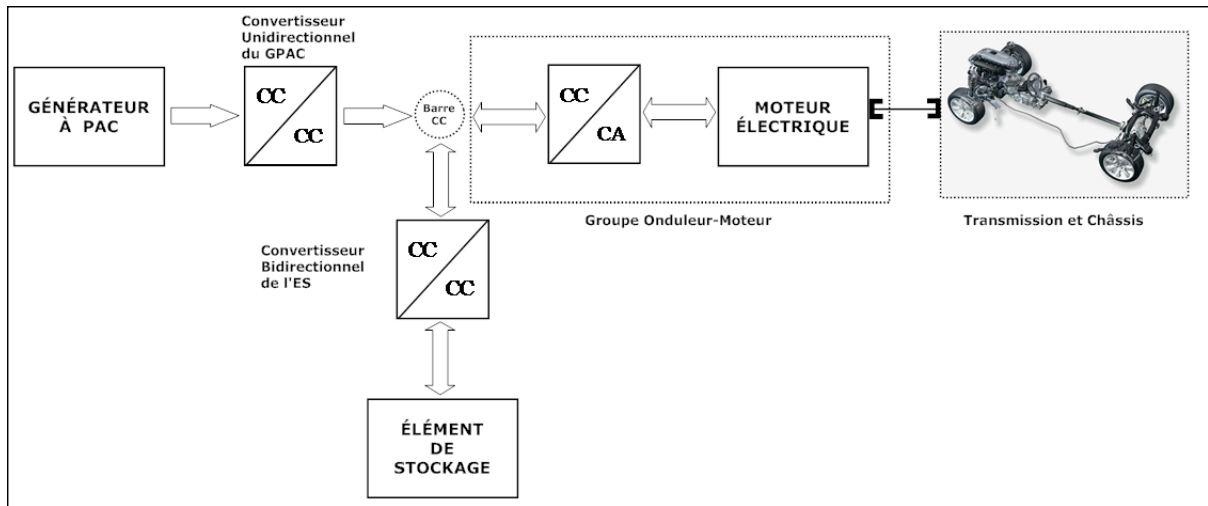


Figure 1.11 Architecture électrique du véhicule avec un convertisseur CC/CC pour chaque source d'énergie

Le convertisseur de CC/CA transforme la puissance dans les bus CC en puissance CA vers le moteur électrique et permet de contrôler le couple de traction de celui-ci. De plus, il doit être réversible pour permettre de récupérer de l'énergie lors de freinages.

Les convertisseurs CC/CC contrôlent la distribution de la puissance entre la PAC et l'ES. Ils permettent d'adapter les tensions de la PAC et de l'ES au bus CC et de limiter leurs courants.

1.4 Les profils de conduite

Les profils de conduite ou de vitesse représentent les valeurs de vitesse versus temps qu'un véhicule atteindra lors de la conduite sur une voie. Ils sont utilisés pour tester la performance du véhicule en simulation. Il existe différents types de profils de conduite dont le *New European Driving Cycle* (NEDC), l'*Urban Dynamometer Driving Schedule* (UDDS), le *HighWay Fuel Economy Test Driving Schedule* (HFEDS ou HWFET) et US6 (voir figure 1.12).

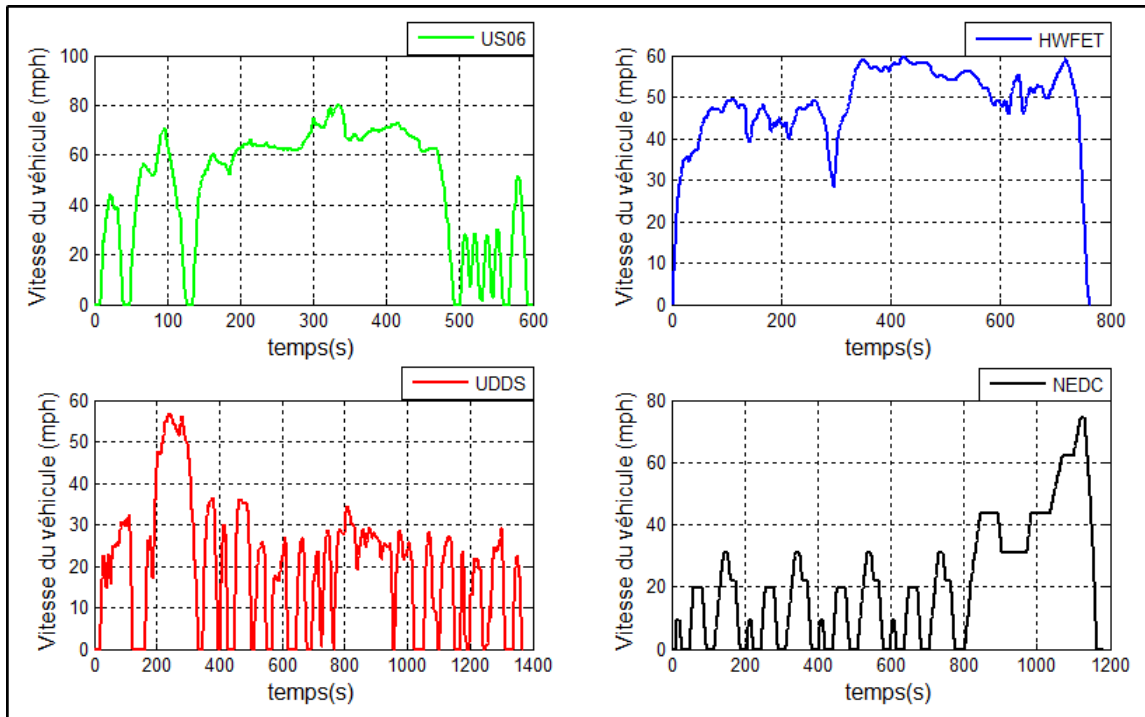


Figure 1.12 Graphiques des profils de conduite US06, HWFET, UDDS et NEDC

1.5 Les outils de simulation

1.5.1 Le logiciel ADVISOR

ADVISOR (**Ad**vanced **Ve**hicle **Simulat**OR) a été conçu en 1994 par le NREL (*National Renewable Energy Laboratory*) dans le but de soutenir le programme de recherche sur la propulsion hybride du département à l'énergie des États-Unis (DOE). Jusqu'en 2003, le logiciel avait été distribué gratuitement par le NREL. Puis, il a été commercialisé et dès 2012, il est à nouveau disponible par téléchargement gratuit du site web « <http://bigladdersoftware.com/advvisor/> » (la version disponible est donc celle disponible en 2003).

ADVISOR est un logiciel à code source ouvert qui fonctionne dans l'environnement Matlab/Simulink (les données du véhicule sont fournies dans des fichiers Matlab et les

modèles sont développés dans Simulink). Il permet de faire des simulations de différents types de véhicules : conventionnels, électriques, hybrides (série, parallèle ou à PAC) afin d'évaluer les performances d'un véhicule suivant un profil de conduite déterminé. ADVISOR indique si le véhicule a pu suivre le profil de conduite, la quantité de combustible et/ou d'énergie électrique requise, l'état de charge de l'élément de stockage, les crêtes de puissances des composantes. Les blocs servant à modéliser le véhicule sont construits au moyen des tables de recherche (*look-up tables*) à partir des mesures effectuées en laboratoire pour chaque composante.

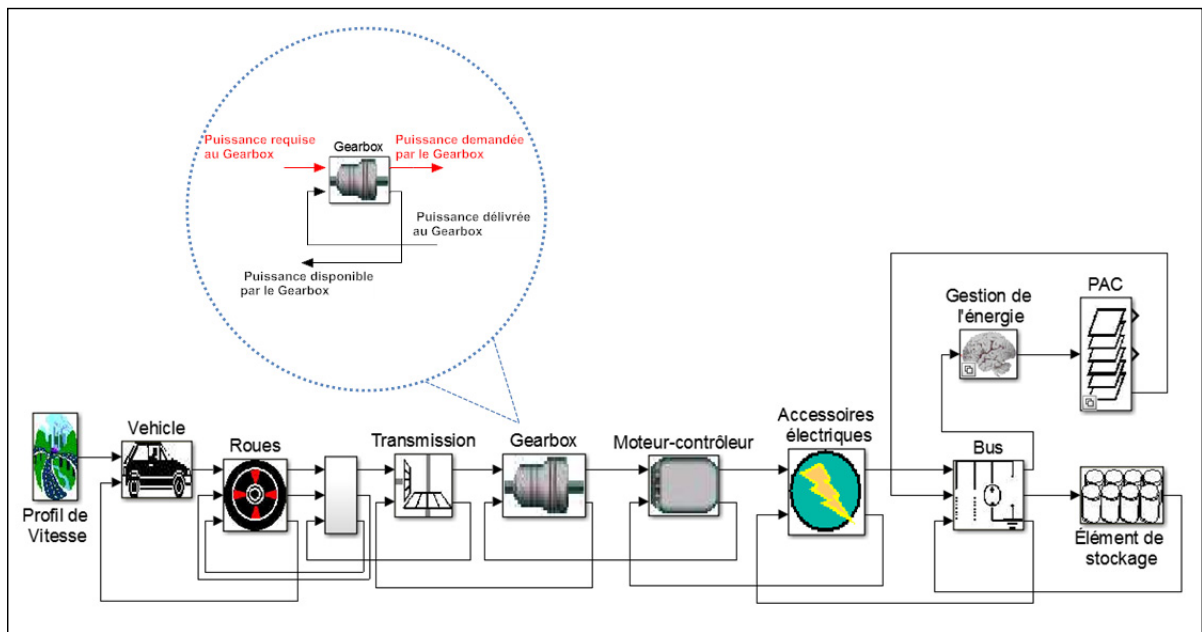


Figure 1.13 Schéma d'un véhicule à PAC plus élément de stockage développé en ADVISOR

L'échange d'informations entre les blocs se fait en termes de puissance comme il sera expliqué dans la suite (voir dans le cercle de la figure 1.13) : dans un premier temps, à partir du profil de vitesse donné, la puissance requise pour chaque bloc est passée vers l'arrière jusqu'à trouver la puissance requise aux sources d'énergie (simulation *Backward-facing*). Dans un deuxième temps, la puissance disponible à partir des sources d'énergie est passée

vers l'avant à travers de chaque bloc jusqu'aux roues où le couple de traction et la vitesse pouvant être développés par le véhicule sont calculés (simulation *forward-facing*).

Il faut prendre en compte que :

- ADVISOR est un outil d'analyse plutôt qu'un outil précis de conception ou de dimensionnement;
- les modèles des composants dans ADVISOR sont quasi-statiques ne permettant pas la prédiction de phénomènes d'une durée de moins d'une seconde;
- des vibrations physiques, des oscillations de champs électriques et d'autres dynamiques ne peuvent pas être capturées en utilisant ADVISOR.

1.5.2 Matlab/Simulink

Matlab/Simulink comporte des outils dont SimDriveline et SimPowerSystems permettant de réaliser la modélisation d'un véhicule hybride par modèles dynamiques. SimPowerSystems fournit les composantes pour modéliser les systèmes électriques alors que SimDriveline, les composantes pour modéliser les systèmes mécaniques. Dans SimPowerSystems (SPS), les modèles dynamiques des sources (pile à combustible, batterie, supercondensateur) et des machines électriques (synchrone, d'induction et à courant continu) sont directement disponibles comme blocs (figure 1.14). En ce qui concerne les convertisseurs de puissance (hacheurs, onduleurs), on peut les modéliser à l'aide des blocs des bibliothèques « *Elements* » et « *Power electronics* » ou se servir des blocs des bibliothèques « *AC drive* » et « *DC drive* ».

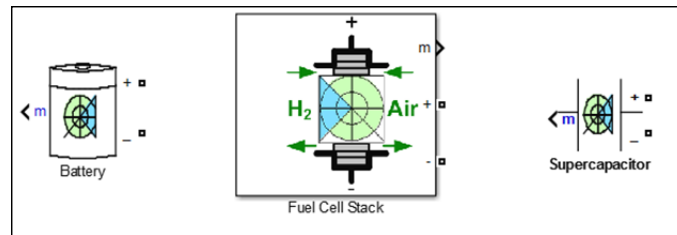


Figure 1.14 Librairie *Extra Sources* de SimPowerSystems

Dans SimDriveline, les librairies de la figure 1.15 comportent les modèles dynamiques pour la modélisation du système de transmission et du châssis. Ces librairies appartiennent à la première génération de la version 1 de SimDriveline. À partir de Matlab **R2011a**, SimDriveline a changé à la version 2.0 avec des modèles de seconde génération. La version 1.0 de SimDriveline est incluse dans la version 2.0. Pour visualiser les librairies de cette version, il faut juste lancer la commande *driveline* ou *drivelib*, à partir du prompt de Matlab (les modèles de la version 2 apparaissent par défaut dans le navigateur de Simulink).

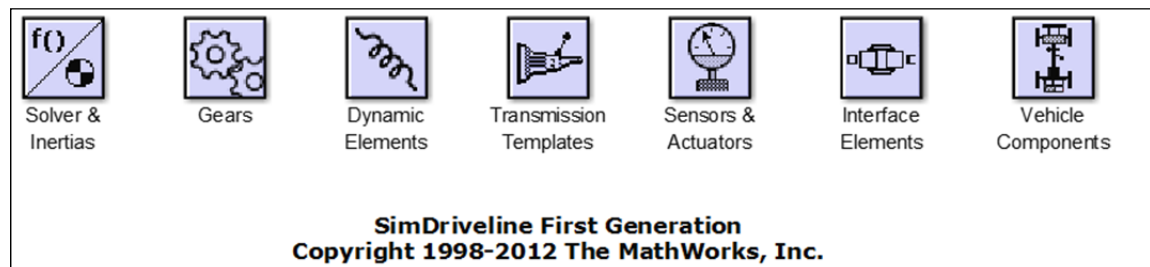


Figure 1.15 Librairies de SimDriveline première génération

La figure 1.16 présente les blocs de SimDriveline utilisés pour la modélisation du système de transmission et du châssis.

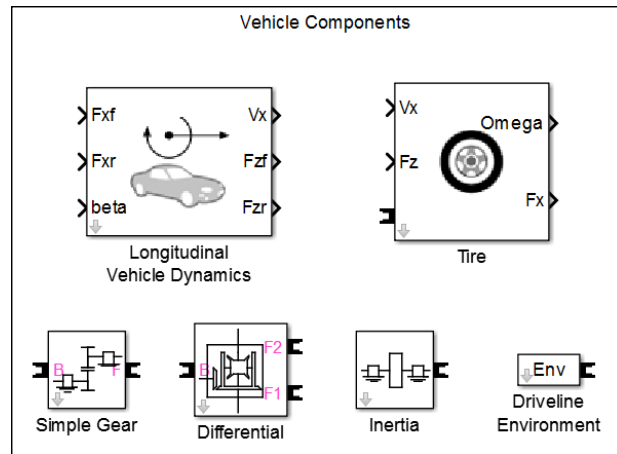


Figure 1.16 Blocs de SimDriveline utilisés pour la modélisation du système de transmission et du châssis

1.6 Simulations vers l'arrière (*backward-facing*) et vers l'avant (*forward-facing*)

Comme indiqué au point 1.5.1, dans une simulation *backward-facing*, la puissance de traction requise aux roues est calculée à chaque instant (à chaque pas de simulation) à partir du profil de vitesse à suivre. Bloc par bloc, le flux de puissance est calculé vers l'arrière par la prise en compte des pertes jusqu'à la source de consommation d'électricité ou de combustible. Cette méthode suppose que le système peut fournir la puissance requise afin de suivre parfaitement le profil de vitesse.

Par contre, la simulation *forward-facing* (différente de celle-ci définie par ADVISOR) utilise un modèle du conducteur constitué d'un contrôleur proportionnel intégral et d'un comparateur qui à partir de la différence entre la vitesse désirée (le profil de vitesse utilisé) et la vitesse actuelle du véhicule détermine une commande de traction ou de freinage. La commande de traction est par la suite transformée dans un couple de traction de référence pour le système moteur-contrôleur qui produira le couple aux roues. La vitesse du véhicule sera calculée et envoyée de retour au modèle du conducteur. D'un autre côté, la commande de freinage sera traduite comme un couple de friction aux roues.

1.7 Mode de maintien de charge (*charge sustaining*) et d'épuisement de charge (*charge depleting*)

Les définitions de mode de maintien de charge et d'épuisement de charge sont utilisées lors du fonctionnement d'un véhicule hybride. Le mode d'épuisement de charge signale le fonctionnement du véhicule en mode purement électrique, c'est-à-dire que dans ce mode seulement l'énergie de l'ES (la batterie ou le supercondensateur) est utilisée pour faire fonctionner le véhicule comme s'il s'agissait d'un véhicule purement électrique (EV). Le mode de fonctionnement d'épuisement de charge change à mode de maintien de charge lorsque le SOC minimal de l'ES est atteint. À ce moment, c'est la source principale qui fournit de l'énergie pour la conduite du véhicule et la recharge de l'ES.

1.8 Conclusions

Dans ce premier chapitre, on a présenté les différentes architectures des véhicules : conventionnels, EV, HEV, SHEV, PHEV, SPHEV, FCHEV. On a signalé que le véhicule hybride à PAC ou FCHEV est caractérisé par la même structure qu'un véhicule SHEV dont le groupe moteur de combustion-générateur est remplacé par une PAC. Ensuite, les composants du véhicule hybride à PAC ont été présentés, à savoir la PAC, l'ES, le moteur électrique, le véhicule, la transmission mécanique, les roues, les convertisseurs de puissance. Les formules nécessaires pour la modélisation de la PAC sont obtenues ainsi que les formules pour le calcul de la puissance du moteur électrique et du SOC des éléments de stockage. Ces formules serviront à dimensionner l'élément de stockage, le moteur électrique et la PAC dans le chapitre suivant. On a conclu ce chapitre en présentant les outils de simulation ADVISOR et Matlab/Simulink et les concepts de simulation vers l'arrière, de simulation vers l'avant, de mode d'épuisement de charge et de mode de maintien de charge.

CHAPITRE 2

MODÉLISATION D'UN VÉHICULE ÉLECTRIQUE À PAC

Ce chapitre présente les étapes à suivre pour la construction du modèle d'un véhicule électrique à PAC qui servira à tester les algorithmes de gestion de l'énergie développés dans les chapitres suivants. Tout d'abord, les caractéristiques du design du véhicule à modéliser doivent être spécifiées ainsi que les paramètres de performance du véhicule, à savoir la vitesse maximale, le temps d'accélération et la pente maximale. Ça nous permet de déterminer la puissance du moteur électrique nécessaire à la conduite du véhicule. Pour déterminer les caractéristiques des sources primaire et secondaire du véhicule, il faut prendre en compte l'architecture électrique du véhicule, les tâches à exécuter pour chacune des sources lors de la conduite du véhicule et le profil de conduite à suivre. Dans ce chapitre, l'architecture électrique choisie est différente de celle présentée au chapitre précédent (figure 1.11). Dans ce cas-ci, l'élément de stockage sera connecté directement au bus CC et déterminera la tension à ce point.

2.1 Caractéristiques du véhicule

Les paramètres du véhicule à modéliser sont présentés dans le tableau 2.1. Ces paramètres correspondent à ceux d'un petit véhicule basé sur le modèle Saturn SL1 de 1994.

Tableau 2.1 Spécifications du design du véhicule

Paramètre	Symbole	Value
Masse totale du véhicule	M_v	1380 kg
Accélération de la pesanteur	g	9.81 m/s ²
Coefficient de résistance au roulement	f_r	0.009
Coefficient de pénétration dans l'air	C_D	0.335
Masse volumique de l'air	ρ_a	1.2 kg/m ³
Surface frontale du véhicule	A_f	2.0 m ²
Rayon de la roue	r_d	0.282 m
Hauteur du CG au-dessus du sol	h	0.5 m
Distance du CG à l'axe des roues avant	a	1.3 m
Distance du CG à l'axe des roues arrière	b	1.3 m
Rendement du système de transmission	n_t	0.95
Rendement du moteur	n_m	0.9
Facteur de la masse	δ	1.035

Le tableau 2.2 présente les paramètres de performance du véhicule qu'il faut prendre en compte lors du dimensionnement des éléments du véhicule.

Tableau 2.2 Paramètres de performance du véhicule

Paramètre	Symbole	Value
Vitesse maximale du véhicule	V_{max}	160 km/h (@ $N_{max_moteur} = 12500 \text{ rpm}$)
Temps d'accélération de 0 à 100 km/h	t_a	10 s
Pente maximale	i_{max}	5% à 100 km/h

2.2 Dimensionnement de la pile à combustible et de l'élément de stockage

En vue du dimensionnement des sources primaire et secondaire du véhicule, c'est-à-dire la pile à combustible et l'élément de stockage, les fonctions de cette dernière doivent être définies préalablement. Les fonctions suivantes peuvent être considérées pour l'ES (Markel et al, 2003, p. 3) :

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

Dans le but de simplifier la tâche de dimensionnement, dans un premier temps, on peut faire les suppositions suivantes :

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

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

À vitesse constante, la puissance de traction du moteur donnée par l'équation 1.87 devient :

$$P_m = \frac{(M_v \cdot g \cdot (f_r + i) + \frac{1}{2} \rho_a \cdot A_f \cdot C_D \cdot V^2) \cdot V}{n_t} \quad (2.1)$$

Aussi, selon le tableau 2.2, le véhicule doit accélérer à la vitesse finale (V_f) de 100 km/h (27,78 m/s) en 10 secondes. Avec cette valeur de vitesse et en prenant comme vitesse de base (V_b) 38 km/h (10,56 m/s), la puissance de traction du moteur pour accélérer le véhicule en fonction du temps d'accélération t_a (donnée par l'équation 1.88) devient :

$$P_{t_a} = \frac{\frac{\delta M_v}{2t_a} \cdot (27,78^2 + 10,56^2) + \frac{2}{3} \cdot M_v \cdot g \cdot f_r \cdot (27,78) + \frac{1}{5} \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot C_D \cdot (27,78)^3}{n_t} \quad (2.2)$$

À la figure 2.1, les courbes de la puissance de traction du moteur versus vitesse constante (pour des pentes de 0% et 5%) et versus temps d'accélération sont présentées. Elles sont générées par un programme Matlab (voir Algorithme-A I-1) utilisant les équations 2.1 et 2.2. On peut voir dans cette figure qu'une puissance du moteur de 40 kW suffit pour conduire le véhicule à vitesse constante tout en satisfaisant les performances de pente maximale et de vitesse maximale constante alors qu'une puissance du moteur de 80 kW est nécessaire pour accélérer le véhicule de 0 à 100 km/h en 10 secondes.

Le rapport entre la puissance mécanique du moteur (P_m), la puissance de la PAC (P_{PAC}) et la puissance de l'élément de stockage (P_{ES}) est donné par l'expression suivante :

$$P_{ES} = \frac{P_m}{n_m} - P_{PAC} \quad (2.3)$$

Où n_m est le rendement du moteur comme indiqué dans le tableau 2.1 (on suppose que les rendements du convertisseur de la PAC et de l'onduleur sont de 100%) :

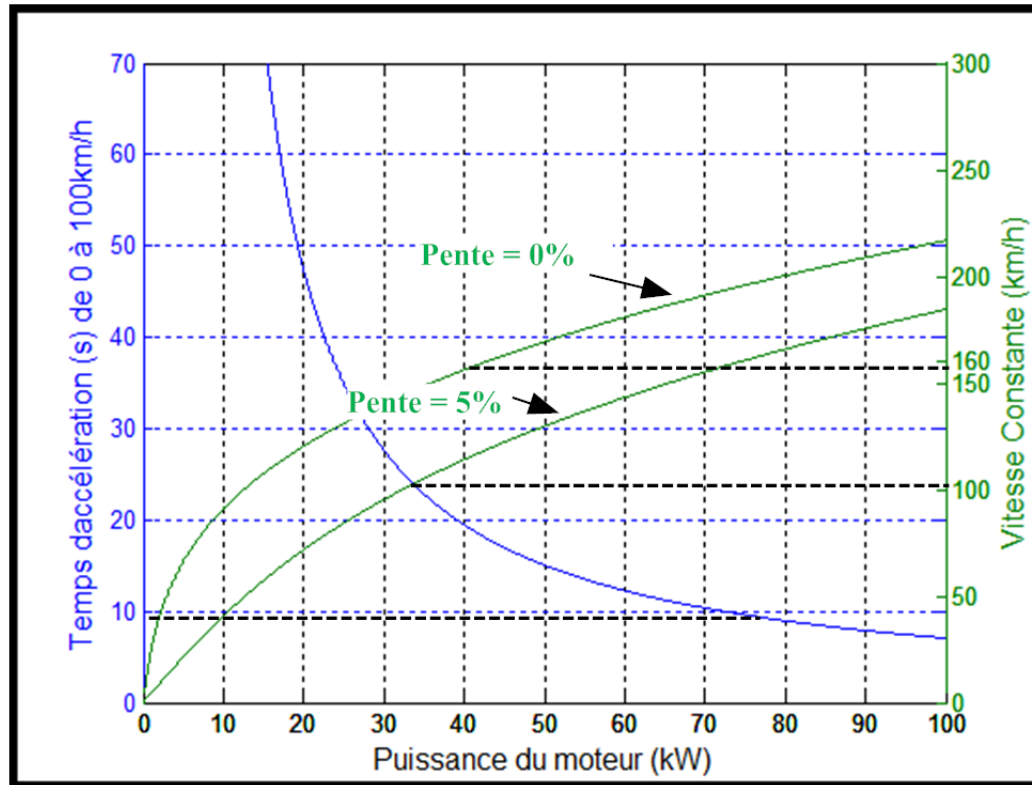


Figure 2.1 Puissance du moteur vs temps d'accélération et vs vitesse constante

Selon l'hypothèse 1, la PAC devra fournir la puissance demandée pour l'opération du véhicule à vitesse constante sur une route plate ou en pente, sans le soutien de l'élément de stockage. Alors, en utilisant l'équation 2.3, la puissance de la PAC est obtenue :

$$0 = \frac{40kW}{0.9} - P_{PAC} \Rightarrow P_{PAC} = 44.44kW \quad (2.4)$$

On choisit $P_{PAC} = 50 \text{ kW}$

Pour déterminer la puissance et la capacité de l'ES, on prendra en compte le profil de conduite à suivre. Les profils de conduite à considérer sont : les cycles de conduite urbaine (*Urban Dynamometer Driving Schedule* : UDDS), d'autoroute (*HighWay Fuel Economy Test Driving Schedule* : HFEDS ou HWFET) et US6. Les courbes de puissance et d'énergie pour

chacun de ces profils de conduite ont été générées avec un programme Matlab, Algorithme-A I-2, et sont présentées à la figure 2.2.

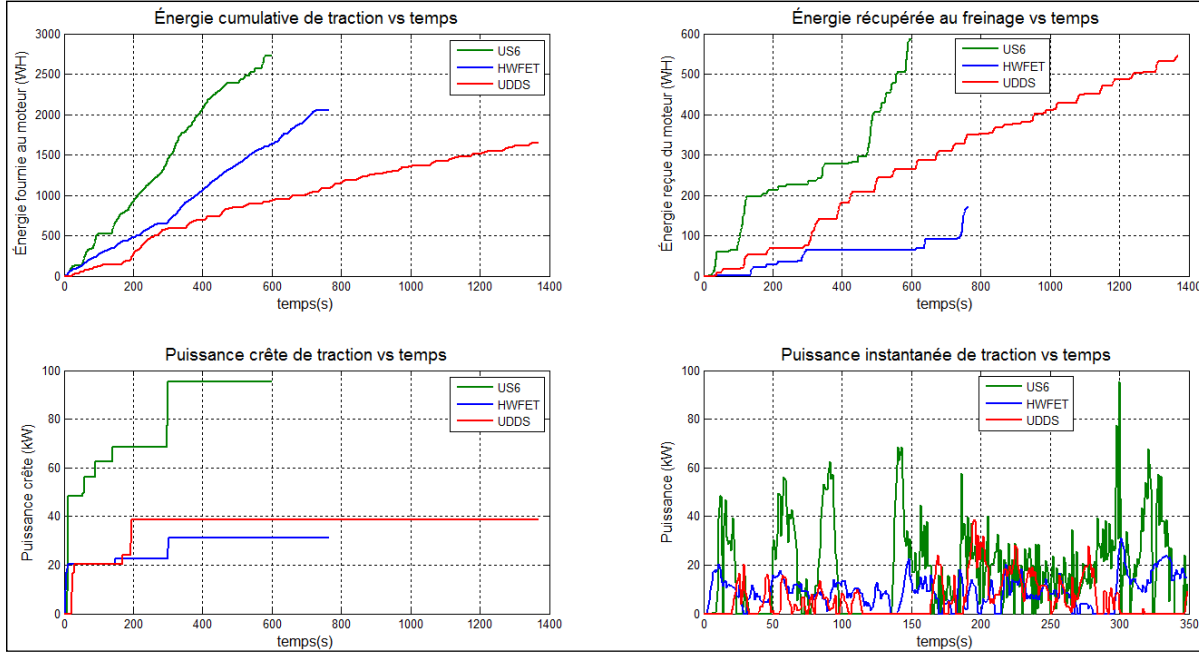


Figure 2.2 Graphiques de puissance et d'énergie pour les profils de conduite US6, urbaine (UDDS) et d'auto route (HWFET)

De l'hypothèse 2, l'ES doit soutenir la PAC dans les accélérations et dans les pics de puissance de la charge. Comme on peut le voir à la figure antérieure, la valeur maximale de puissance se trouve dans le cycle de conduite US6 (puissance de crête de 95 kW). En utilisant à nouveau l'équation 2.3 et avec la puissance de la PAC choisie précédemment, la puissance de l'ES est obtenue :

$$P_{ES} = \frac{95kW}{0.9} - 50kW \Rightarrow P_{ES} = 55.56kW \quad (2.5)$$

On choisit $P_{ES} = 60 kW$

Et comme la puissance du moteur (P_m), 100kW.

Le cycle de conduite US6 génère aussi la plus grande récupération d'énergie lors de freinages (600 W.h). Cette valeur peut nous servir à faire un premier dimensionnement de la capacité de l'élément de stockage. En fait, la distribution de l'énergie dépend aussi de l'algorithme de gestion de l'énergie qui doit conserver l'état de la charge de l'ES entre les valeurs maximale et minimale.

Pour déterminer les caractéristiques de la batterie et du supercondensateur, nous nous servirons des spécifications des deux produits commerciaux présentés dans les figures 2.3 et 2.4. Celles-ci correspondent aux modules de supercondensateurs de la marque NESSCAP (on choisit le module identifié par le numéro de pièce : EMHSR-0166C0-048R0S) et aux modules de batteries Ni-MH de SAFT (on choisit le module identifié par la référence : NHE 10-100). Le coût d'un module de batteries est de 500 dollars É.-U., et celui d'un module de supercondensateurs est de 1200 dollars É.-U.

Rated Capacitance (F)	Internal Resistance (mΩ)		Max Current ¹ (A)	Leakage Current (mA)	Stored Energy (Wh)	Specific Energy (Wh/kg)	Nominal Weight (kg)	Part Number
Discharge with constant current at 25°C	AC (100Hz)	DC	1 sec discharge rate to 1/2V _R	72 hours at 25°C	at V _R	Gravimetric		
36	< 10.8	< 13.0	580	< 1.5	11.8	1.38	8.5	EMHSR-0036C0-048R0S
66	< 8.6	< 10.4	920	< 2.7	21.7	2.17	10.0	EMHSR-0066C0-048R0S
88	< 7.3	< 8.9	1,160	< 3.0	28.9	2.51	11.5	EMHSR-0088C0-048R0S
111	< 6.0	< 7.1	1,460	< 4.2	36.4	2.91	12.5	EMHSR-0111C0-048R0S
166	< 4.8	< 5.6	2,030	< 5.2	54.5	3.63	15.0	EMHSR-0166C0-048R0S
Rated Voltage, V _R			48.6V DC					
Surge Voltage			51.3V DC					

Figure 2.3 Spécifications du supercondensateur
(Modules de 48V de NESSCAP)

Module characteristics		
High energy modules	NHE 10-100	NHE 5-200
Electrical characteristics		
Nominal voltage (V)	12	6
Rated capacity at C/3, after charge at constant current (Ah)	100	200
Specific energy (Wh/kg)	66	66
Energy density (Wh/l)	137	137
Specific power (W/kg)	150	150
Power density (W/l)	310	310
Dimensions		
Height (mm)	195	195
Length (mm)	390	390
Width (mm)	120	120
Weight (kg)	18.6	18.6

Figure 2.4 Spécifications de la batterie
(Modules de batteries NHE Ni-MH de Saft)

Pour le cas de la batterie, on utilise les équations déterminées à la section 1.3.2.1. Comme il a été indiqué précédemment, l'élément de stockage sera connecté directement au bus CC et déterminera la tension du bus CC (V_{bus_CC}). On choisit la tension nominale de l'ES égale à 288 VCC, qui sera aussi la tension d'entrée de l'onduleur qui commandera le moteur électrique. De plus, on considère que la batterie aura un SOC maximal (SOC_{max}) égal à 80 % et un SOC minimal (SOC_{min}) égal à 40 %.

Donc :

$$DOD = 80\% - 40\% = 40\% \quad (2.6)$$

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

$$E_{totale_bat} = \frac{E_{utilisable_bat}}{\%DOD} = \frac{600Wh}{0.4} = 1500Wh \quad (2.7)$$

Selon la fiche technique des batteries (voir la figure 2.4), la tension nominale d'un module de batteries (V_{nom_1bat}) est de 12 V. Donc, le nombre de modules de batteries connectés en série est :

$$N_{bat} = \frac{V_{bus_CC}}{V_{nom_1bat}} = \frac{288V}{12V} = 24 \quad (2.8)$$

Si l'on considère la tension maximale par module de batteries (V_{max_1bat}) égale à 15.675V (V_{min_bat} = 9.135 V), la capacité minimale des batteries est :

$$C_{min_bat} = \frac{E_{totale_bat}}{V_{max_bat}} = \frac{1500Wh}{15.675 \times 24} \approx 4Ah \quad (2.9)$$

Aussi, d'après les spécifications, le poids d'un module de batteries ($Weight_{1bat}$) est de 18.6 kg et l'énergie spécifique ($E_{specifique}$), 66Wh/kg. Donc, l'énergie disponible de la connexion de 24 modules de batteries en série est :

$$E_{24bat_serie} = E_{specifique} \times Weight_{1bat} \times N_{bat} = 66 \frac{Wh}{kg} \times 18.6kg \times 24 = 29462.2Wh \quad (2.10)$$

Cette valeur est beaucoup plus grande que la valeur de E_{totale_bat} calculée en 2.7. Donc, la batterie pourrait récupérer l'énergie lors de freinages et fournir de la puissance de traction lors du démarrage de la PAC. On peut aussi parvenir à la même conclusion du fait que la capacité

nominale des batteries selon les spécifications (100 Ah) est plus grande que la capacité minimale C_{min_bat} (4 Ah) nécessaire pour récupérer toute l'énergie lors de freinages.

La puissance spécifique ($P_{spécifique}$) est égale à 150 W/kg. Donc, la puissance disponible de la connexion de 24 modules de batteries en série est :

$$P_{24bat_serie} = P_{spécifique} \times Weight_{1bat} \times N_{bat} = 150 \frac{W}{kg} \times 18.6kg \times 24 \approx 67KW \quad (2.11)$$

qui correspond à la puissance de l'ES de 60 kW déterminée auparavant.

Si l'on utilise le supercondensateur comme l'ES, ses caractéristiques seront déterminées par les équations de la section 1.3.2.2.

D'après les spécifications d'un module de SC identifié avec le numéro de pièce EMHSR-0166C0-048R0S (figure 2.3), la tension nominale (V_{nom_1sc}) est de 48.6V. Donc, avec V_{bus_CC} égale à 288 VCC, le nombre de modules de SC connectés en série est :

$$N_s = \frac{V_{bus_CC}}{V_{nom_1sc}} = \frac{288V}{48.6V} \approx 6 \quad (2.12)$$

Si l'on considère que la tension à vide minimale (V_{0min}) est égale à 30% de la tension à vide maximale (V_{0max}) (le SOC varie entre 70 % et 100 %), alors, l'énergie maximale ($E_{sc\max}$) qui peut être stockée dans le SC résulte :

$$E_{sc\max} = \frac{E_{utilisable_sc}}{\left(1 - \frac{V_{0min}^2}{V_{0max}^2}\right)} = \frac{600Wh}{\left(1 - \frac{(30\%V_{0max})^2}{V_{0max}^2}\right)} = \frac{600Wh}{0.91} = 660Wh \quad (2.13)$$

Aussi, selon la fiche technique, la tension maximale que le module du SC peut supporter (V_{\max_1SC}) est de 51.3V. Donc, pour 6 modules de SC connectés en série, la tension maximale (V_{\max_SC}) est égale à 307.8V et la capacité minimale du supercondensateur en farads [F] est :

$$C_{\min_sc} = \frac{E_{sc_max}}{\frac{1}{2} \cdot V_{0\max}^2} = \frac{660 \times 3600}{\frac{1}{2} \cdot (307.8V)^2} \approx 50F \quad (2.14)$$

Le poids d'un module de SC ($Weight_{1sc}$) est de 15 kg. Dans le diagramme de *Ragone* (figure 1.6), on peut voir que la puissance spécifique du SC ($P_{spécifique_sc}$) est au moins 1000W/kg. Donc, la puissance disponible de la connexion de 6 modules de SC en série résulte :

$$P_{6sc_serie} = P_{spécifique_sc} \times Weight_{1sc} \times N_{sc} = 1000 \frac{W}{kg} \times 15kg \times 6 = 90kW \quad (2.15)$$

qui correspond à la puissance de l'ES de 60kW déterminée précédemment.

De plus, selon la fiche technique, l'énergie spécifique du SC ($E_{spécifique_sc}$) est de 3.63Wh/kg. Donc, l'énergie disponible de la connexion de 6 modules de SC en série est :

$$E_{6sc_serie} = E_{spécifique_sc} \times Weight_{1sc} \times N_{sc} = 3.63 \frac{Wh}{kg} \times 15kg \times 6 = 326.7Wh \quad (2.16)$$

Il faudra connecter en parallèle un autre groupe de 6 modules de SC en série afin de récupérer toute l'énergie lors du freinage. On peut aussi obtenir ce résultat, en faisant le calcul de la capacité du SC. La capacité obtenue par la connexion en parallèle de N_p groupes de N_s modules de SC en série est :

$$C_{sc} = \frac{C_{1sc}}{N_s} \times N_p = \frac{166}{6} \times 2 \approx 55F \quad (2.17)$$

Les tableaux 2.3 et 2.4 présentent un résumé des caractéristiques du système de batteries et du système de SC.

Tableau 2.3 Caractéristiques du système de batteries
(Modules NHE Ni-MH de la marque SAFT)

Paramètre	Symbole	Value
Nombre de modules de batterie en série	N_{bat}	24
Capacité nominale	C_{n_bat}	100 Ah
Tension nominale	V_{n_bat}	288 V
Tension maximale	V_{max_bat}	376 V
Tension minimale	V_{min_bat}	219 V
Énergie disponible	E_{24bat_serie}	29462.2 Wh
Puissance disponible	P_{24bat_serie}	67 kW
Poids		446.4 kg
Coût		US\$ 12000

Tableau 2.4 Caractéristiques du système de SC
(Modules NESSCAP de 48V)

Paramètre	Symbole	Value
Nombre de modules de SC en série	N_s	6
Nombre de groupes de SC en parallèle	N_p	2
Capacité nominale	C_{n_sc}	55 F
Tension nominale	V_{n_sc}	291.6 V
Tension maximale	V_{max_sc}	307.8 V
Tension minimale	V_{min_sc}	215 V
Énergie disponible	E_{6Ns_2Np}	653.4 Wh
Puissance disponible	P_{6sc_serie}	90 kW
Poids		180 kg
Coût		US\$ 14400

Pour déterminer les caractéristiques de la PAC, on utilise les données du modèle **FC_ANL50H2_p** que l'on trouve dans le logiciel ADVISOR et qui est caractérisé par sa courbe de polarisation (tableau 2.5).

Tableau 2.5 Paramètres de la pile à combustible
(Modèle FC_ANL50H2_p du logiciel ADVISOR)

Description	Nom de la Variable	Value
Puissance maximale nette	-	50 kW
Surface d'une cellule	<i>fc_cell_area</i>	769/100/100 [m^2]
Nombre de cellules en série	<i>fc_cell_num</i>	145
Nombre de Piles en série par chaîne	<i>fc_stack_num</i>	1
Nombre de chaînes en parallèle	<i>fc_string_num</i>	1
Mise en échelle de la puissance	<i>fc_pwr_scale</i>	1
Densité de courant de la cellule	<i>fc_I_map</i>	[7.6 55.6 76.9 97.9 183.5 277.3 389.1 538.5]/ <i>fc_cell_area</i> ; [A/m^2]
Tension de la cellule (Indexée par <i>fc_I_map</i>)	<i>fc_V_map</i>	([143.3 134 131.8 130 123.5 117.2 110 100]/ <i>fc_cell_num</i>) \times <i>fc_pwr_scale</i> ; [V]
Puissance nette du système	<i>fc_pwr_map</i>	[0 5 7.5 10 20 30 40 50] \times 1000; [W]
Rendement du système (Indexée par <i>fc_pwr_map</i>)	<i>fc_eff_map</i>	[0 49.2 53.3 55.9 59.6 59.1 56.2 50.8]/100

Les graphiques des courbes de polarisation, de puissances et de rendement de cette PAC sont obtenues avec un programme Matlab, Algorithme-A I-3, et présentées aux figures 2.5 et 2.6.

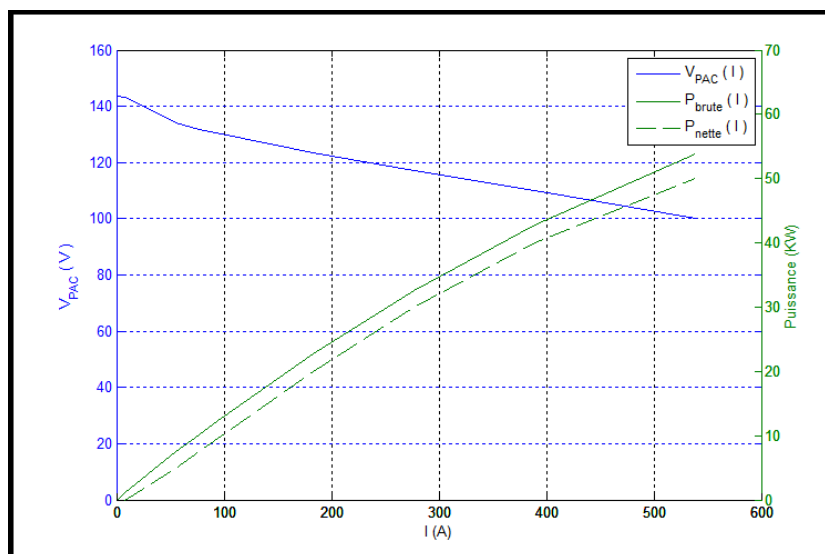


Figure 2.5 Courbe de polarisation (V_{PAC} vs I_{PAC}) et courbes de puissance brute et nette (Modèle FC_ANL50H2_p du logiciel ADVISOR)

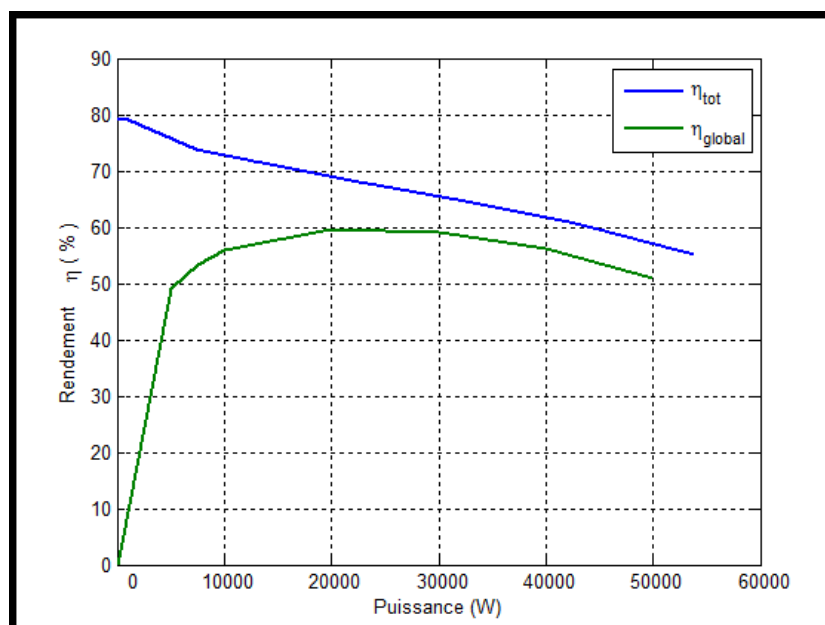


Figure 2.6 Rendement total et global de la PAC en fonction de la puissance (Modèle FC_ANL50H2_p du logiciel ADVISOR)

2.3 Modélisation en Matlab/Simulink

Le schéma d'un véhicule à traction arrière est présenté dans la figure 2.7. L'arbre du moteur est lié aux roues par les engrenages et le différentiel. À l'aide des blocs de SimDriveline présentés dans la figure 1.17 du chapitre antérieur et les paramètres du véhicule des tableaux 2.1 et 2.2, on modélise ce système, dénommé « Transmission et Châssis », et le présente à la figure 2.8

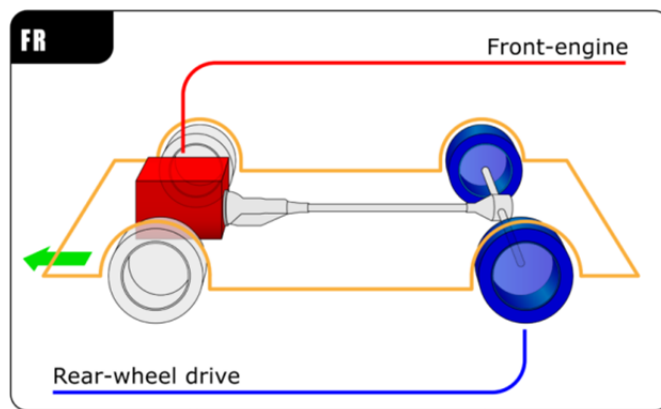


Figure 2.7 Le schéma d'un véhicule à traction arrière

À la figure 2.8, le bloc « *Longitudinal Vehicle Dynamics* » reçoit les forces de traction provenant de chaque roue et l'angle d'inclinaison du sol (β) pour calculer comme sorties la vitesse du véhicule (équation 1.84) et la force normale sur chaque roue ($0.5 \times F_{zr}$). À son tour, le bloc « *tire* » reçoit ces sorties pour transformer le couple à son entrée en une force de traction dans le sens de mouvement du véhicule. Pour sa part, le bloc « *Differential* » transforme le couple autour de l'axe longitudinal en deux couples autour des axes latéraux qui sont connectés à chaque roue. Chaque élément tournant doit avoir un bloc « *inertia* » branché à lui. De plus, pour pouvoir travailler, le *solver* de Simulink a besoin d'un bloc « *Driveline Environment* » branché à une ligne de transmission quelconque du système. Le rapport du bloc « *Simple Gear* » est déterminé en utilisant l'équation 1.90 (avec i_0 égal à 1) et les données des tableaux 2.1 et 2.2 :

$$i_g = \frac{\pi \cdot N_{\max_moteur} \cdot r_d}{30 \cdot V_{\max}} = \frac{\pi \times 12500 \times 0.282}{30 \times 100 \times (1000/3600)} = 8.30 \quad (2.18)$$

Une première simulation peut se faire avec Simulink pour vérifier que la vitesse maximale du véhicule est égale à 160 km/h lorsque l'arbre du moteur tourne à 12500 rpm (N_{\max_moteur}). À la figure 2.8, le mouvement de l'arbre du moteur est obtenu à l'aide d'une source du type rampe et d'un bloc « *Motion Actuator* ». Les résultats de la simulation sont présentés dans la figure 2.9.

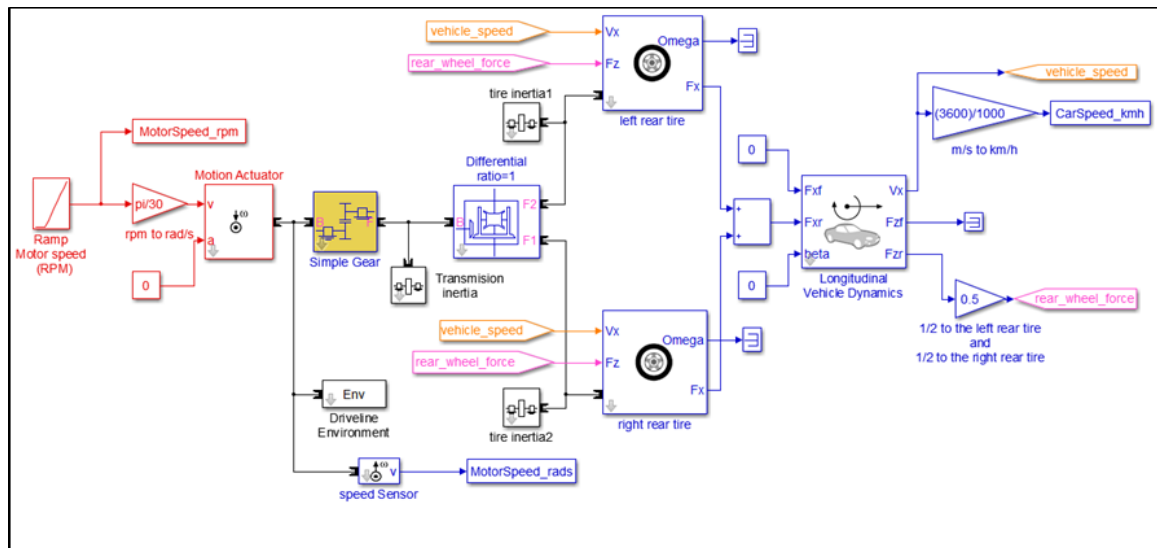


Figure 2.8 Modélisation du système « Transmission et Châssis » en Simulink

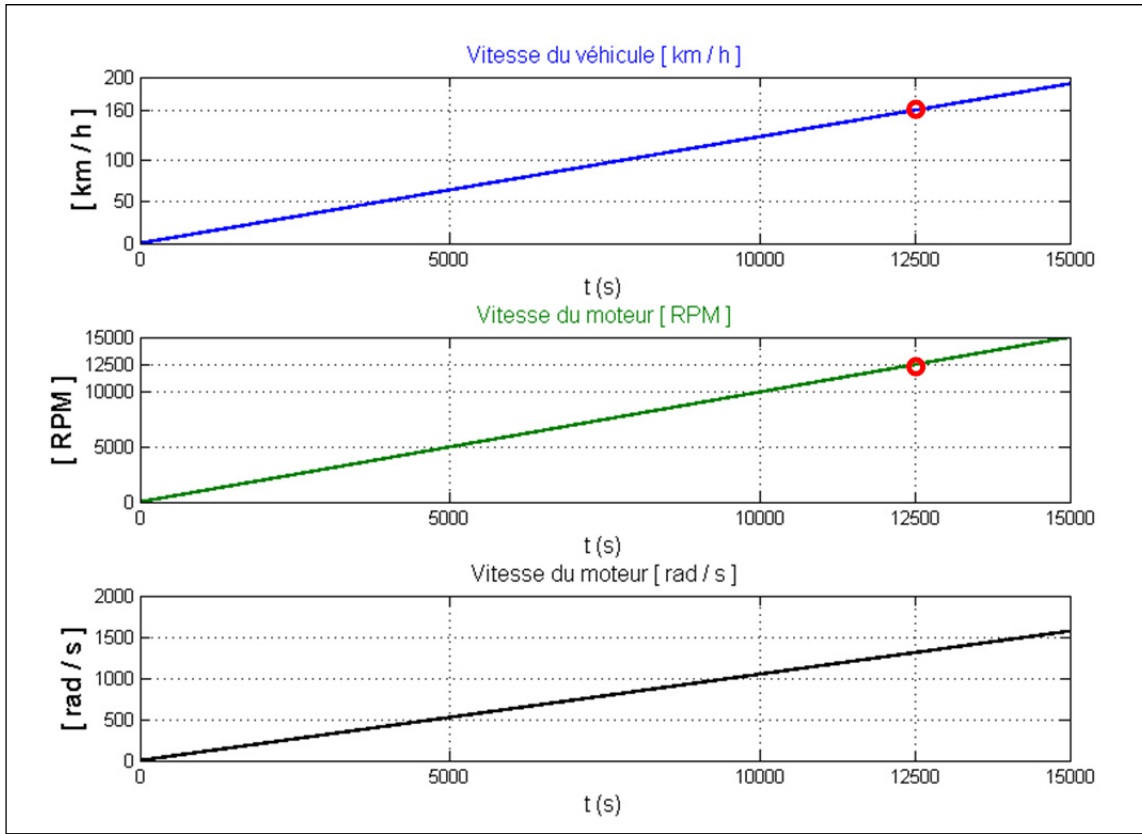


Figure 2.9 Résultats de la simulation du système de la figure 2.8

Le moteur sera modélisé comme une source de courant contrôlable présentée à la figure 2.10. On suppose que le moteur est bien contrôlé par l'onduleur et donne le couple de référence requis pour que le véhicule puisse suivre le profil de conduite établi. La puissance mécanique du moteur est obtenue en multipliant le couple de référence par la vitesse de rotation de l'arbre du moteur. Selon le signe de la puissance mécanique, la puissance électrique est calculée comme :

$$\begin{aligned}
 P_{mec} \geq 0 & \rightarrow P_{elec} = \frac{P_{mec}}{n_m} \\
 P_{mec} < 0 & \rightarrow P_{elec} = P_{mec} \times n_m
 \end{aligned}
 \tag{2.19}$$

La puissance électrique est divisée par la tension du moteur (qui est égale à la tension du bus CC) pour le calcul du courant du moteur (figure 2.10 (a)). Celui-ci contrôlera à son tour une source de courant contrôlable (figure 2.10 (b)).

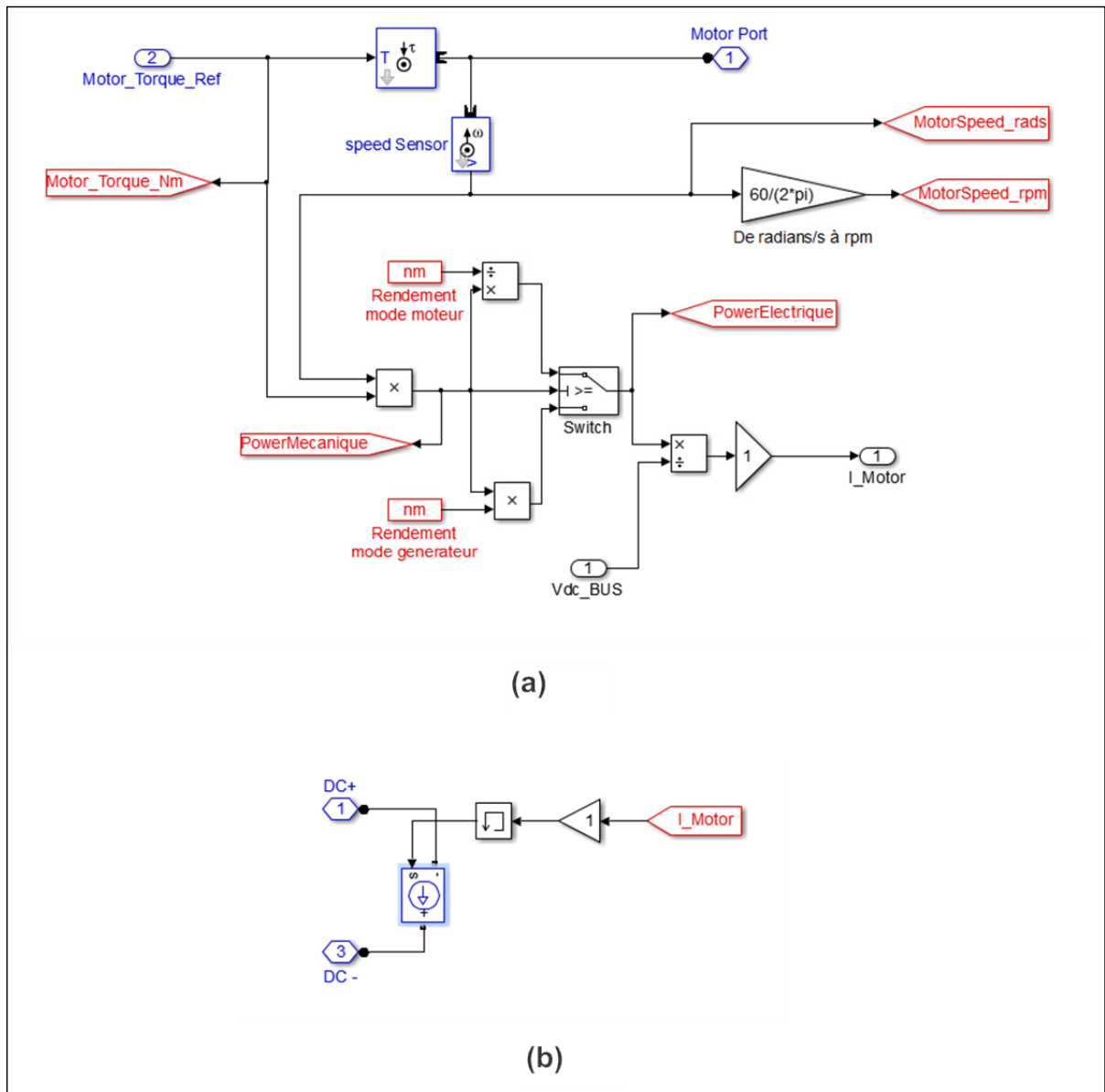


Figure 2.10 Modélisation du moteur électrique

Le modèle présenté à la figure 2.11 simule l'action du conducteur sur les roues du véhicule. Ce modèle consiste d'un contrôleur proportionnel intégral et d'un comparateur et, à partir de

la différence entre la vitesse désirée (le profil de conduite utilisé) et la vitesse actuelle du véhicule, détermine une commande de traction ou de freinage (entre +1 et -1). La commande de traction, qui représente la position de la pédale, est multipliée par la valeur du couple maximal du moteur pour le calcul du couple requis au moteur. D'autre part, le couple disponible au moteur est déterminé à l'aide d'une table de recherche qui a comme entrée la vitesse du véhicule (en km/h). Entre ces deux couples, celui dont la valeur est la plus basse est choisi comme le couple de référence du moteur.

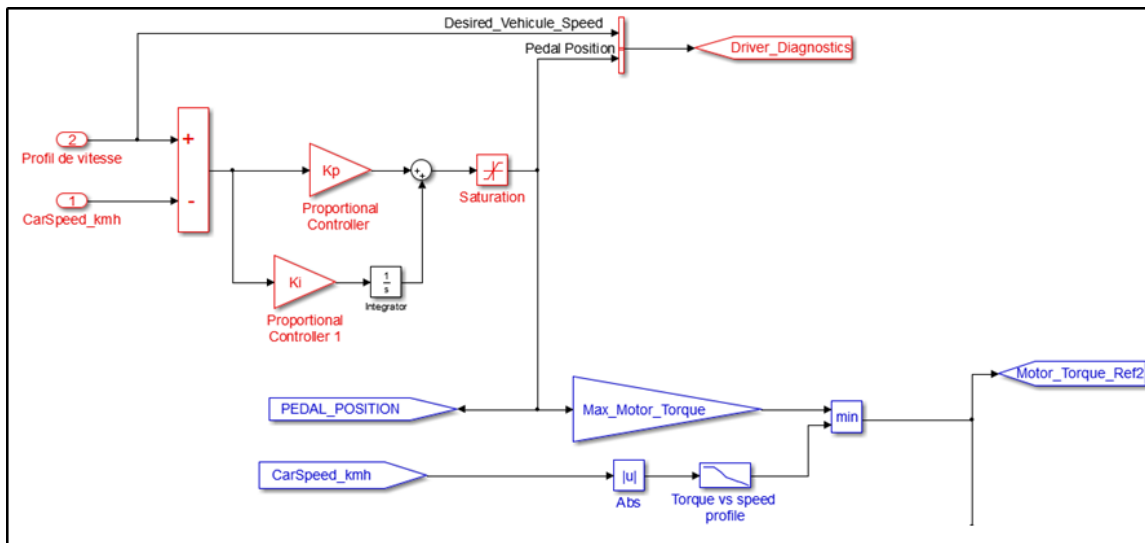


Figure 2.11 Modèle du conducteur

Dans cette partie du mémoire, le véhicule à modéliser est un véhicule à PAC (FCV) sans ES dont la source de puissance est une PAC de 100 kW. La consommation de ce véhicule nous sert de base de comparaison avec la consommation d'un véhicule hybride à PAC (FCHEV) muni d'un système de gestion de l'énergie qui est modélisé par la suite.

La PAC est modélisée à l'aide du bloc « *Fuel Cell Stack* » de SimPowerSystems (SPS). La figure 2.12 présente la boîte de dialogue de ce bloc où les paramètres sont fournis. Ceux-ci sont calculés comme expliqués dans le *help* du bloc et par l'utilisation des données du tableau 2.5 (avec *fc_pwr_scale* égal à 2 afin d'avoir 100 kW). Une brève explication du

fonctionnement du bloc « *Fuel Cell Stack* » est donnée ci-après : d'abord, ce bloc résout l'équations 1.63 et 1.64 pour calculer Uf_{H_2} et Uf_{O_2} , et ensuite, les équations 1.28 et 1.29 pour calculer les pressions partielles p_{H_2} et p_{O_2} (le débit de gaz ou de l'eau par la membrane de la PAC n'est pas pris en compte et la PAC est alimentée en hydrogène pur et en air). Finalement, avec les valeurs obtenues, l'équation de Nernst et la tension de la PAC sont calculées (équation 1.59). La dynamique de la PAC est effectuée avec un filtre de premier ordre qui retarde la chute de tension due aux pertes d'activation (équation 1.35). Le bloc donne comme résultats les paramètres tels que : le courant (I_{PAC}), la tension (V_{PAC}), le rendement de la PAC calculé par $\eta_{tot} \times \eta_{mat}$ (équations 1.45 et 1.46), les consommations d'hydrogène et d'air en litres par minute (lpm).

Pourtant, pour obtenir les caractéristiques d'un générateur à PAC (rendements, puissances), il faut considérer la consommation des auxiliaires. Comme il a été indiqué précédemment, parmi les auxiliaires, la consommation de puissance du compresseur est la plus importante et celle-ci est proportionnelle au courant de la PAC. La puissance d'autres auxiliaires peut être considérée constante (Blunier et Miraoui, 2007). Le comportement du compresseur peut être émulé par la connexion d'une source de tension CC, dont la polarité est inversée par rapport à celle de la PAC, en série avec la PAC (Blunier et Miraoui, 2007). La tension résultante après la chute due au compresseur est la tension nette du générateur à PAC (V_{net_PAC}). D'autre part, la consommation de puissance constante due à d'autres auxiliaires (pompe, ventilateur, etc.) est simulée moyennant une source de courant contrôlée par le courant obtenu après diviser la puissance constante par V_{net_PAC} .

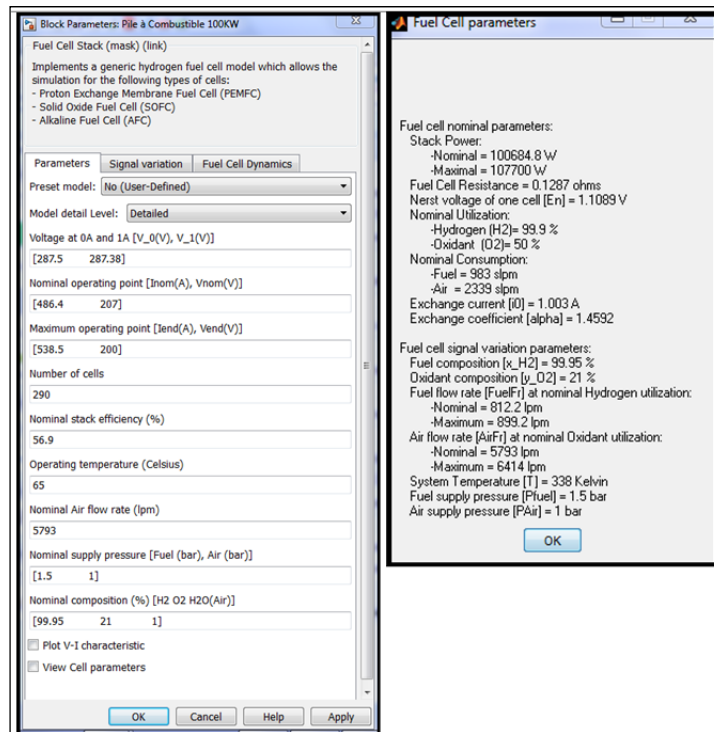


Figure 2.12 Boîte de dialogue du bloc « *Fuel Cell Stack* » (PAC de 100 kW)

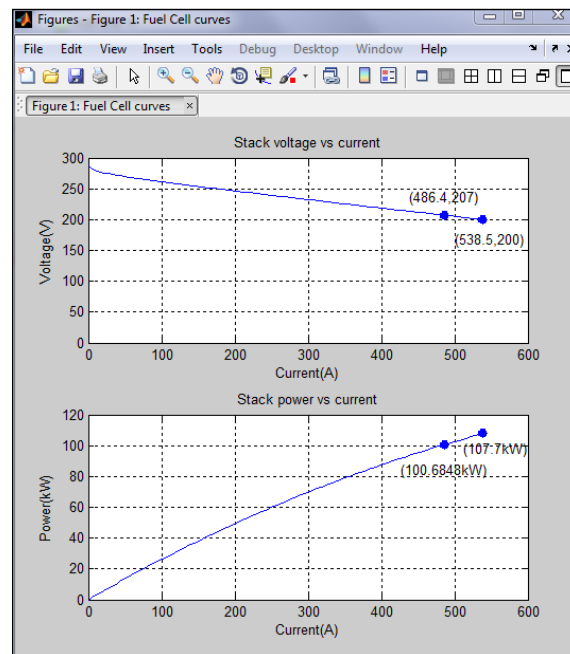


Figure 2.13 Courbes de polarisation (V_{PAC} vs I_{PAC}) et de puissance générées par le bloc « *Fuel Cell Stack* » (PAC de 100 kW)

La figure 2.14 montre le système de la PAC avec les auxiliaires construit dans Simulink. Le système inclut aussi des blocs régulateurs du débit de combustible (hydrogène) et d'air contrôlés par le courant de la PAC (équations 1.63 et 1.64). Le programme Matlab (Algorithme-A I-4) fait appel au système de la figure 2.14 et donne comme résultats les courbes de polarisation et de puissances qui sont présentées dans la figure 2.15.

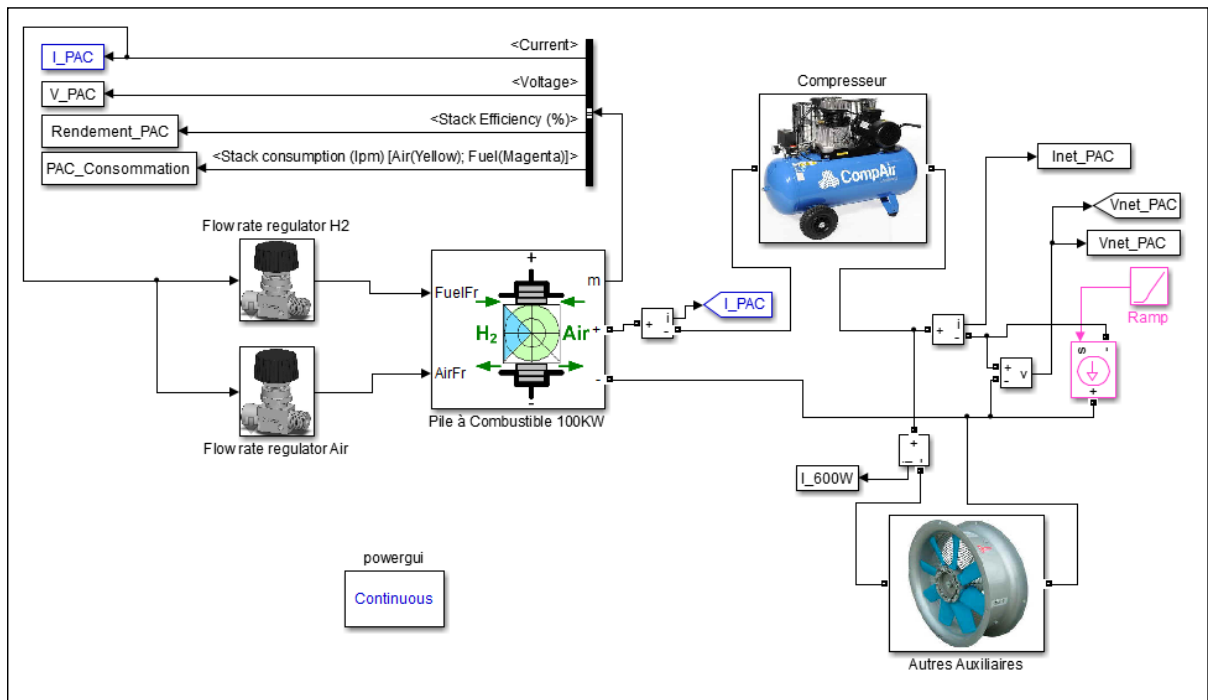


Figure 2.14 Modélisation du générateur à PAC (GPAC) dans Simulink

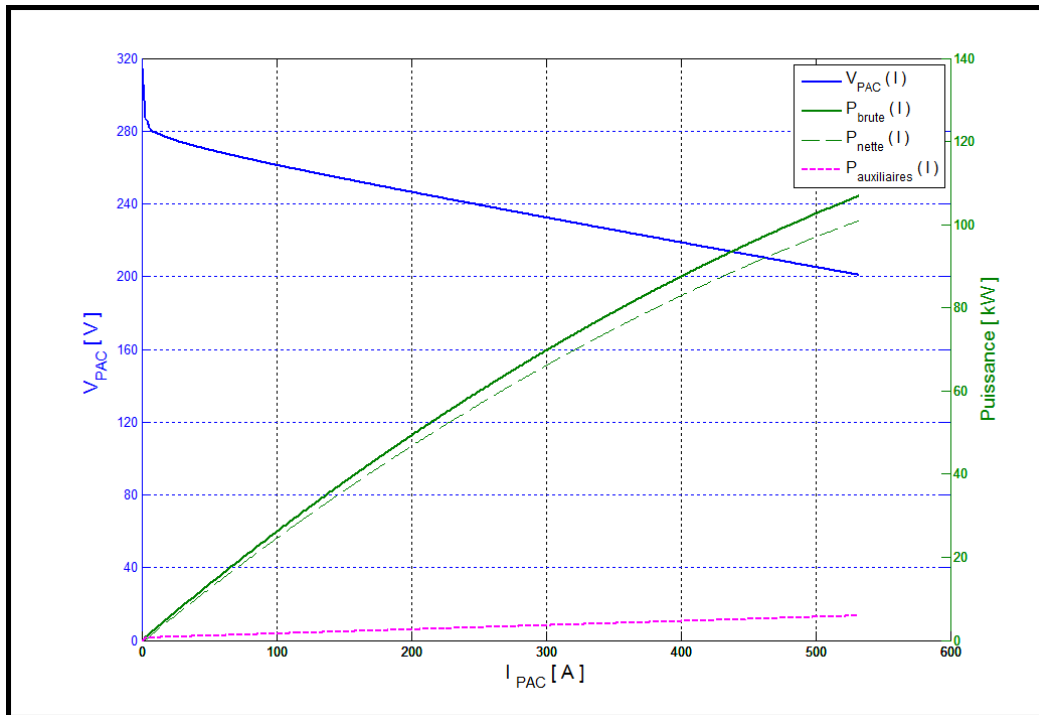


Figure 2.15 Courbe de polarisation (V_{PAC} vs I_{PAC}) et courbes de puissances (Générateur à PAC de 100 kW)

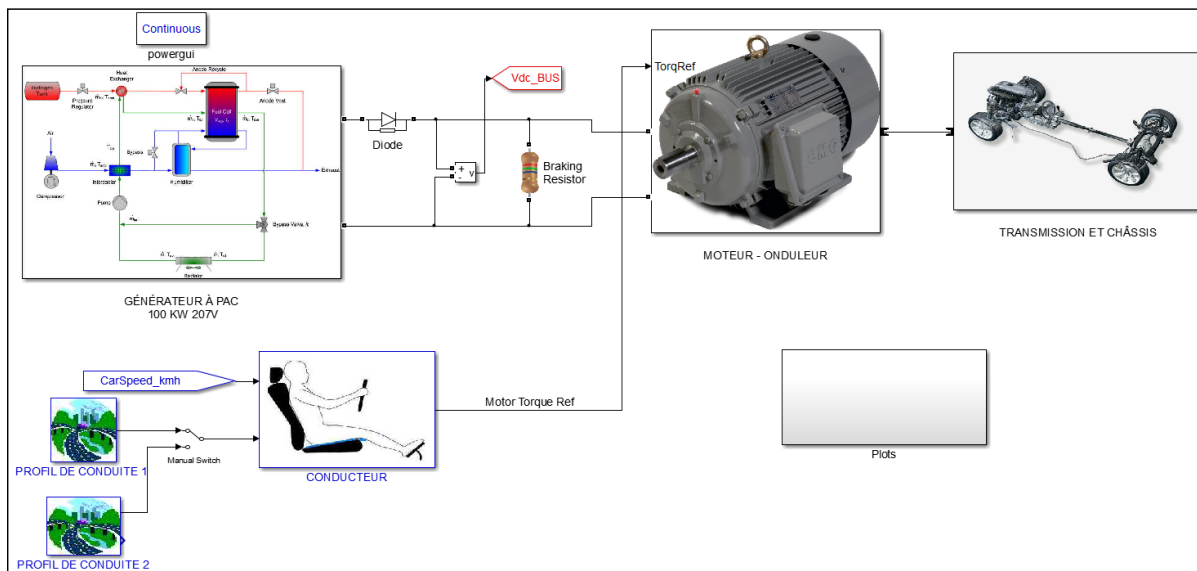


Figure 2.16 Modélisation d'un véhicule à PAC (FCV)

La figure 2.16 montre la modélisation du véhicule, avec la PAC comme la seule source d'énergie (FCV). Une diode est connectée en série avec la PAC afin d'empêcher l'inversion de courant. Il n'y a pas d'élément de stockage pour récupérer l'énergie du freinage qui va se perdre comme chaleur dans une résistance de freinage, dont la modélisation est présentée à la figure 2.17, incluse dans le système.

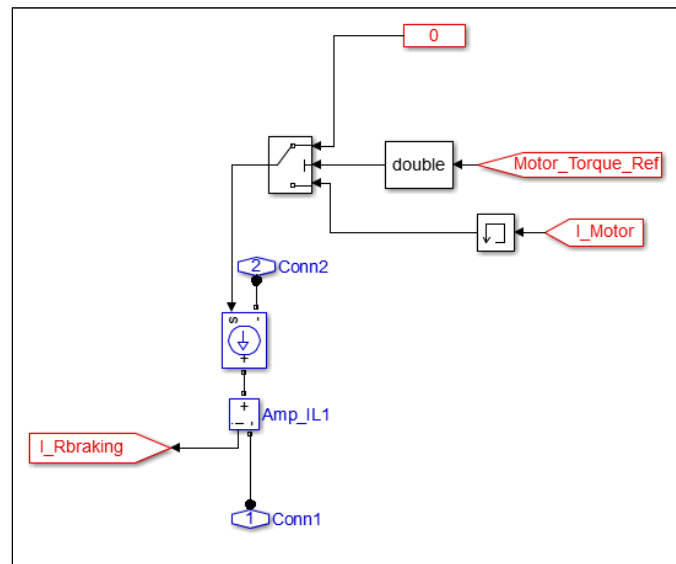


Figure 2.17 Modélisation de la résistance de freinage

À chaque pas de simulation, le modèle de la PAC calcule la consommation de combustible (hydrogène) en litres par minute (lpm). En utilisant l'équation 1.62, cette consommation sera transformée en grammes par seconde (g/s) et puis intégrée afin de déterminer la consommation totale d'hydrogène en grammes à la fin du cycle de conduite.

Les résultats de la simulation du FCV sur un profil de conduite de 60 secondes, appelé « Cycle1_Test60s », sont présentés dans les figures 2.18, 2.19 et 2.20. On peut voir que le moteur se comporte comme générateur lors de freinages (puissance électrique est moindre que la puissance mécanique) (figure 2.18) et que le véhicule suit parfaitement le profil de conduite (figure 2.20). La consommation d'hydrogène sur le cycle de conduite est de 3.72 g (figure 2.20).

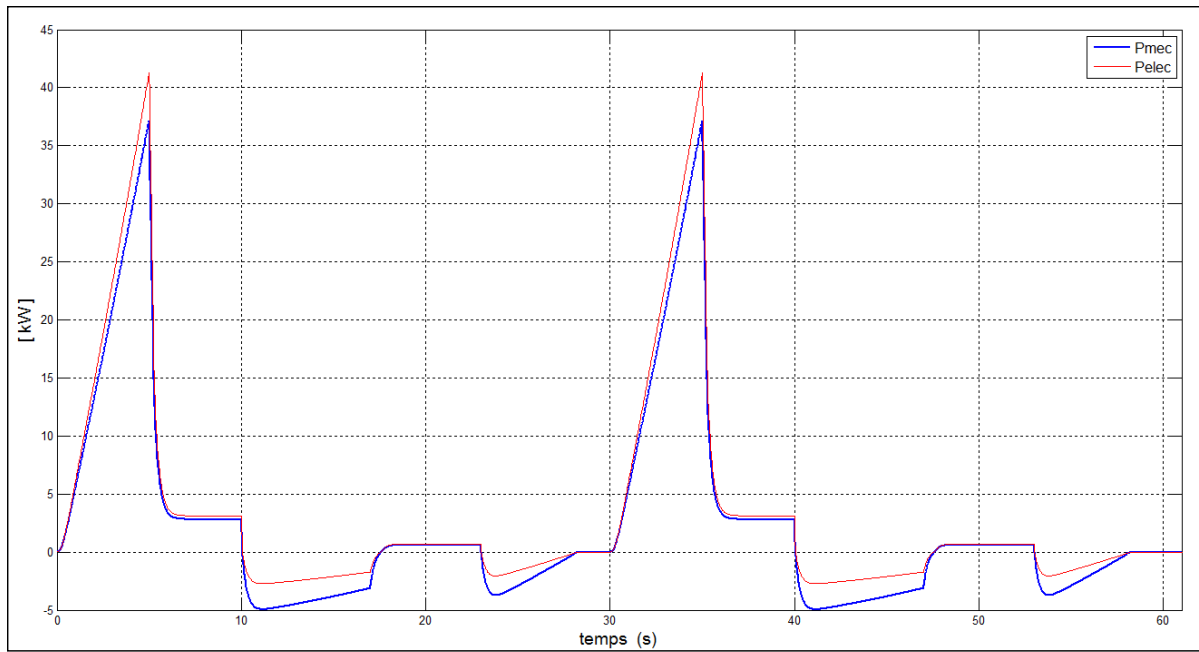


Figure 2.18 Puissances mécanique et électrique (simulation du FCV)

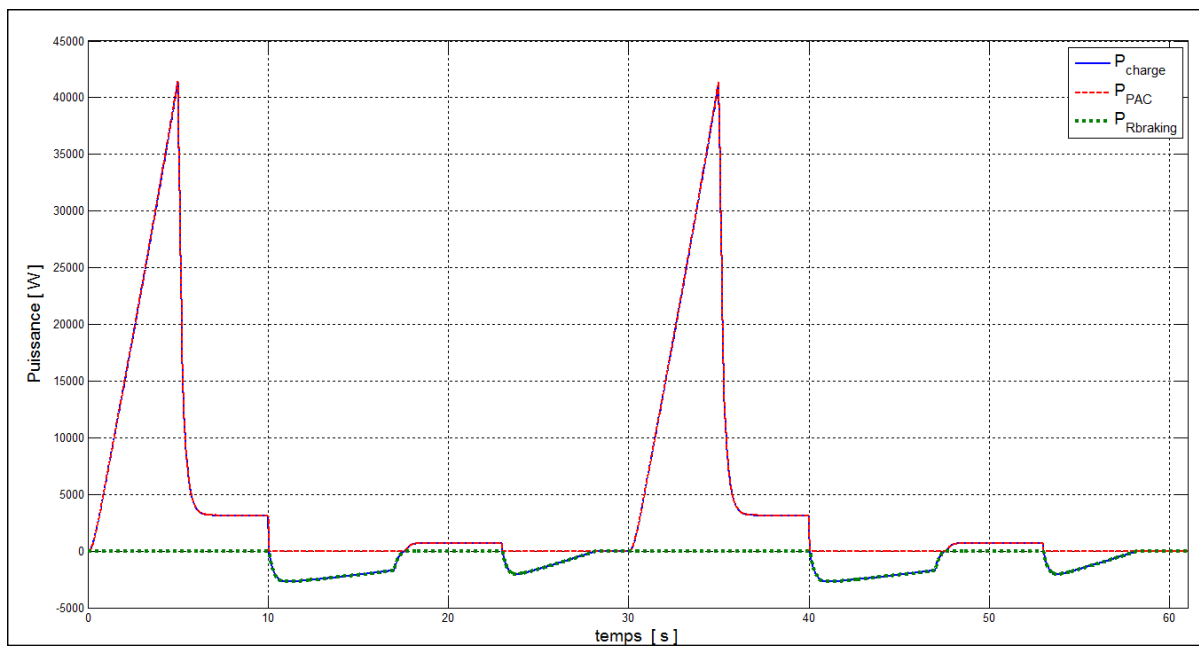


Figure 2.19 Puissances de la charge, de la PAC et de la résistance de freinage (simulation du FCV)

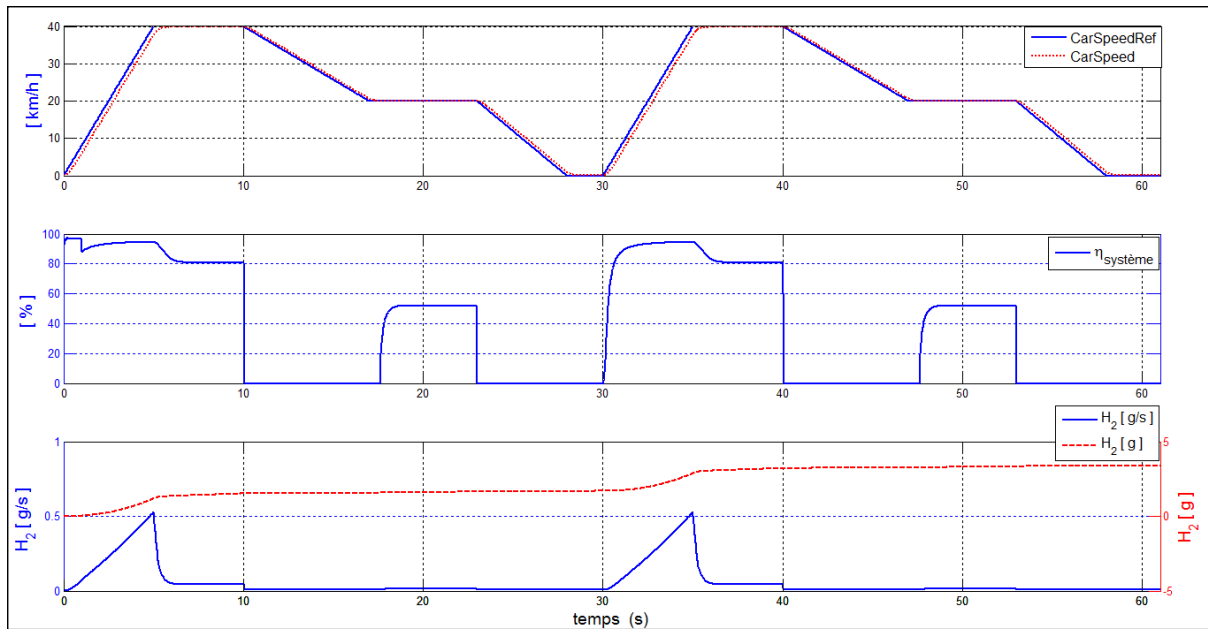


Figure 2.20 Profil de conduite, rendement et consommation de la PAC (simulation du FCV)

2.4 Conclusions

Dans ce deuxième chapitre, on a effectué la construction du modèle du véhicule électrique à PAC. Tout d'abord, on a réalisé le dimensionnement du moteur électrique et des sources primaire (la PAC) et secondaire (l'ES) et ensuite, on a réalisé la modélisation du véhicule au moyen des boîtes à outils SimDriveline et SimPowerSystems de Matlab/Simulink. De plus, on a simulé l'action du conducteur sur les roues à l'aide d'un contrôleur proportionnel intégral et d'un comparateur. Le véhicule modélisé dans ce cas a été un véhicule à PAC (FCV) sans élément de stockage dont la consommation d'hydrogène servira comme base de comparaison avec la consommation du modèle du véhicule électrique hybride à PAC (FCHEV) qui sera utilisé dans les chapitres suivants pour l'étude des algorithmes de gestion de l'énergie. Le supercondensateur sera utilisé comme l'ES du véhicule hybride, dont les paramètres correspondent à ceux d'un petit véhicule, du fait que son poids est moindre que celui obtenu pour la batterie dans l'étape de dimensionnement de l'ES (voir les tableaux 2.3 et 2.4).

CHAPITRE 3

ALGORITHMES DE GESTION DE L'ÉNERGIE

Cette partie du mémoire présente des stratégies ou algorithmes de gestion de l'énergie dans un véhicule hybride. Le but de la gestion de l'énergie dans un véhicule hybride à PAC (FCHEV) est de déterminer le flux de puissance optimal entre le générateur à PAC et l'ES afin de fournir la puissance demandée par la charge en respectant des contraintes de fonctionnement. Elle réalise la répartition de puissance en utilisant l'équilibre de puissances dans le bus de CC donné par l'expression suivante :

$$P_{CC} = P_{PAC} + P_{ES} \quad (3.1)$$

Où P_{CC} est la puissance présente dans le bus de CC.

La figure 3.1 présente le modèle du FCHEV qui sera utilisé pour l'étude des algorithmes et pour démontrer les bénéfices de l'hybridation par l'utilisation d'un ES.

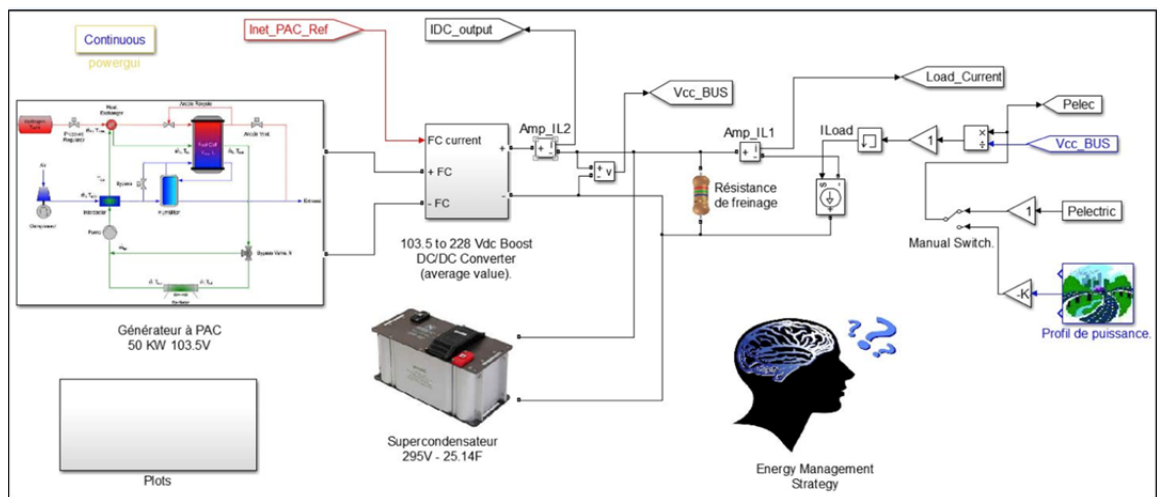


Figure 3.1 Modèle du véhicule hybride à PAC (FCHEV)

Dans le modèle du FCHEV, on peut observer que la taille du GPAC est réduite à 50 kW, ce qui représente une réduction de son coût, et que la tension du GPAC est augmentée par un convertisseur survolteur (basé sur le module « DC6 » de SPS) qui permet de contrôler la puissance extraite de la PAC. De plus, le supercondensateur utilisé comme élément de stockage est branché directement au bus CC et permet la récupération de l'énergie lors de freinages. La modélisation du SC se fait à l'aide du bloc « *Supercapacitor* » de SPS dont la boîte de dialogue, où les paramètres sont fournis, est présentée à la figure 3.2 (la figure présente les valeurs utilisées pour l'exécution des simulations avec $N_p=2$ et $N_s=7$).

Supercapacitor (mask) (link)
Implements a generic supercapacitor model that model electric double layer

Parameters Stern-Tafel Parameters Charge Characteristics

Rated capacitance (F)
88*Np/Ns

Equivalent DC series resistance (Ohms)
8.9e-3*Ns/Np

Rated voltage (V)
48.6*Ns

Surge voltage (V)
51.3*Ns

Number of series capacitors
18*Ns

Number of parallel capacitors
1*Np

Initial voltage (V)
295

Leakage current (A)
5.2e-3*Np

Operating temperature (Celsius)
25

Figure 3.2 Boîte de dialogue du bloc « *Supercapacitor* » de SPS

On suppose que les sources d'énergie du véhicule hybride peuvent fournir la puissance requise afin que le véhicule puisse suivre parfaitement le profil de conduite. Donc, l'approche à utiliser dans la simulation sera du type *backward-facing* ce qui rendra la simulation du système plus rapide. Le groupe moteur onduleur et le système de transmission et châssis sont remplacés par une source de courant contrôlée par le courant obtenu de la

division de la puissance électrique de la charge par la tension du bus CC. La puissance électrique est calculée par le programme Matlab (Algorithme-A I-5) selon le profil de conduite sélectionné en utilisant les paramètres du véhicule dans le tableau 2.1 et l'équation 1.87.

Lors de la simulation, le SOC du supercondensateur sera constamment supervisé en vue de l'activation de la résistance de freinage si le SOC maximal est atteint, ce qui permet de ne pas surcharger le supercondensateur. La figure 3.3 montre le modèle de la résistance de freinage modifié par rapport à celui-ci présenté au chapitre antérieur (figure 2.17).

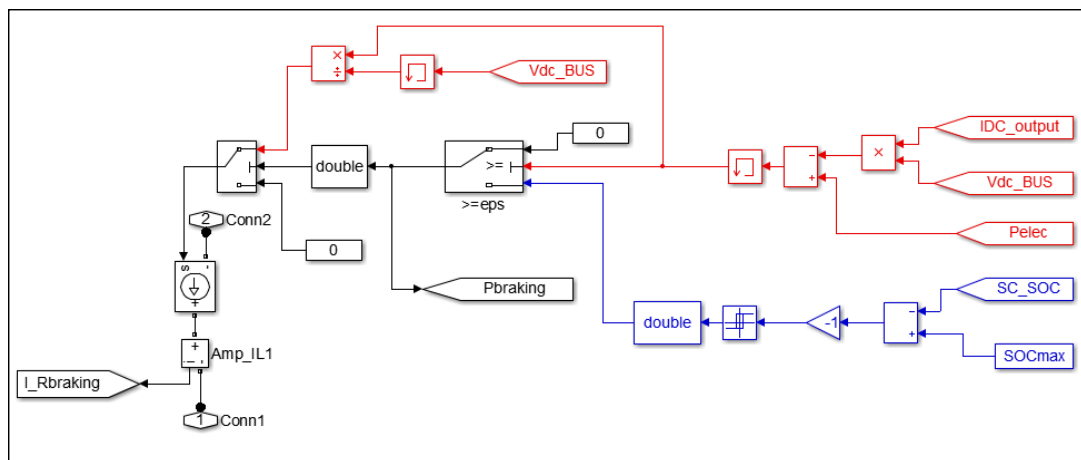


Figure 3.3 Modèle de la résistance de freinage

La figure 3.4 montre la boîte de dialogue de la PAC de 50 kW dont les paramètres sont calculés au moyen des données du tableau 2.5.

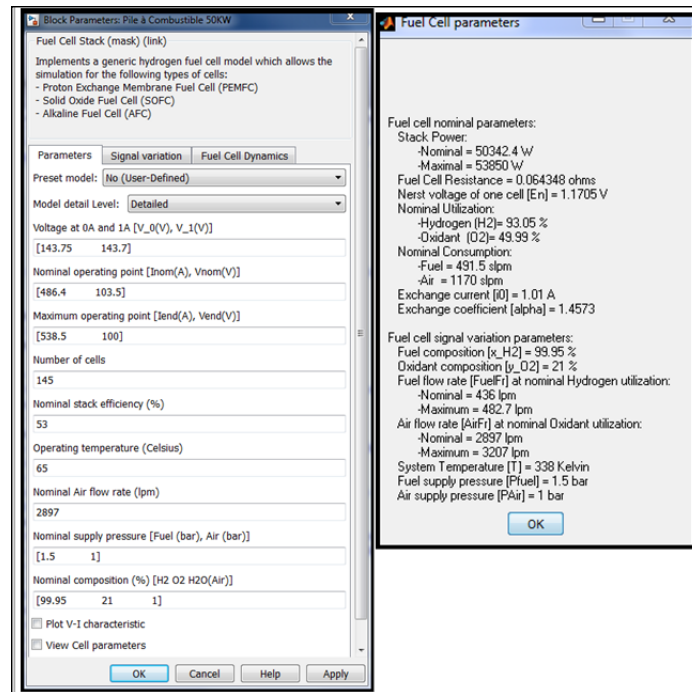


Figure 3.4 Boîte de dialogue du bloc « *Fuel Cell Stack* » de SPS

Le programme Matlab (Algorithme-A I-4) est de nouveau utilisé pour générer cette fois les courbes du GPAC de 50 kW (figures 3.5 à 3.8).

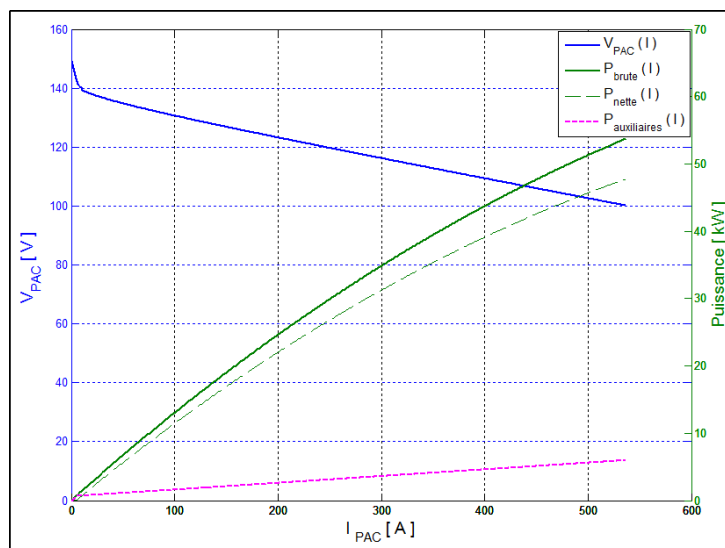


Figure 3.5 Courbe de polarisation (V_{PAC} vs I_{PAC}) et courbes de puissances (GPAC de 50 kW)

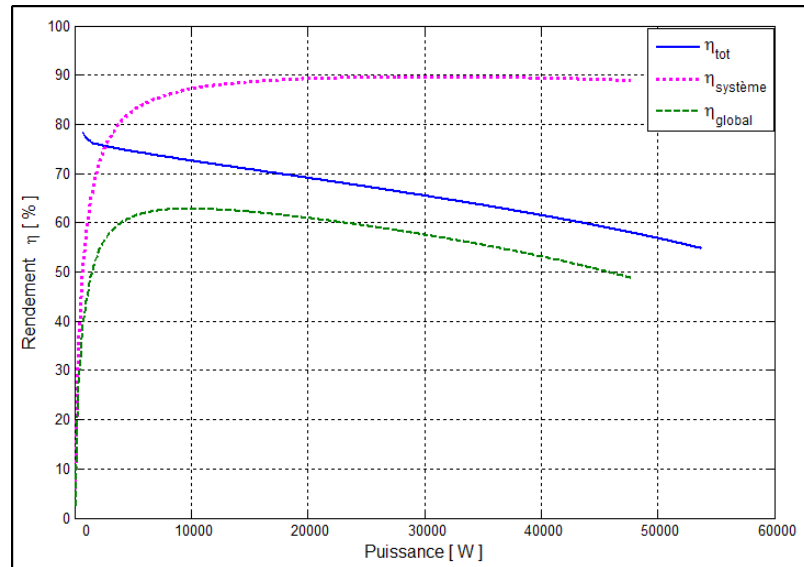


Figure 3.6 Courbes de rendement (GPAC de 50 kW)

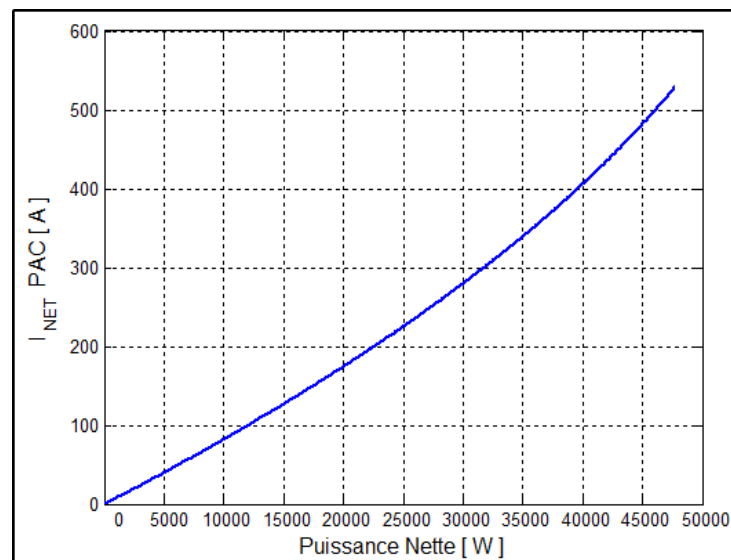


Figure 3.7 Courbe de courant net en fonction de la puissance (GPAC de 50 kW)

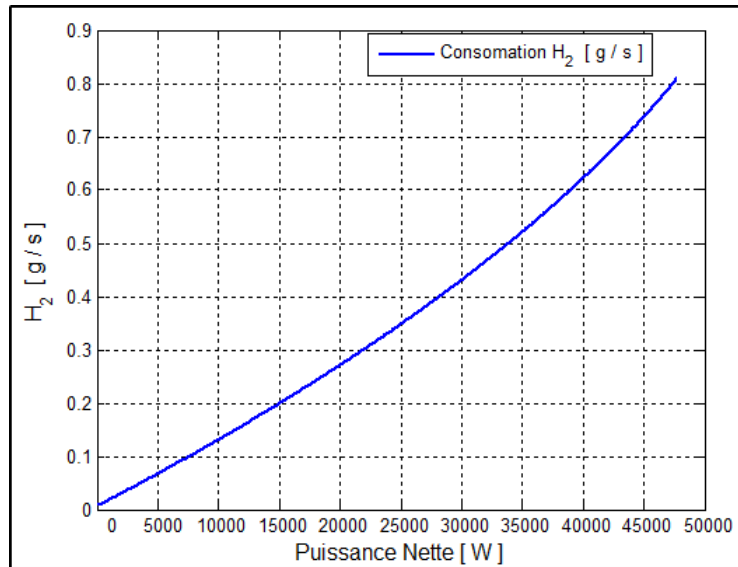
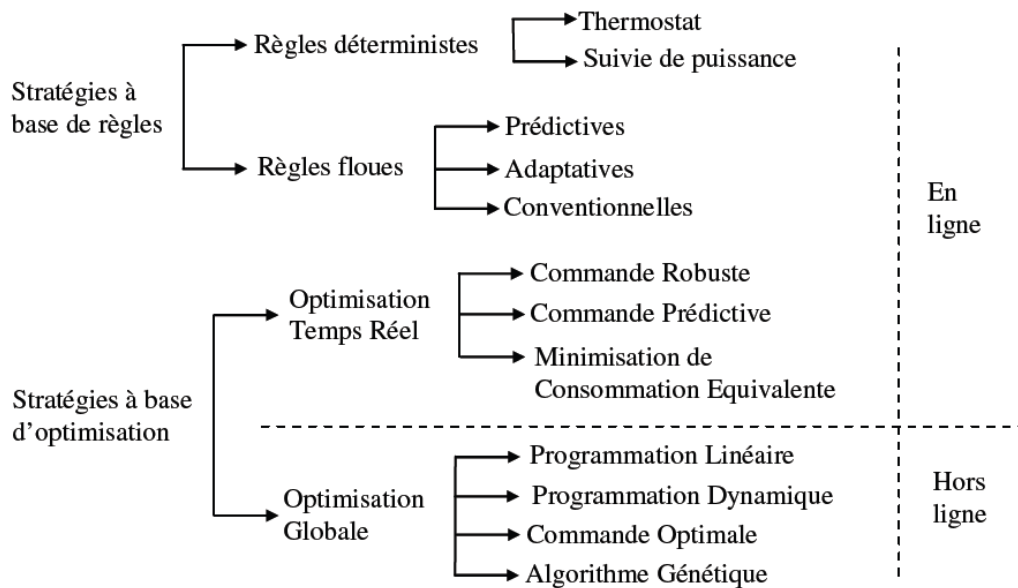


Figure 3.8 Courbe de consommation de H₂ en fonction de la puissance (GPAC de 50 kW)

Les algorithmes ou stratégies de gestion de l'énergie pour un véhicule hybride peuvent être classés de la façon suivante (Hankache, 2008) :



Dans le présent chapitre, on développe des algorithmes à base de règles et ceux à base d'optimisation seront développés au chapitre suivant. La caractéristique désirée par les algorithmes sera la minimisation de la consommation d'hydrogène pendant un cycle de conduit déterminé. De plus, l'état final de charge du supercondensateur devra être égal à son état initial de charge ce qui signifie que le bilan de l'énergie que le SC a gagné ou perdu pendant le cycle de conduite doit être nul à la fin du cycle de conduite. Donc, chacun des algorithmes à réaliser déterminera le courant de référence du convertisseur du GPAC, identifié comme « *Inet_PAC_Ref* » dans le diagramme du véhicule à la figure 3.1, qui minimise la consommation de combustible en respectant des contraintes de fonctionnement. Dans le cas que l'algorithme calcule une puissance de référence, celle-ci sera transformée en courant de référence au moyen d'une table de recherche qui utilise les données de la figure 3.7. Les blocs Simulink de « saturation » et de « *rate limiter* » seront utilisés afin de contraindre la grandeur et le taux de variation du signal de référence. Le profil de conduite court de 60 secondes (profil « Cycle1_Test60s ») sera utilisé pour la comparaison des algorithmes. La figure suivante présente ce profil de conduite avec la puissance électrique du moteur qui en résulte avec le programme Matlab (Algorithme-A I-5).

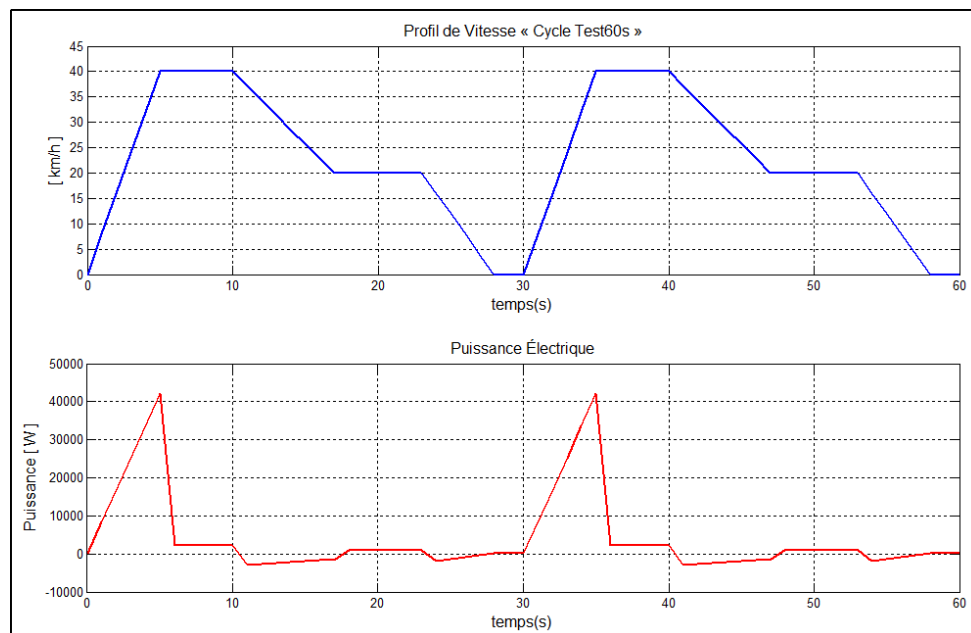


Figure 3.9 Profil de vitesse et puissance électrique (Cycle Test60s)

Le tableau ci-après présente des constantes et des formules utilisées pour l'exécution des simulations.

Tableau 3.1 Constantes et formules utilisées pour l'exécution des simulations

<u>Pour le SOC</u>	<u>Pour la tension du Bus CC</u>
$SOC_{\max} = 100\%$;	$V_{BUS_max} = 340 \text{ V}$;
$SOC_{\min} = 70\%$;	$V_{BUS_min} = 250 \text{ V}$;
$\Delta_{SOC} = (SOC_{ref} - SOC_{\min})$;	$\Delta V_{BUS} = (V_{BUS_ref} - V_{BUS_min})$;
<u>Pour le courant du charge du SC</u>	<u>Pour la puissance du PAC</u>
$I_{SC_max} = 1000 \text{ A}$;	$P_{PAC_max} = 47000 \text{ W}$;

Le SOC de référence et la tension du bus de référence sont calculés par les expressions suivantes :

$$SOC_{ref} = 1/2.(SOC_{\max} + SOC_{\min}) \quad (3.2)$$

$$V_{BUS_ref} = 1/2.(V_{BUS_max} + V_{BUS_min}) \quad (3.3)$$

La tension initiale du SC est faite égale à V_{BUS_ref} , qui résulte 295 V. Elle est fixée dans le bloc du SC (figure 3.2) ce qui donne un SOC initial égal à 85 %. Les algorithmes devront faire coïncider cette valeur avec la valeur du SOC final du SC à la fin du cycle de conduite.

Les graphiques des puissances de la charge, de la PAC et du SC ainsi que les graphiques du SOC, du rendement du système et de la consommation d'hydrogène seront présentés pour chacun des algorithmes développés.

3.1 Algorithmes basés sur des règles déterministes

Ces algorithmes sont simples et faciles à comprendre parce qu'ils sont basés sur l'intuition et l'expérience.

3.1.1 Thermostat

L'algorithme de gestion de l'énergie le plus simple est le thermostat dans lequel le SOC de l'ES est conservé entre ses états maximal et minimal. Dans cet algorithme, la PAC fournit le courant filtré de la charge plus un courant pour charger le SC, dénoté $I_{SC_Ref_chg}$. Celui-ci est calculé de la façon suivante : au démarrage de la simulation, le SOC se trouve dans l'intervalle $SOC_{min} < SOC \leq SOC_{max}$ et $I_{SC_Ref_chg}$ est égal à zéro. Ultérieurement, le SC se décharge et lorsque le SOC_{min} est atteint, la charge du SC est activée ($I_{SC_Ref_chg}$ est différent de zéro). $I_{SC_Ref_chg}$ est proportionnel à la variation du SOC (Δ_{SOC}). Donc, il diminue au fur et à mesure que l'on s'approche du SOC de référence (SOC_{ref}). Le courant de charge ainsi obtenu est réduit davantage lorsque l'on s'approche de la tension maximale du bus CC. La logique de contrôle est mise au point avec l'outil Stateflow de Simulink (figure 3.11) et incluse dans le bloc « *chart* » à la figure 3.10.

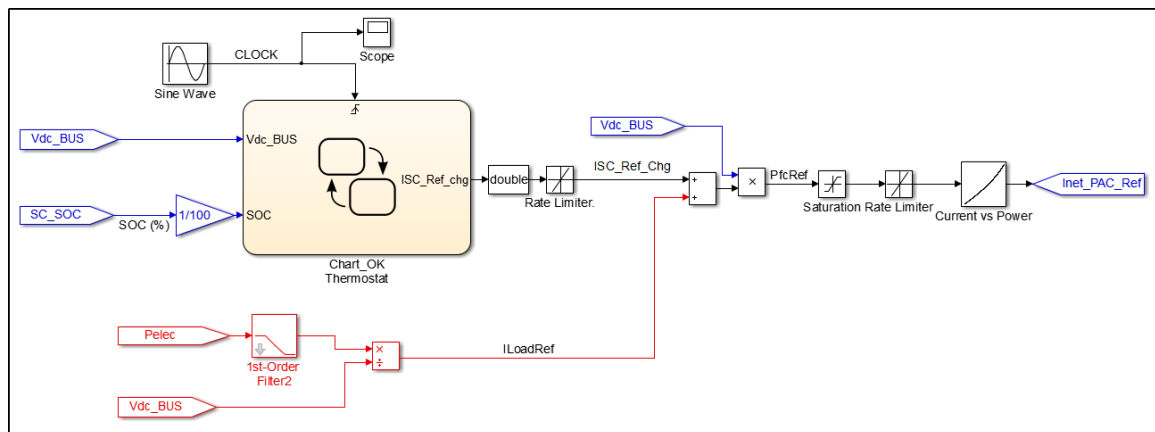


Figure 3.10 Stratégie de contrôle « thermostat »

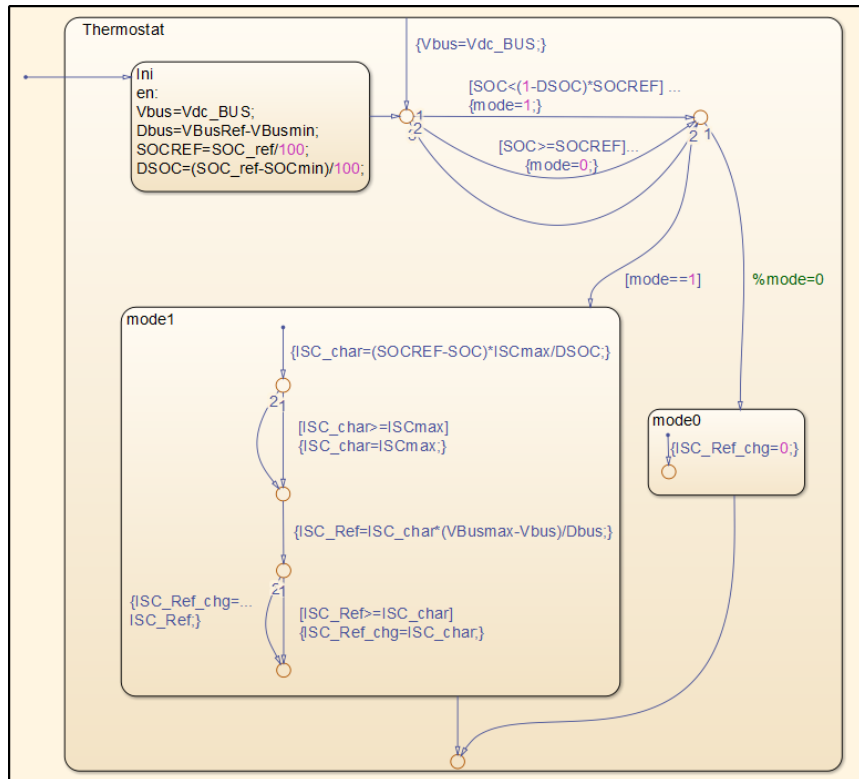


Figure 3.11 Diagramme Stateflow dans le bloc « *chart* »
(Stratégie « thermostat »)

Les figures 3.12 et 3.13 présentent les résultats des simulations avec une charge qui présente une forte dynamique. Dans ce cas, le SOC_{ref} est fait égal au SOC_{max} fixé à 100%. Comme l'on peut observer dans la figure 3.12, au début, la PAC fournit la puissance filtrée de la charge et la forte dynamique de celle-ci est fournie par le SC. Lorsque le SOC_{min} fixé à 90% est atteint aux 6 secondes (figure 3.13), la PAC fournit une puissance additionnelle afin de charger le SC (mode 1 dans le diagramme Stateflow) qui est plus faible au fur et à mesure que l'on s'approche du SOC_{ref} . Lorsque celui est atteint, la PAC cesse de charger le SC (mode 0 dans le diagramme Stateflow).

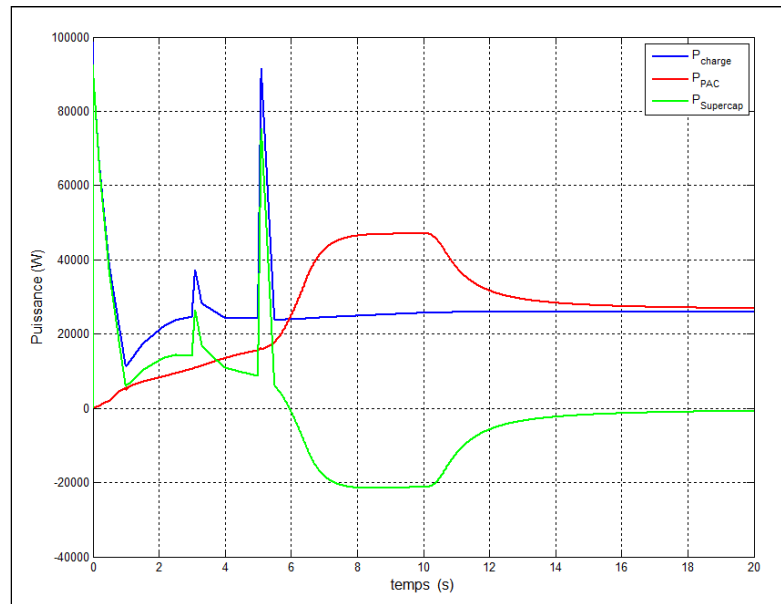


Figure 3.12 Graphique de puissances pour une charge de forte dynamique
(Stratégie « thermostat »)

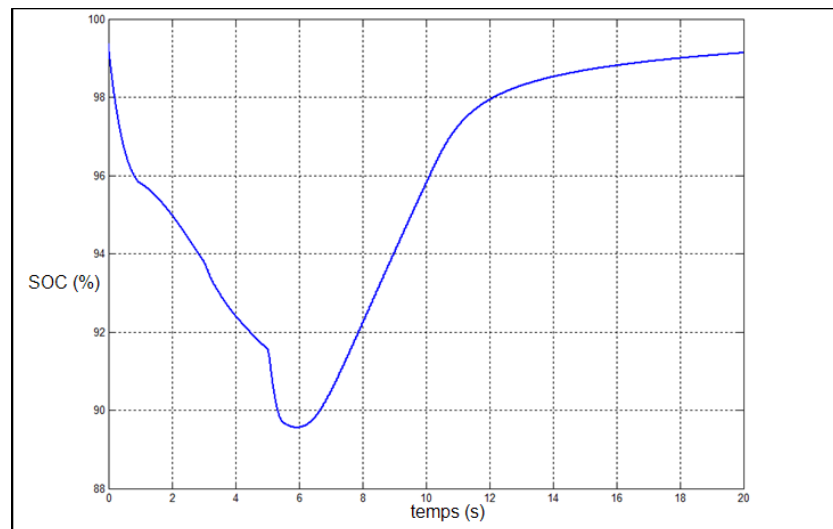


Figure 3.13 État de charge du SC pour une charge de forte dynamique
(Stratégie « thermostat »)

Les figures 3.14 et 3.15 suivantes présentent les résultats des simulations sur le profil de conduite de 60 secondes établi pour la comparaison des algorithmes. Cette fois-ci, le SOC de référence et la tension du bus de référence sont calculés par les expressions 3.2 et 3.3.

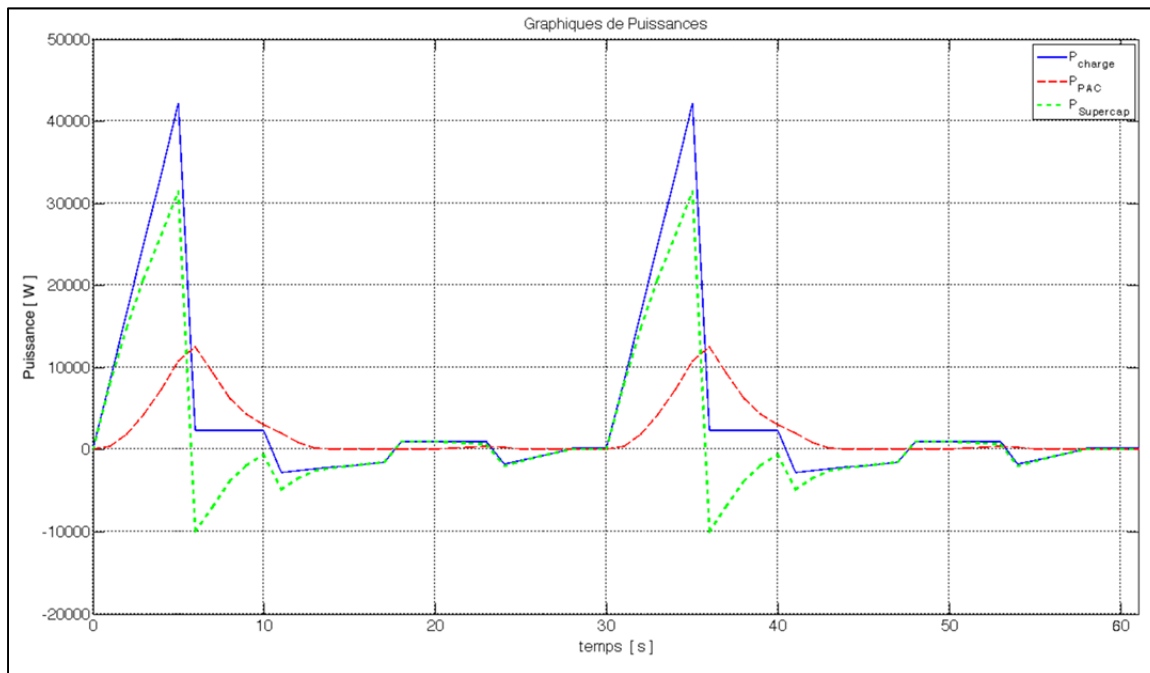


Figure 3.14 Graphique de puissances pour un profil de conduite de 60 secondes (Stratégie « thermostat »)

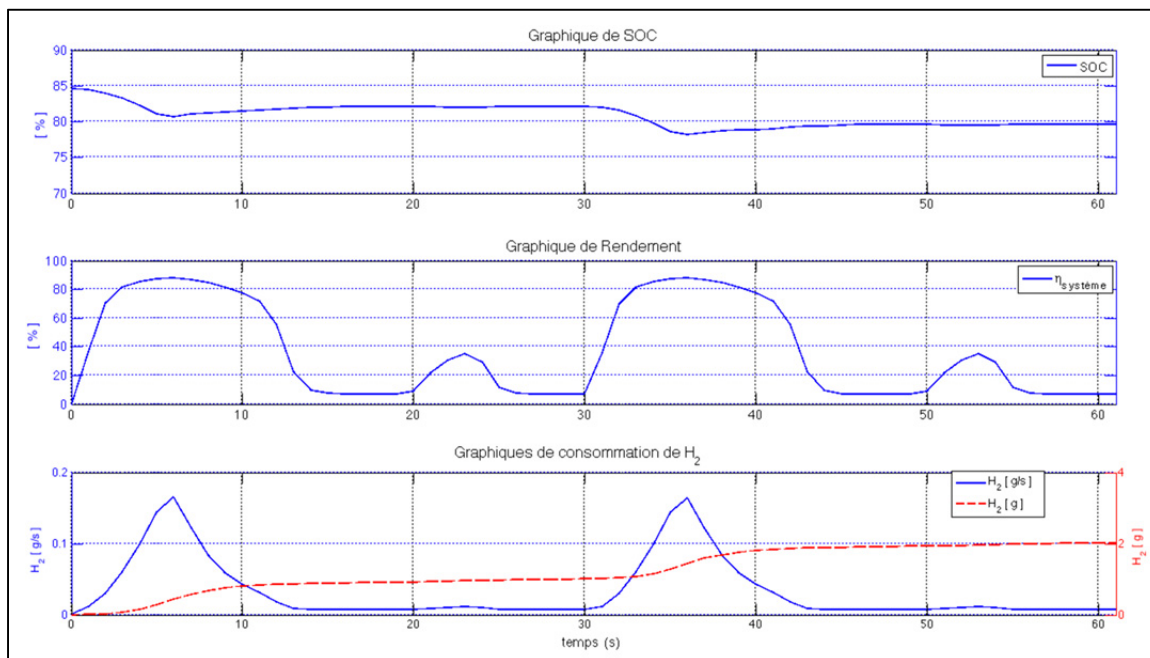


Figure 3.15 SOC, Rendement, Consommation pour un profil de conduite de 60 secondes (Stratégie « thermostat »)

La consommation d'hydrogène sur le parcours de 60 secondes est de 2.02 g, moindre que celle du véhicule sans élément de stockage du chapitre précédent, mais le SOC n'est pas conservé à la fin du cycle de conduite contrairement à ce que l'on cherche par les algorithmes.

3.1.2 Stratégie utilisant des régulateurs classiques (PI)

Dans cette stratégie, trois régulateurs du type proportionnel intégral (PI) sont placés en cascade. Le régulateur le plus éloigné du convertisseur du GPAC (identifié avec le numéro 1 dans la figure 3.16) contrôle le SOC du SC et donne la référence au régulateur suivant (identifié avec le numéro 2 dans la figure 3.16) qui contrôle le courant de charge du SC. Le dernier régulateur est inclus dans le convertisseur de la PAC (figure 3.17) et contrôle le courant de celle-ci en utilisant comme référence le courant obtenu du deuxième régulateur, dénoté « Inet_PAC_Ref ». Le bloc de saturation à la sortie du PI numéro 1 est réglé de façon que le courant de charge du SC, dénoté « I_{sc_Ref} » dans la figure 3.14, soit zéro si le SOC dépasse le SOC de référence. Dans ce cas, la PAC est désactivée (Inet_PAC_Ref = 0) et le véhicule fonctionne dans le mode purement électrique (mode d'épuisement de charge).

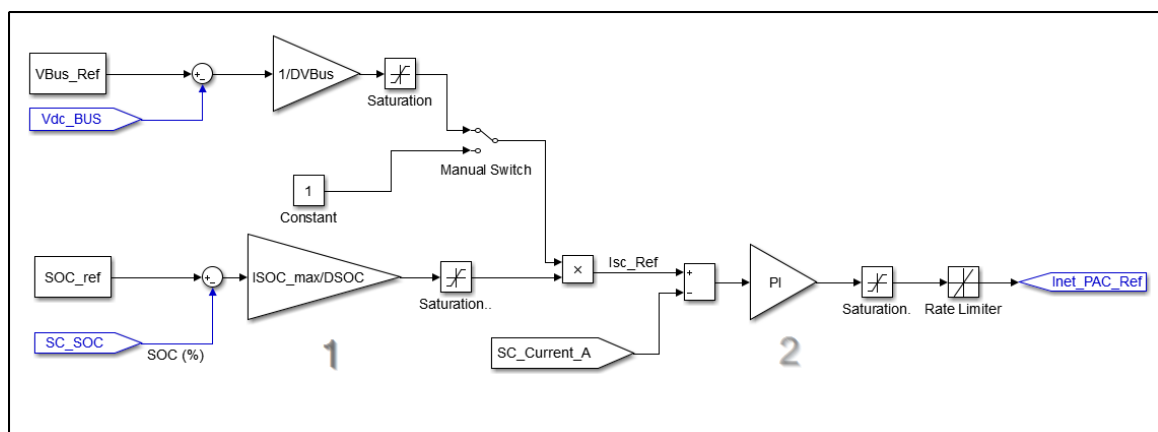


Figure 3.16 Stratégie de contrôle PI

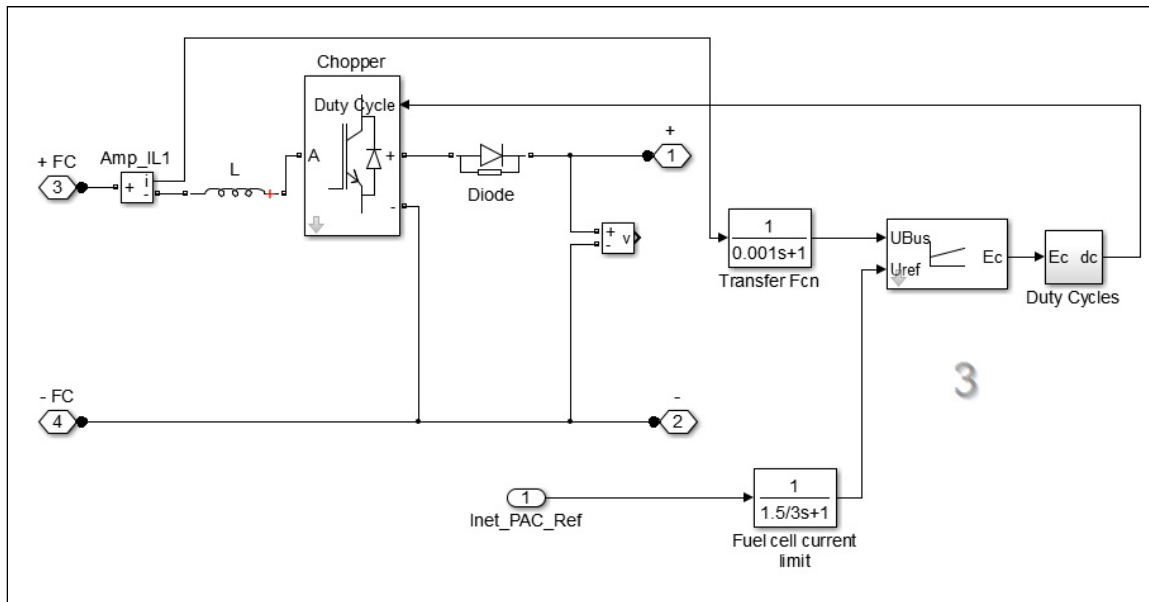


Figure 3.17 Schéma du convertisseur de la PAC

La valeur du deuxième régulateur PI qui contrôle le courant de charge du SC est choisie de façon empirique.

Les figures 3.18 et 3.19 présentent les résultats des simulations sur un profil de conduite de 60 secondes (profil « Cycle1_Test60s »). Le SOC est bien conservé à la fin du cycle de conduite et la consommation d'hydrogène résulte 3.53 g.

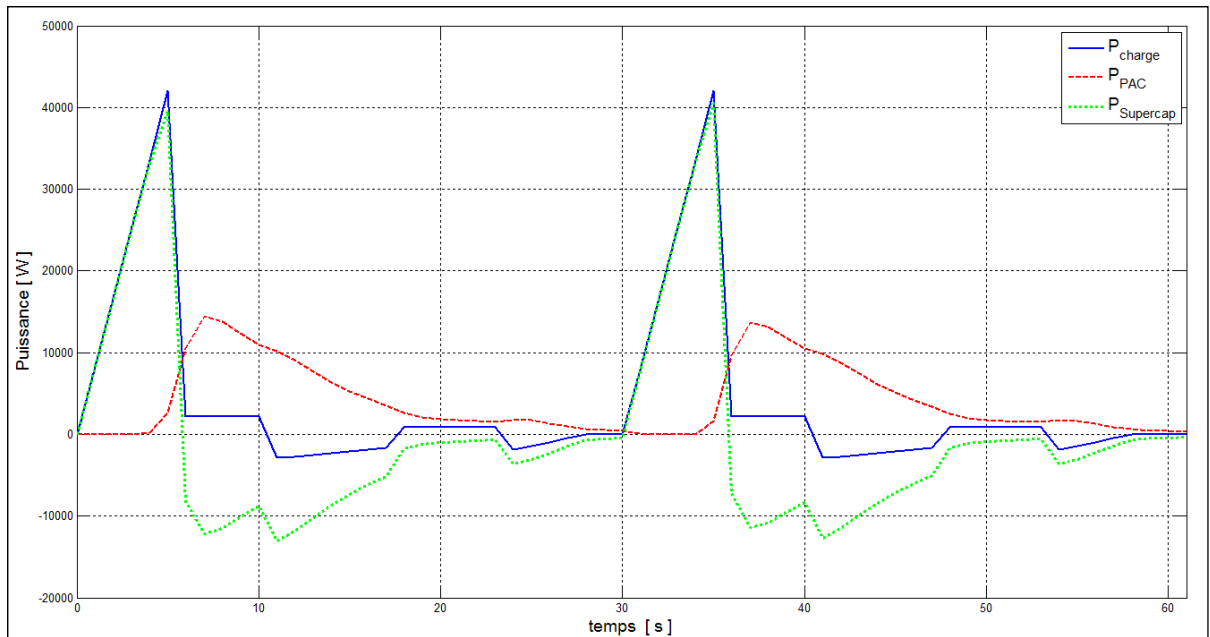


Figure 3.18 Graphique de puissances pour un profil de conduite de 60 secondes (Stratégie PI)

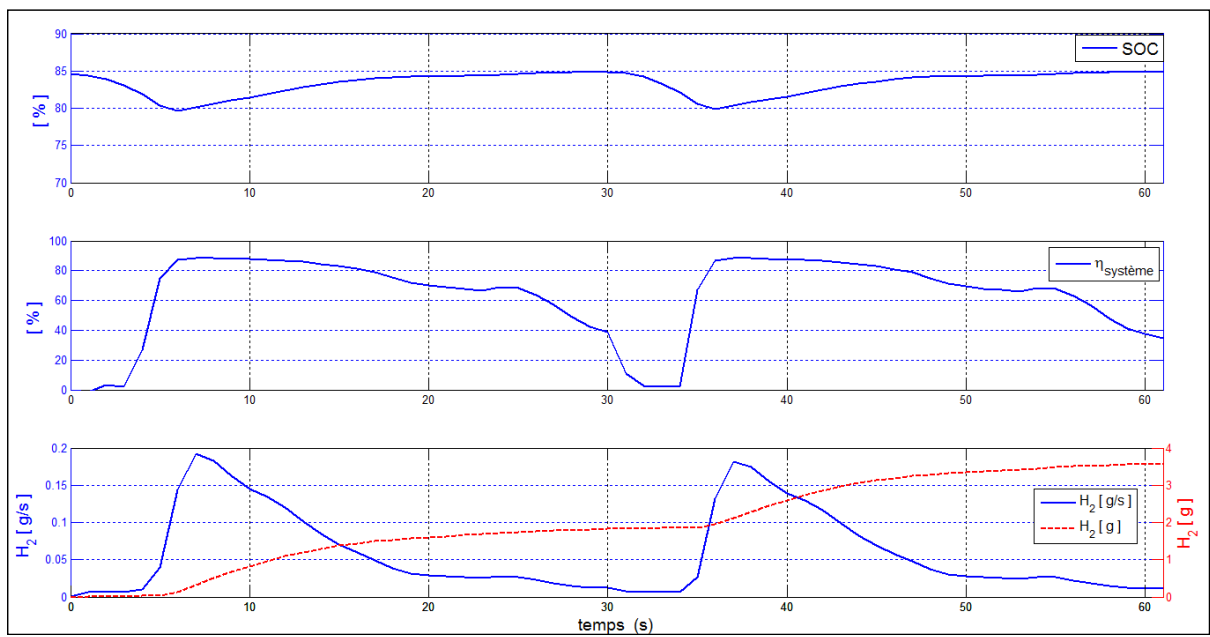


Figure 3.19 SOC, Rendement, Consommation pour un profil de conduite de 60 secondes (Stratégie PI)

3.1.3 Stratégie de rendement maximal

Le but de cette stratégie est de déterminer le point de rendement maximal du GPAC (rendement système). La technique que l'on utilise est celle utilisée pour déterminer le point de puissance maximale des systèmes éoliens, c'est-à-dire un MPPT (*Maximum power point tracking*). À partir des puissances brute et nette de la PAC, le rendement système est calculé et la puissance de référence de la PAC est augmentée ou diminuée, dépendant de si le rendement est plus grand ou moindre que sa valeur précédente, de sorte que la PAC fonctionne au point rendement maximal une fois que celui-ci est obtenu. Le MPPT est réalisé en utilisant l'outil Stateflow de Simulink (voir la figure 3.21) et inclus dans le bloc « chart » à la figure 3.20. La valeur initiale de la puissance de référence de la PAC est fixée à 1000 W et sa variation (augmentation ou diminution) à 300 W. À chaque seconde (fréquence du signal *SWITCH*), l'algorithme détermine une valeur de puissance de référence de la PAC qui est modifiée par un facteur dépendant de l'état de charge du SC en vue de l'obtention d'un bilan d'énergie nul du SC à la fin du cycle de conduite.

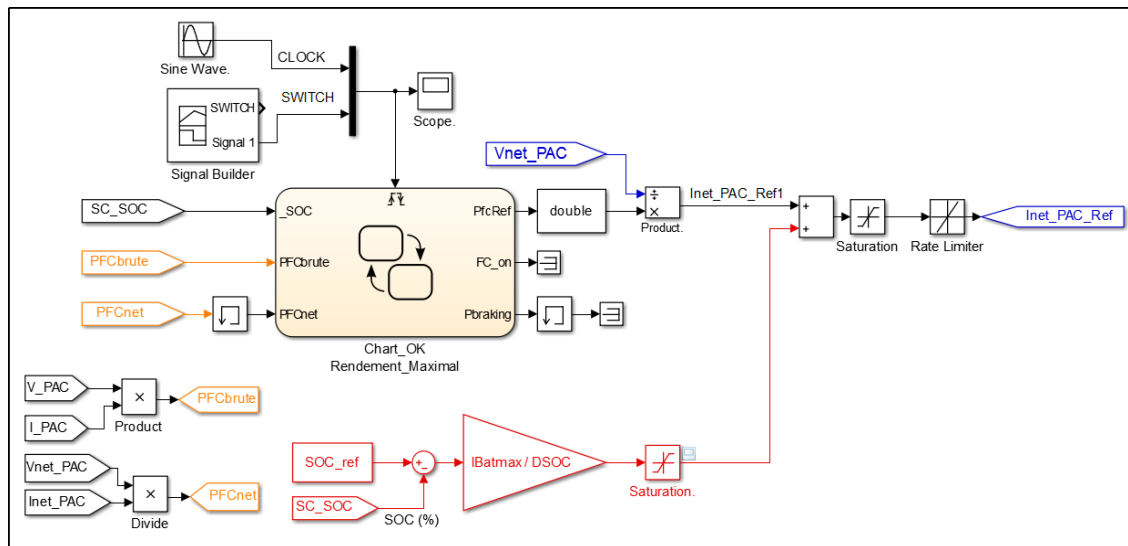


Figure 3.20 Stratégie de contrôle « rendement maximal »

Les figures 3.22, 3.23 et 3.24 présentent les résultats des simulations sur le profil de conduite de 60 secondes (profil « Cycle1_Test60s »). Dans la figure 3.22, les valeurs de rendements

obtenues dans le parcours (points en rouge) sont montées sur le graphique du rendement de la PAC (rendement système).

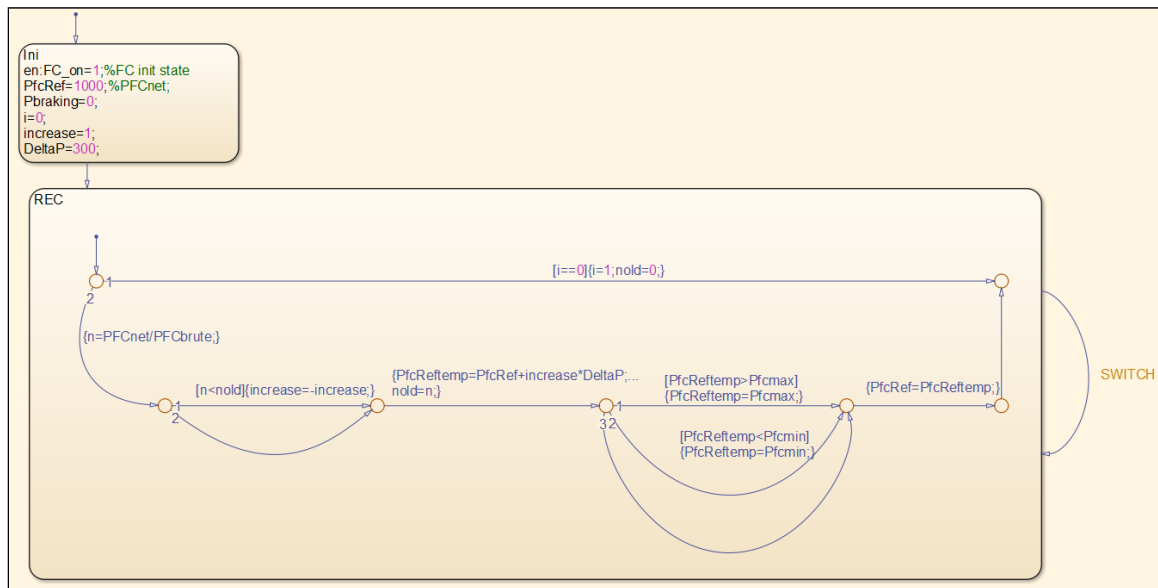


Figure 3.21 Diagramme Stateflow dans le bloc *chart* (Stratégie « rendement maximal »)

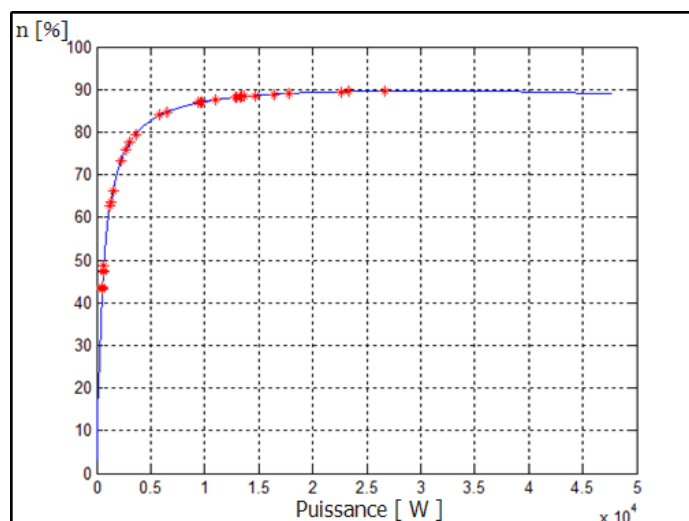


Figure 3.22 Variation du rendement de la PAC (points en rouge) autour du point de rendement maximal (Stratégie « rendement maximal »)

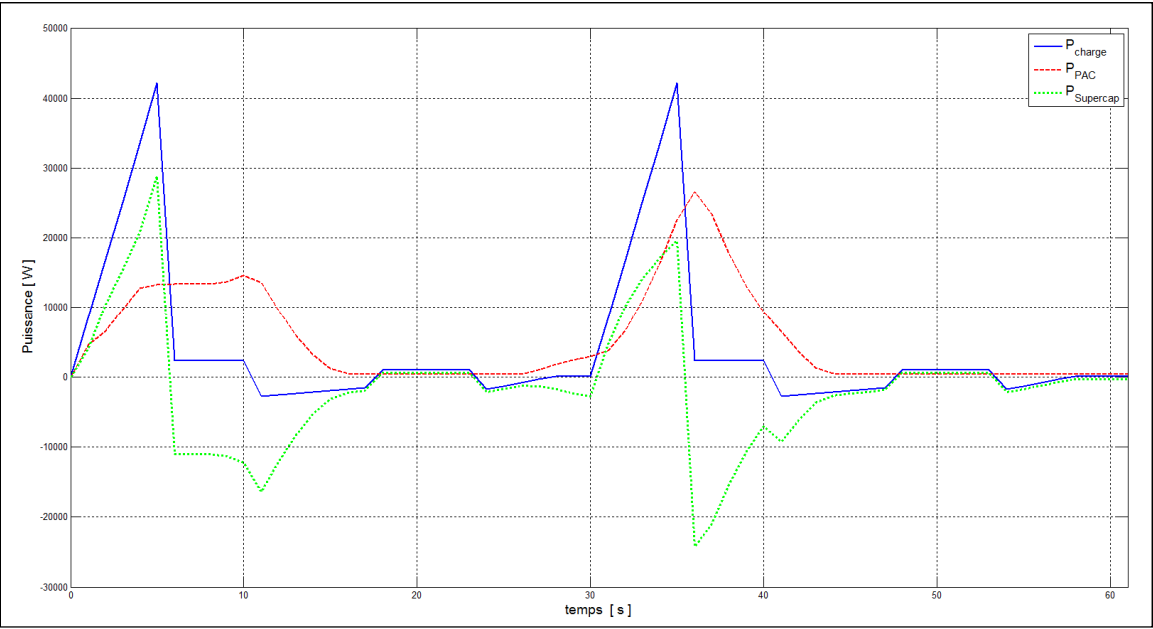


Figure 3.23 Graphique de puissances pour un profil de conduite de 60 secondes
(Stratégie « rendement maximal »)

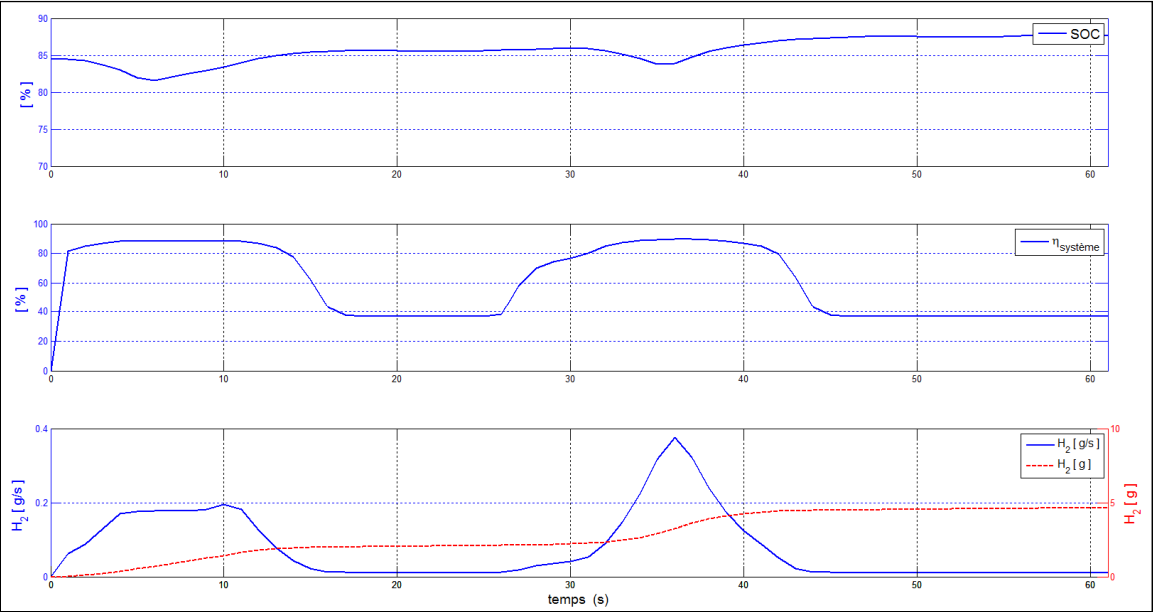


Figure 3.24 SOC, Rendement, Consommation pour un profil de conduite de 60 secondes
(Stratégie « rendement maximal »)

On peut observer dans les figures que le SOC final est supérieur au SOC initial et que la consommation d'hydrogène est de 4.7 g, ce qui est supérieure à celle du véhicule du chapitre 2.

3.2 Algorithmes basés sur des règles de logique floue

Cette stratégie est réalisée en utilisant le bloc « contrôleur de logique floue » de la boîte à outils *fuzzy logic* de Simulink (figure 3.25). Dans ce bloc, on signale le nom du fichier *Fuzzy Inference System* (FIS) qui sera chargé du *workspace* de Matlab lors de la simulation du véhicule. Pour éditer ce fichier, il faut lancer l'éditeur de fichiers FIS à l'aide de la commande *fuzzy* suivie du nom du fichier, à partir du *prompt* de Matlab. Le signal d'entrée du bloc est le SOC du supercondensateur et celui de sortie est la puissance de référence de la PAC (dénomé PFC).

Dans la première étape d'un processus de logique floue, appelée *fuzzification*, les grandeurs réelles des signaux d'entrée et de sortie sont transformées en une série de courbes ou fonctions d'appartenance. Une fonction d'appartenance est une fonction qui permet de définir le degré d'appartenance d'une donnée numérique à une variable linguistique, par exemple : faible, optimale, élevée, etc. Il y a différents types de formes d'ondes pour décrire une fonction d'appartenance. Dans notre cas, la forme d'onde utilisée est du type trapèze. Les fonctions d'appartenance de la puissance de référence de la PAC sont déterminées à l'aide des données de la figure 3.26. Dans cette figure, on peut voir, 4 zones de fonctionnement de la PAC, à savoir : une zone de puissance zéro, de faible puissance, de puissance optimale et de puissance élevée. Par rapport au SOC, celui-ci est classé en 4 fonctions d'appartenance : faible, optimal, élevé, trop élevé. La correspondance entre les fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie est effectuée avec des règles. Les figures 3.27, 3.28 et 3.29 présentent les fonctions d'appartenance des signaux d'entrée et de sortie et les règles définies dans l'éditeur de fichiers FIS.

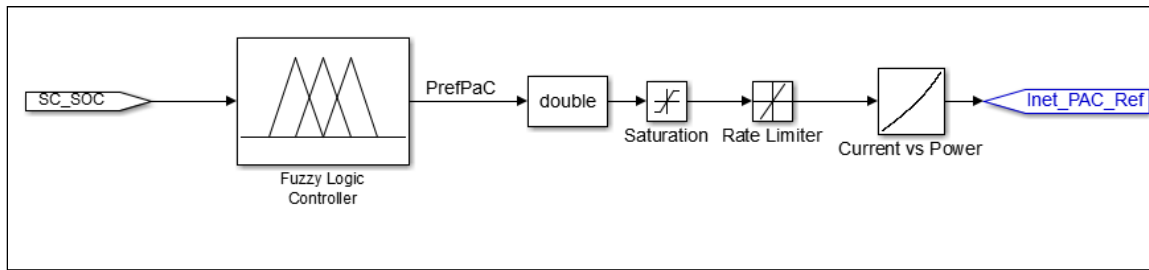


Figure 3.25 Stratégie de contrôle de logique floue

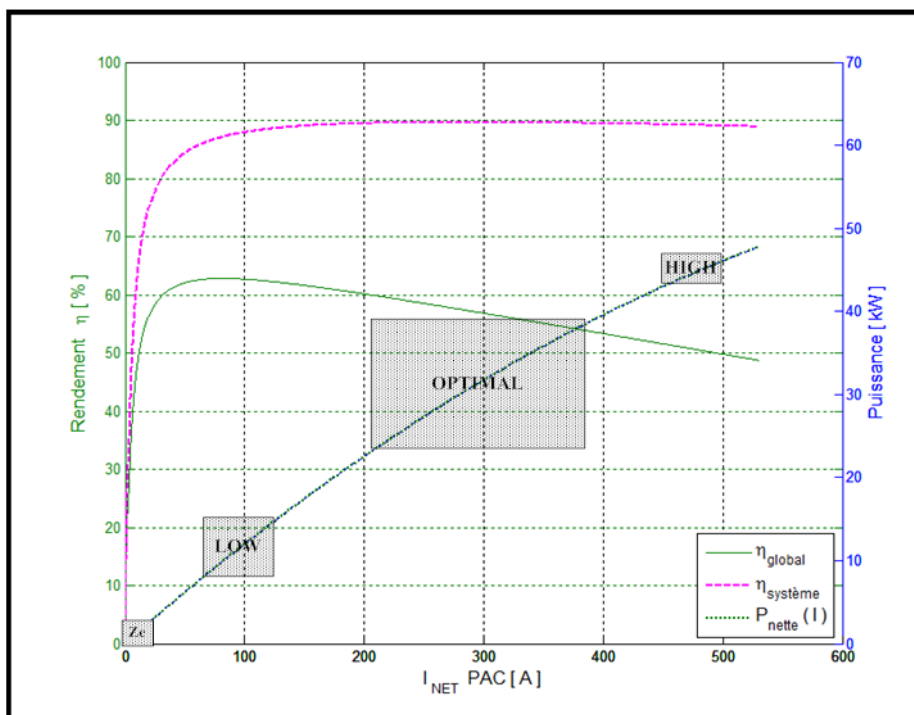


Figure 3.26 Zones de fonctionnement du GPAC pour déterminer les fonctions d'appartenance de la variable de sortie PFC

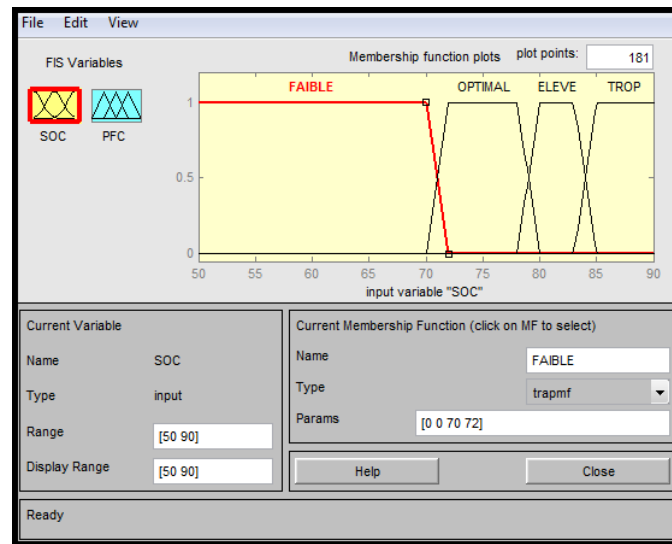


Figure 3.27 Fonctions d'appartenance de la variable d'entrée SOC (Éditeur de fichiers FIS)

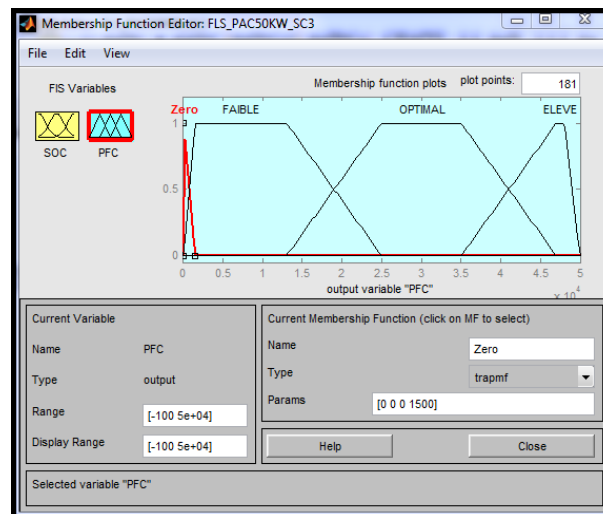


Figure 3.28 Fonctions d'appartenance de la variable de sortie PFC (Éditeur de fichiers FIS)

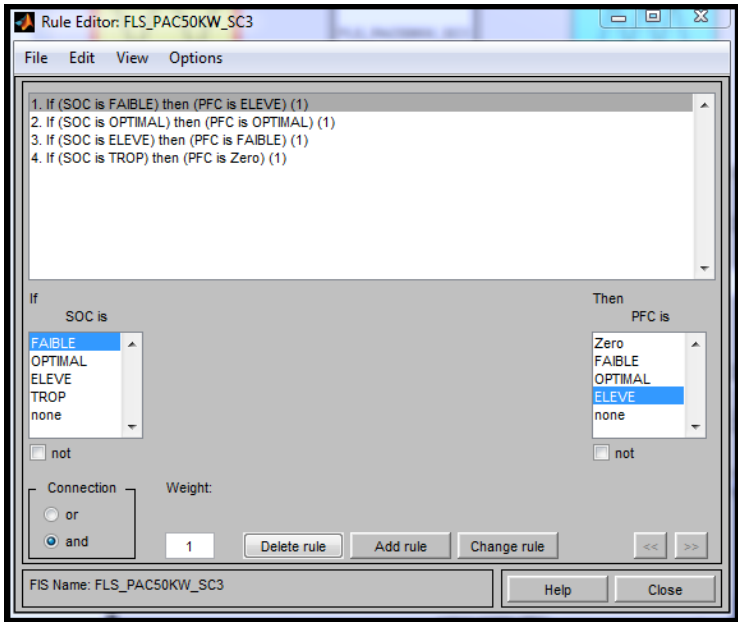


Figure 3.29 Définition des règles (Éditeur de fichiers FIS)

À la figure 3.30, d'autres configurations sont signalées, telles que : la méthode d'inférence utilisée (*prod*), l'opérateur d'agrégation de résultats (l'opérateur *MAX*), la méthode de défuzzification utilisée (dans ce cas, la méthode du centre de gravité ou *centroid*).



Figure 3.30 Configurations additionnelles (éditeur de fichiers FIS)

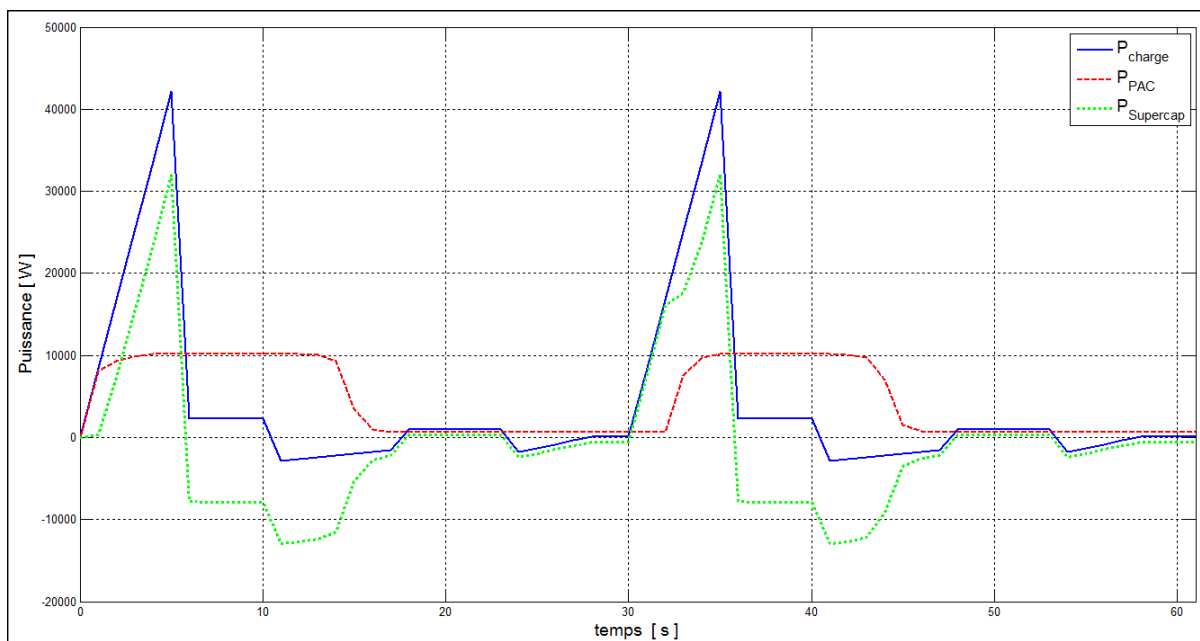


Figure 3.31 Graphique de puissances pour un profil de conduite de 60 secondes (Stratégie de logique floue)

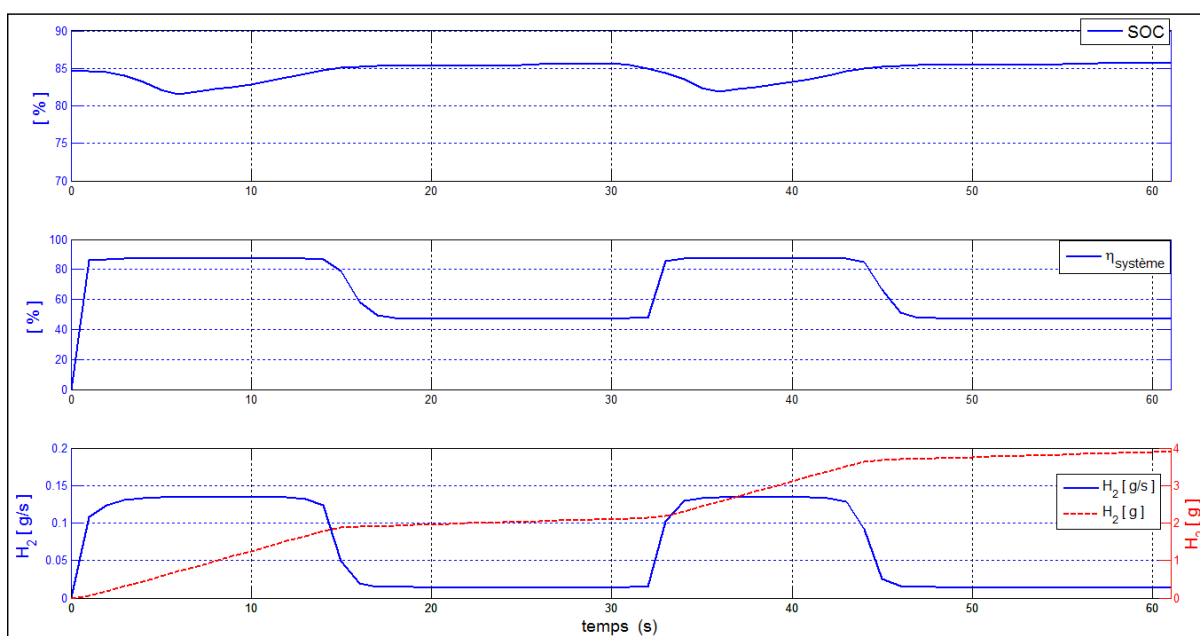


Figure 3.32 SOC, Rendement, Consommation pour un profil de conduite de 60 secondes (Stratégie de logique floue)

Les figures 3.31 et 3.32 montrent les résultats des simulations sur le profil de conduite de 60 secondes (profil « Cycle1_Test60s »). Le SOC est bien conservé à la fin du cycle de conduite et la consommation d'hydrogène résulte 3.61 g. Le choix de la plage de variation des fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie a été effectué de façon empirique.

3.3 Conclusions

Ce chapitre a présenté le modèle du véhicule hybride et des algorithmes ou stratégies de gestion de l'énergie à base de règles dont trois sont basés sur des règles déterministes : thermostat, PI et rendement maximal et un est basé sur des règles de logique floue. Le véhicule hybride a été modélisé avec un supercondensateur comme élément de stockage. Le fonctionnement de l'algorithme thermostat a été vérifié avec un profil de charge très dynamique. Après, cet algorithme et les trois autres développés ont été simulés avec un profil de conduite de 60 secondes et en considérant un SOC initial égal à 85%. La consommation d'hydrogène du véhicule à PAC (FCV) sans élément de stockage développé dans le chapitre précédent, égale à 3.72 g, est utilisée comme base de comparaison avec la consommation du modèle du véhicule électrique hybride à PAC utilisant une des stratégies de contrôle. Le tableau 3.2 suivant présente les résultats des simulations.

Tableau 3.2 Résultats des simulations des algorithmes à base de règles
(Profil de conduite de 60 secondes)

Stratégie	Consommation H2 [g]	SOC final [%]
Thermostat	2.02	79.66
PI	3.53	84.58
Rendement Maximal	4.70	87.50
Logique floue	3.61	85.07

Les réglages des algorithmes ont été faits de façon empirique.

L'algorithme PI donne les meilleurs résultats de simulation par rapport aux autres algorithmes. Une légère diminution de la consommation de combustible est obtenue et le SOC est aussi bien conservé à la fin du cycle de conduite ce qui garantit le bilan d'énergie nul du SC. Son réglage est aussi facile à réaliser. Les résultats obtenus par l'algorithme de logique floue sont aussi proches à ceux de l'algorithme PI. La mise en œuvre de la stratégie de logique floue est facilitée par l'utilisation du bloc « contrôleur de logique floue » de la boîte à outils *fuzzy logic* de Simulink. Le choix de la plage de variation des fonctions d'appartenance des variables d'entrée et de sortie constitue la phase délicate du processus de logique floue et il a fallu réaliser plusieurs essais pour parvenir à de bons résultats de simulation. Une procédure d'optimisation pourrait être effectuée en vue de l'ajustement de la plage de variation des fonctions d'appartenance afin de réduire la consommation d'hydrogène.

L'algorithme thermostat a été construit en vue de la compréhension du fonctionnement du véhicule hybride, mais il ne garantit pas le bilan d'énergie nul à la fin d'un cycle de conduite comme on peut voir dans le tableau des résultats.

Le réglage de l'algorithme de rendement maximal a été le plus difficile à réaliser. Au moyen de la technique du MPPT, l'algorithme trouve rapidement le point de fonctionnement de la PAC qui donne le meilleur rapport puissance nette à puissances brute (c'est-à-dire le rendement système) en vue de la réduction de la consommation de combustible. Ce point de fonctionnement doit être continuellement modifié par un facteur dépendant de l'état de charge du SC en vue de l'obtention d'un bilan d'énergie nul du SC à la fin du cycle de conduite, ce qui s'est avéré difficile à réaliser. De ce fait, les résultats obtenus par cet algorithme n'ont pas été bons.

CHAPITRE 4

ALGORITHMES À BASE D'OPTIMISATION

Ce chapitre présente des stratégies de gestion de l'énergie basées sur l'optimisation. Tout d'abord, il faut déterminer l'équation qui définit la consommation d'hydrogène. À partir des équations 1.61, 1.62 et 1.65, on peut déterminer que celle-ci est proportionnelle à la puissance de la PAC.

$$W_{H_2[g/s]} = \frac{P_{PAC}}{\eta_{stack} \cdot \Delta H} \quad (4.1)$$

Alors, si l'on réalise l'intégration numérique, la consommation d'hydrogène résulte :

$$Cons_{H_2[g]} = \int \frac{P_{PAC}}{\eta_{stack} \cdot \Delta H} dt \quad (4.2)$$

4.1 L'optimisation globale

Si le profil de conduite est connu à priori, une méthode d'optimisation globale peut être utilisée afin de déterminer l'optimum de l'équation 4.2. Donc, la minimisation de la consommation équivaut à déterminer le profil de puissances de la PAC qui produit la consommation minimale d'hydrogène pour réaliser le profil de conduite.

La fonction objective à optimiser est donc :

$$Cons_{H_2 \min} = \min \sum_0^{tf} P_{PAC}(t_k) \Delta t_k = \min (P_{PAC}(t_0) \cdot \Delta t_0 + \dots + P_{PAC}(t_f) \cdot \Delta t_f) \quad (4.3)$$

Avec les contraintes suivantes :

$$P_{PAC_min} \leq P_{PAC}(t_k) \leq P_{PAC_max} \quad (4.4)$$

$$SOC_{min} \leq SOC(t_k) \leq SOC_{max} \quad (4.5)$$

$$\Delta SOC = SOC(t_{final}) - SOC(t_{initio}) = \sum_0^{tf} P_{SC}(t_k) \cdot \Delta t_k = 0 \quad (4.6)$$

Et avec l'équation de l'équilibre de puissances donnée par :

$$P_{CC} = P_{PAC} + P_{ES} \quad (4.7)$$

Les expressions 4.4 et 4.5 limitent la puissance de la PAC et le SOC du SC tandis que l'expression 4.6 indique que le bilan d'énergie de l'ES doit être nul à la fin du cycle de conduite pour garantir que le SOC final de l'ES soit égal au SOC initial.

4.1.1 Optimisation par hybridation des méthodes stochastiques et déterministes

En vue de la détermination du minimum global, une méthode d'optimisation hybride est implantée qui combine une méthode d'optimisation stochastique et une méthode d'optimisation déterministe. L'optimisation commence avec une méthode stochastique (les algorithmes génétiques) qui est arrêtée après un nombre déterminé d'itérations. Le point minimal trouvé par la méthode stochastique sert de point initial pour une méthode d'optimisation déterministe (la fonction « *Fmincon* » de Matlab) qui est démarrée par la suite. La figure 4.1 montre la fenêtre de l'outil « *optimisation* » de Matlab qui est lancée au moyen de la commande *optimtool*, à partir du *prompt* de Matlab. Dans cette fenêtre, la *fitness fonction* ou la fonction objectif (l'expression 4.3), les contraintes, les limites, la population initiale, le nombre de variables sont spécifiés. Les programmes pour la *fitness fonction* et les contraintes sont présentés aux annexes (Algorithme-A I-7 et Algorithme-A I-8).

Le programme Matlab (Algorithme-A I-6) initialise les paramètres avant de faire tourner l'outil « *optimisation* ». L'optimisation détermine les valeurs de la puissance optimale de la PAC chaque seconde. Ces valeurs sont conservées dans le fichier PFC_opt2 qui sera chargé du *workspace* lors de la simulation du véhicule (figure 4.2).

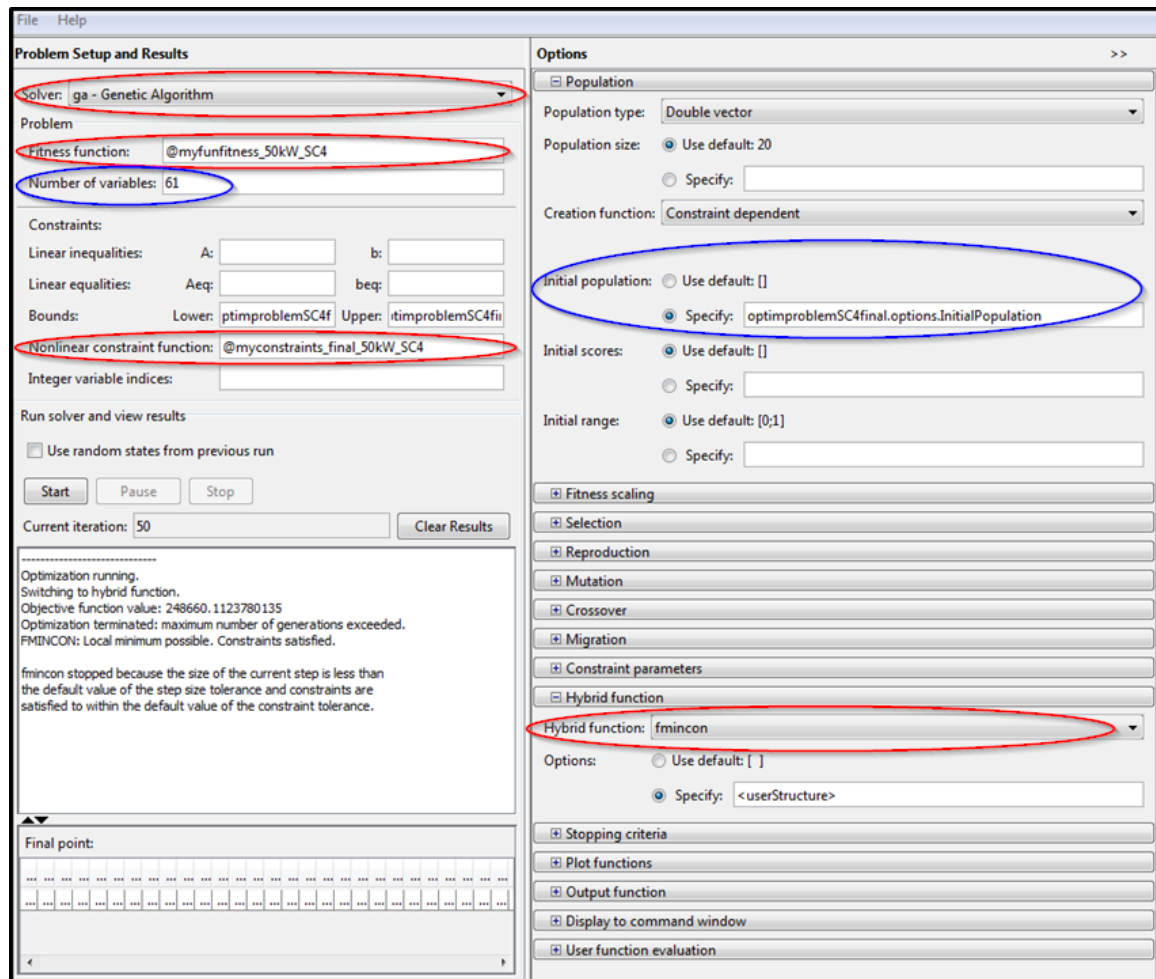


Figure 4.1 Fenêtre de l'outil d'optimisation (commande optimtool)

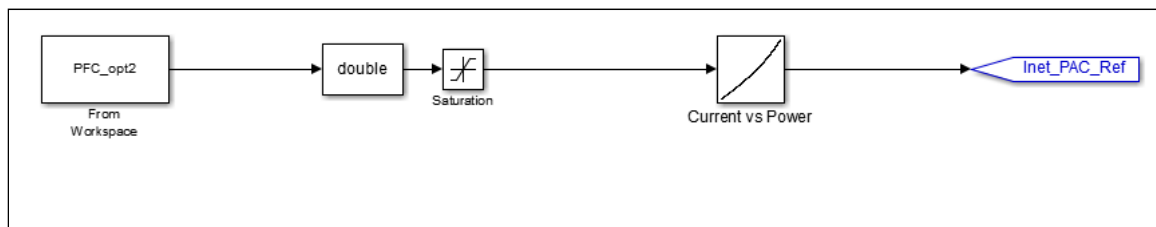


Figure 4.2 Stratégie d'optimisation globale

Les figures 4.3 et 4.4 présentent les résultats de la simulation sur un profil de conduite de 60 secondes (profil « Cycle1_Test60s »).

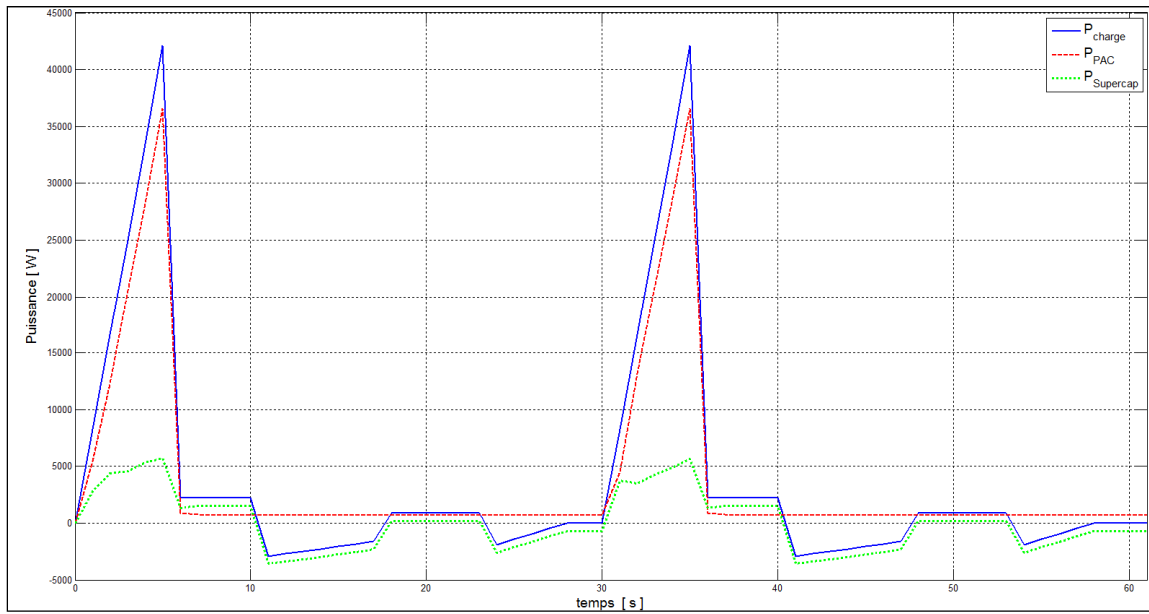


Figure 4.3 Graphique de puissances pour un profil de conduite de 60 secondes
(Stratégie d'optimisation globale)

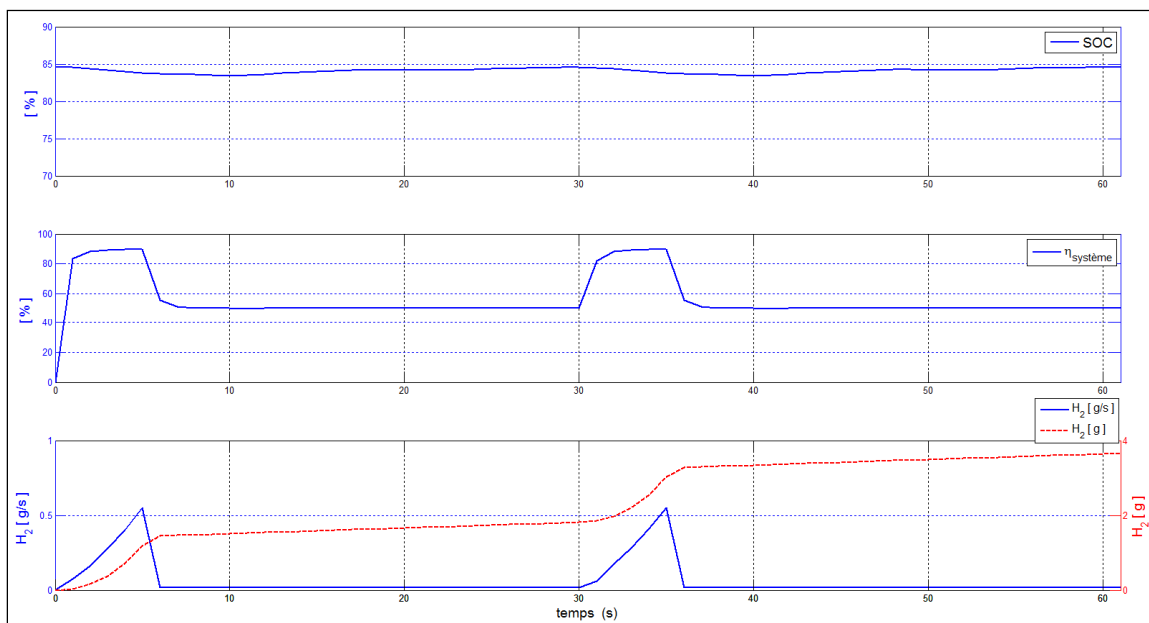


Figure 4.4 SOC, Rendement, Consommation pour un profil de conduite de 60 secondes
(Stratégie d'optimisation globale)

La consommation d'hydrogène résulte 3.66 g et le SOC est bien conservé à la fin du cycle de conduite. Cependant, le SC participe à peine dans la conduite du véhicule et il est utilisé principalement pour la récupération de l'énergie lors de freinages.

4.2 Optimisation en temps réel (*on line optimisation*)

Si le profil de conduite n'est pas connu, l'équation 4.2 doit être optimisée à chaque instant pour aboutir à la consommation minimale de combustible, ce qui veut dire :

$$Cons_{H_2 \min} = Min(P_{PAC}(t_0).\Delta t_0) + Min(P_{PAC}(t_1).\Delta t_1) + Min(P_{PAC}(t_f).\Delta t_f) \quad (4.8)$$

4.2.1 Stratégie de minimisation de la consommation équivalente (ECMS)

ECMS introduit le concept de « consommation équivalente ». La consommation équivalente totale à l'instant t_i est donnée par la consommation réelle d'hydrogène effectuée par la PAC à l'instant t_i , dénotée $C_{H_2}(P_{PAC}(t_i))$, à laquelle on ajoute la consommation équivalente d'hydrogène effectuée par l'ES, dénotée $C_{H_2_equi}(P_{ES}(ti))$.

$$C_{H_2_equi}(t_i) = C_{H_2}(P_{PAC}(t_i)) + C_{H_2_equi}(P_{ES}(ti)) \quad (4.9)$$

$C_{H_2_equi}(P_{ES}(ti))$ peut être expliquée comme suit .

Si, à l'instant t_i , la puissance de l'ES est négative ($P_{ES} < 0$), ce qui signifie que l'on charge l'ES, $C_{H_2_equi}(P_{ES}(ti))$ peut être considérée comme l'hydrogène que la PAC n'aura pas à consommer ultérieurement pour recharger l'ES, c'est-à-dire comme une économie de combustible. Par contre, si la puissance de l'ES est positive ($P_{ES} > 0$), ce qui signifie que l'on décharge l'ES, $C_{H_2_equi}(P_{ES}(ti))$ peut être considérée comme l'hydrogène que la PAC devra consommer ultérieurement pour restituer l'état de la charge de l'ES.

Donc, on peut utiliser l'expression 4.10 suivante pour déterminer la consommation équivalente d'hydrogène effectuée par l'ES.

$$C_{H_2-equi}(P_{ES}(ti)) = \frac{C_{H_2}(P_{PAC-Moy})}{\eta_{batt}} \cdot \frac{P_{ES}(ti)}{P_{PAC-Moy}} \quad (4.10)$$

Où :

$P_{PAC-Moy}$ est la puissance moyenne de la PAC définie comme la puissance à laquelle la PAC aura à travailler ultérieurement pour charger l'ES ou comme la puissance à être délivrée ultérieurement par l'ES pour restituer son état de charge.

$C_{H_2}(P_{PAC-Moy})$ est la consommation d'hydrogène à la puissance moyenne qui, comme $C_{H_2}(P_{PAC}(t_i))$, est calculée en utilisant le graphique de consommation du GPAC (figure 3.8).

Donc, la consommation équivalente totale à l'instante t_i résulte :

$$C_{H_2-equi}(t_i) = C_{H_2}(P_{PAC}(t_i)) + \frac{C_{H_2}(P_{PAC-Moy})}{\eta_{batt}} \cdot \frac{P_{ES}(ti)}{P_{PAC-Moy}} \quad (4.11)$$

De plus, en vue de la régulation du SOC, l'expression précédente doit être modifiée par un facteur de pondération, dénommé $f(soc)$ et la consommation équivalente totale devient :

$$C_{H_2-equi}(t_i) = C_{H_2}(P_{PAC}(t_i)) + f(soc) \cdot \frac{C_{H_2}(P_{PAC-Moy})}{\eta_{batt}} \cdot \frac{P_{ES}(ti)}{P_{PAC-Moy}} \quad (4.12)$$

Où $f(soc)$ est calculé par l'expression suivante :

$$f(soc) = 1 - \mu \cdot \left(\frac{SOC - SOC_{REF}}{SOC_{REF} - SOC_{MIN}} \right) \quad (4.13)$$

Avec μ : un facteur d'ajustement additionnel.

De l'expression 4.13, on peut se rendre compte que lorsque le SOC s'approche du SOC_{min} , $f(soc)$ est grand et l'on pénalise l'utilisation de l'ES et favorise le fonctionnement de la

PAC. Par contre, lorsque le SOC s'approche du SOC_{ref} , $f(soc)$ est petit et le fonctionnement de l'ES est favorisé.

Le modèle Simulink présenté à la figure 4.5 détermine la consommation équivalente totale. Ici, la puissance moyenne de la PAC a été fixée à 10 kW et la puissance instantanée de la PAC varie en rampe de 0 à 50 kW. Si le SOC est de 70 % et la puissance de la charge est de 17 kW, la puissance de la PAC qui minimise la consommation équivalente totale est 45 kW (voir la figure 4.6). Par contre, si le SOC est de 86.5 % et la puissance de la charge est conservée, la puissance de la PAC qui minimise la consommation équivalente totale est 8 kW (voir la figure 4.7).

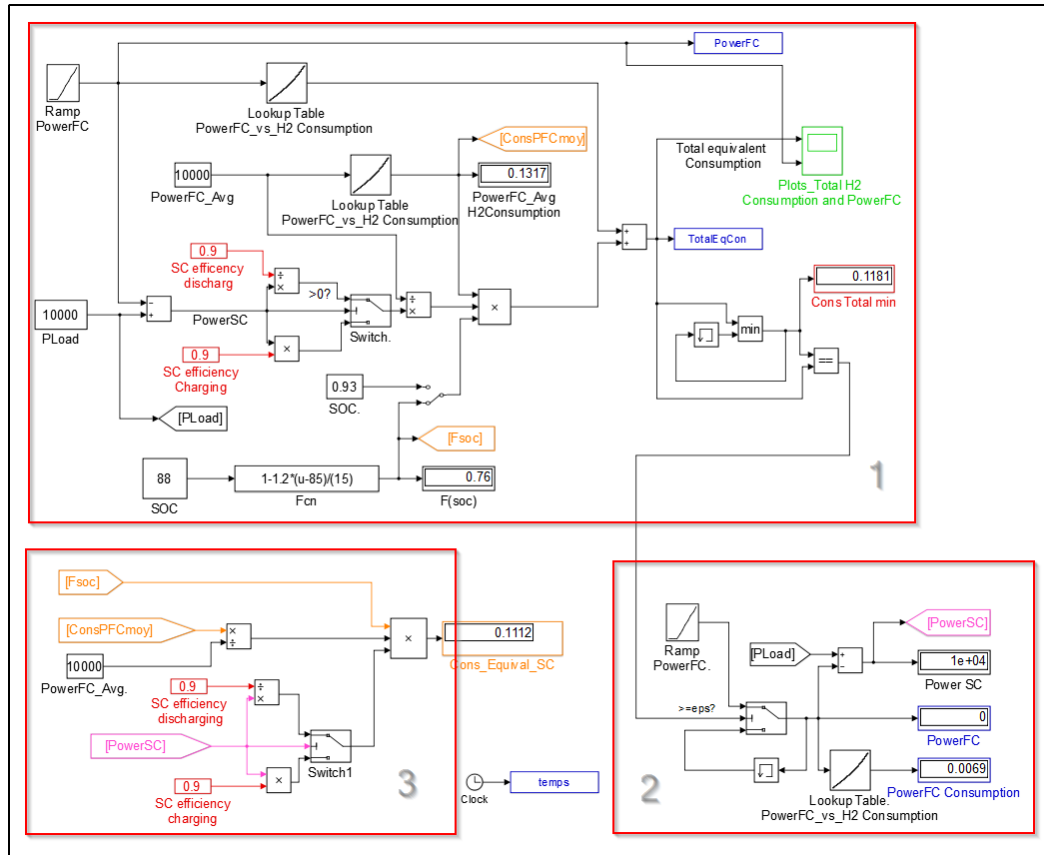


Figure 4.5 Modèle Simulink pour le calcul de la consommation équivalente totale

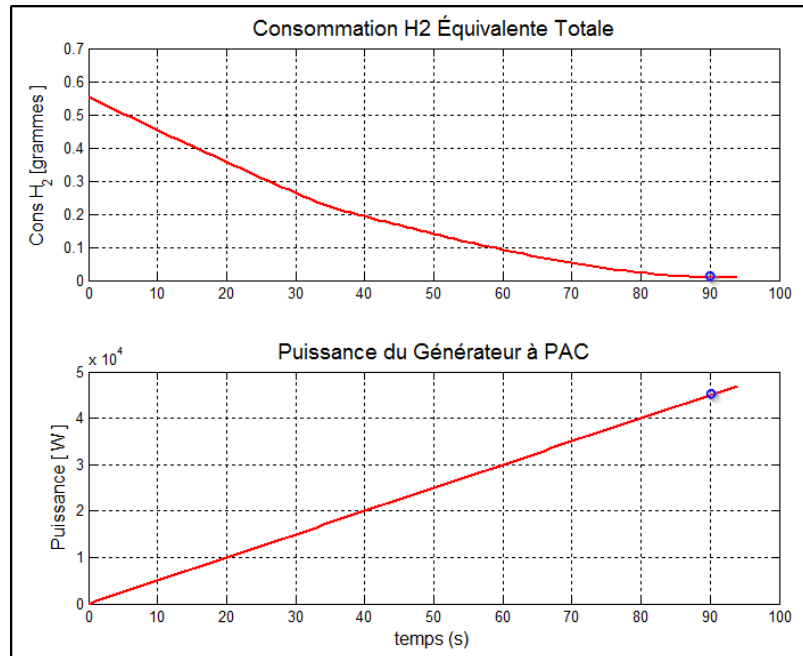


Figure 4.6 Consommation Équivalente Totale et Puissance du GPAC pour $SOC = 70\%$ et $P_{Load} = 17kW$ ($P_{PAC_optimale} = 45kW$)

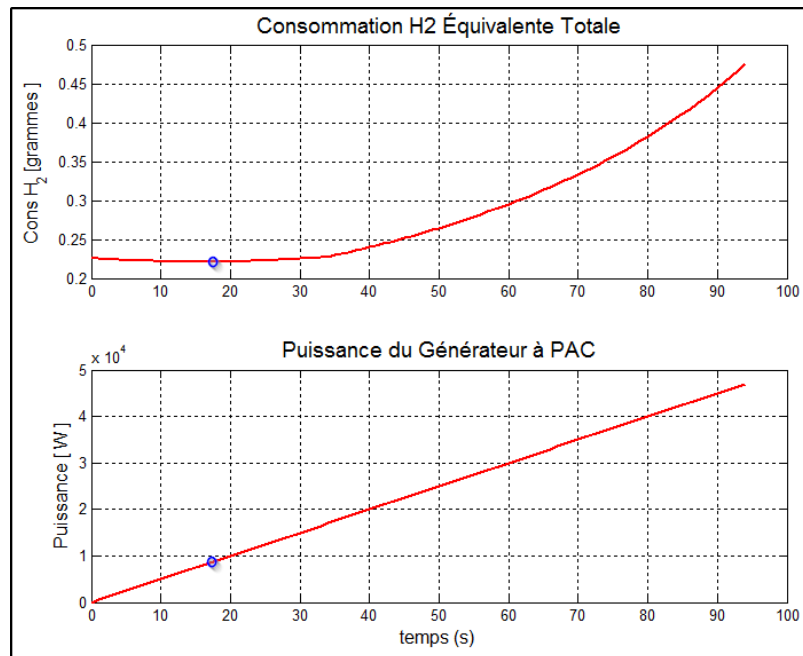


Figure 4.7 Consommation Équivalente Totale et Puissance du GPAC pour $SOC = 86.5\%$ et $P_{Load} = 17kW$ ($P_{PAC_optimale} = 8kW$)

L'algorithme sur le modèle du FCHEV est réalisé en utilisant Stateflow (figure 4.9) et inclus dans le bloc « *chart* » à la figure 4.8. La puissance moyenne de la PAC est fixée à 10 kW et à chaque seconde (la fréquence du signal *SWITCH*), l'algorithme prend les valeurs du SOC et de la puissance de la charge et fait varier la puissance de la PAC pour déterminer la valeur de celle-ci qui minimise la consommation équivalente totale au moyen de l'équation 4.12. Au lieu de l'expression 4.13, une table de recherche qui a comme entrée le SOC du SC (figure 4.10) est employée pour le calcul du facteur de pondération $f(soc)$ ce qui donne des meilleurs résultats de simulation.

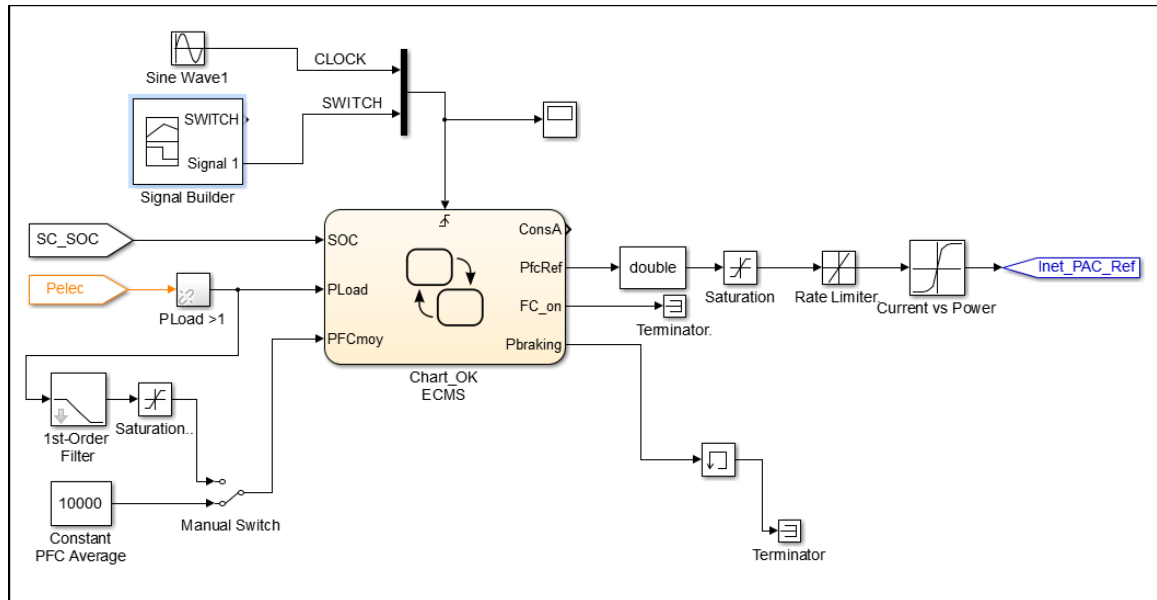


Figure 4.8 Stratégie de contrôle ECMS

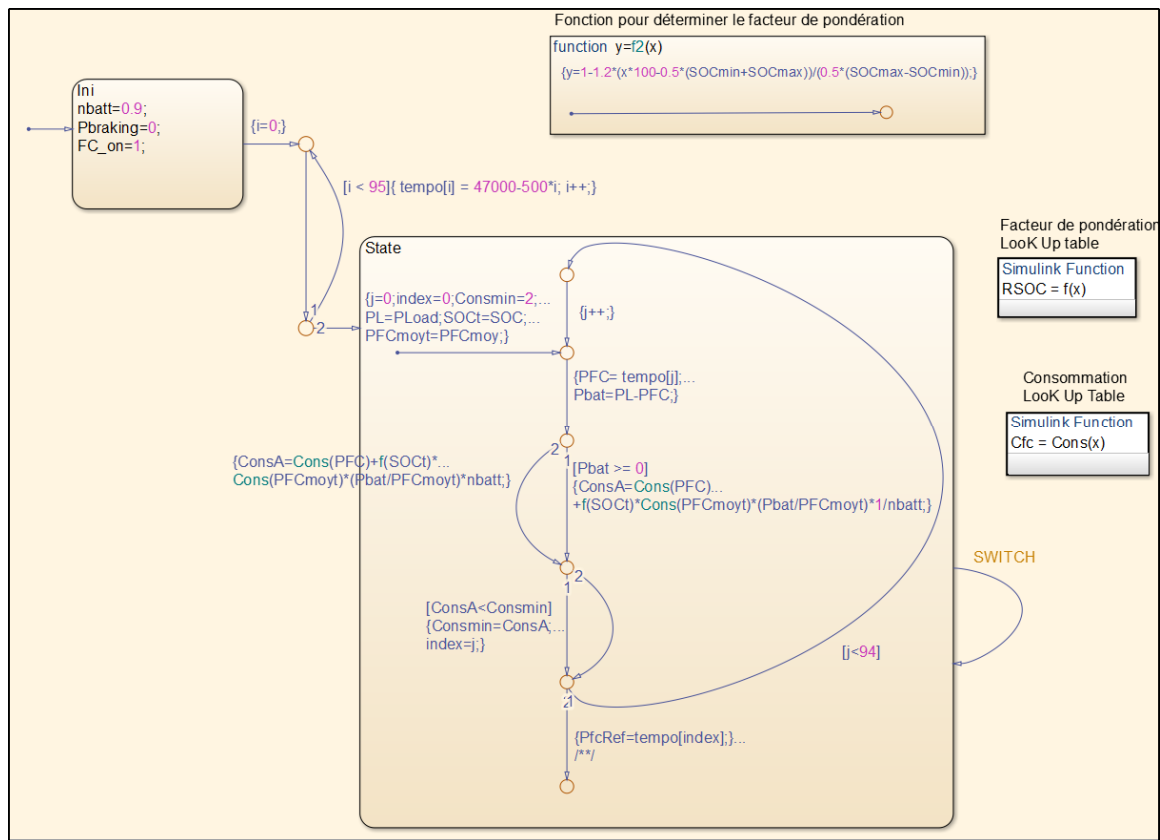


Figure 4.9 Diagramme Stateflow dans le bloc « chart »
(Stratégie de contrôle ECMS)

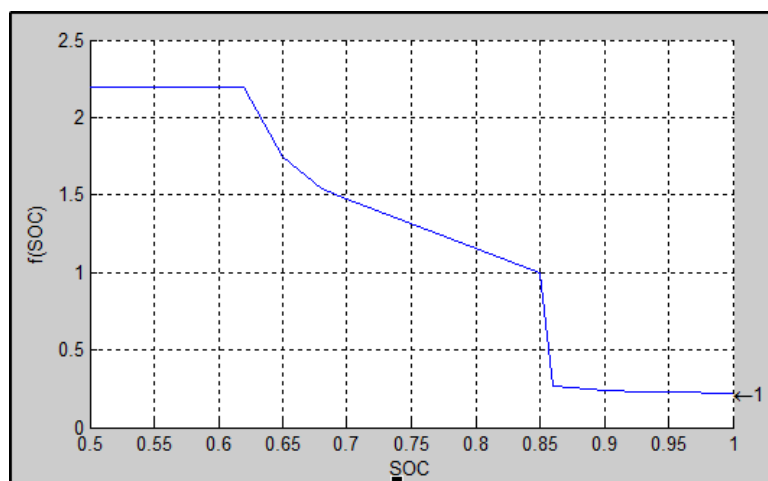


Figure 4.10 Graphique de la table de recherche pour le calcul
du facteur de pondération

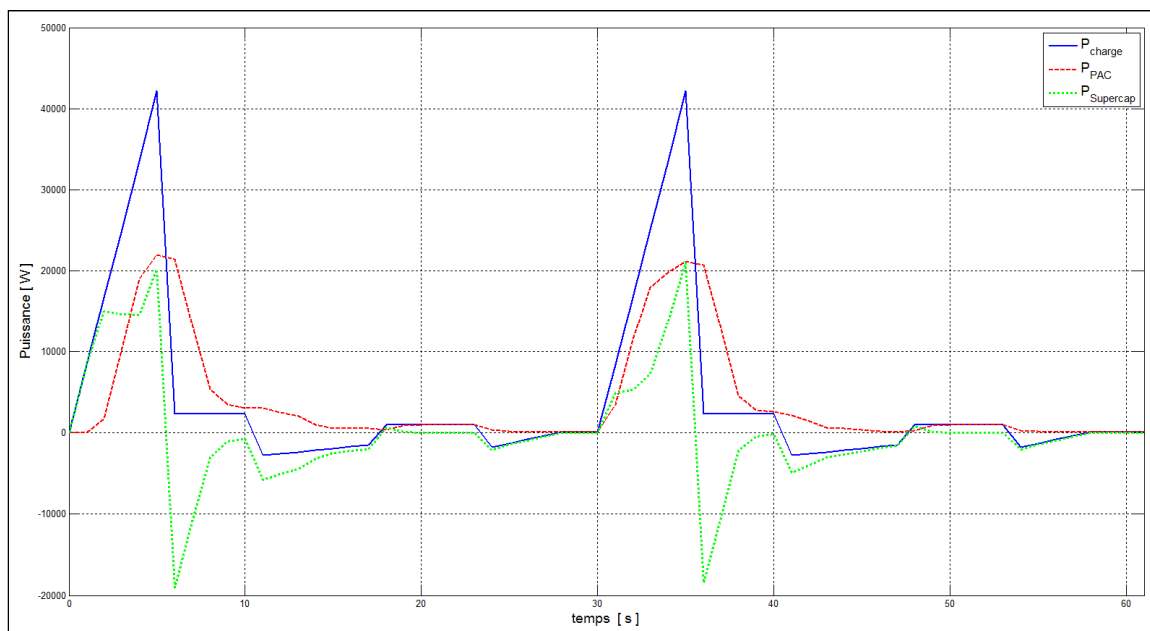


Figure 4.11 Graphique de puissances pour un profil de conduite de 60 secondes (Stratégie de contrôle ECMS)

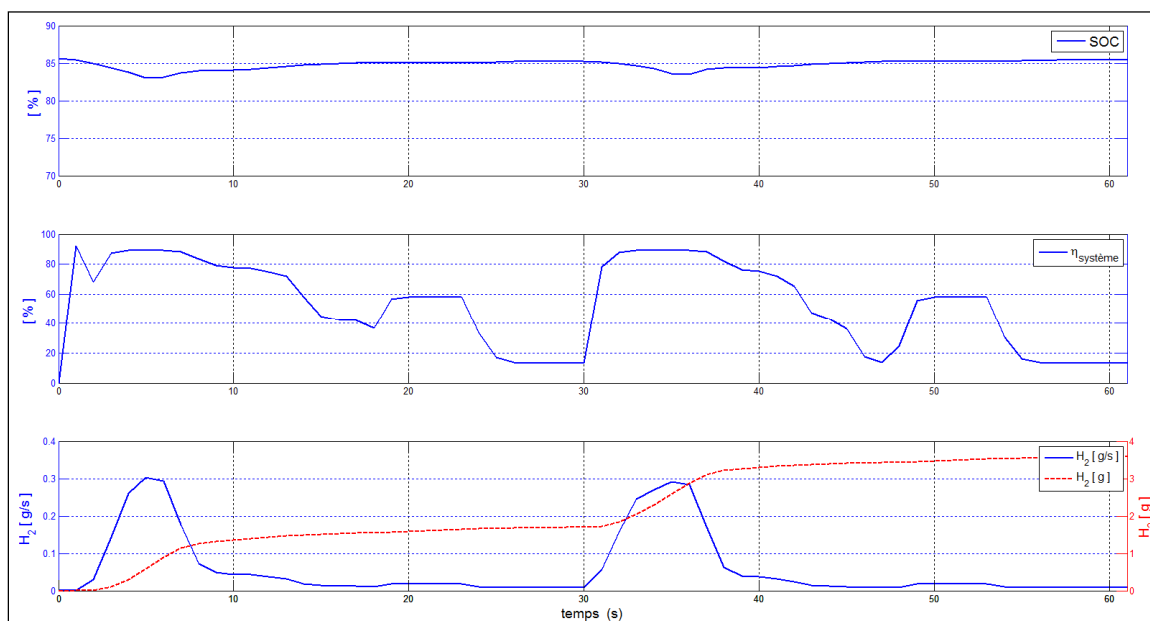


Figure 4.12 SOC, Rendement, Consommation pour un profil de conduite de 60 secondes (Stratégie de contrôle ECMS)

Les figures 4.11 et 4.12 montrent les résultats de la simulation sur un profil de conduite de 60 secondes (profil « Cycle1_Test60s »). Le SOC est bien conservé à la fin du cycle de conduite et la consommation d'hydrogène est de 3.64 g. La clé pour le bon fonctionnement de cet algorithme est de bien choisir la fonction de pondération $f(soc)$.

4.3 Conclusions

Ce chapitre a présenté des algorithmes à base d'optimisation globale et en temps réel. L'algorithme d'optimisation global a été développé avec l'outil « *optimisation* » de Matlab et en utilisant une méthode d'optimisation hybride qui combine une méthode stochastique (les algorithmes génétiques) avec une méthode déterministe (la fonction « Fmincon » de Matlab). Cela a permis de profiter des bonnes caractéristiques de chaque méthode. L'optimisation hybride commence avec la méthode des algorithmes génétiques qui est arrêtée après un nombre déterminé d'itérations et le point minimal trouvé sert de point de début pour la fonction « Fmincon » qui est démarrée par la suite. Avec un ordinateur pourvu d'un processeur AMD Phenom (tm) II de 2.80 GHz, après quelques minutes, le profil de puissances de la PAC qui produit la consommation minimale d'hydrogène pour réaliser le profil de conduite est obtenu.

L'optimisation globale a besoin que le profil de conduite soit connu à priori. Donc, les résultats obtenus ne sont valides qu'en laboratoire, mais ils peuvent être utilisés comme base de comparaison avec d'autres stratégies en temps réel. Un algorithme d'optimisation en temps réel, dénommé « Stratégie de minimisation de la consommation équivalente » ou ECMS, a aussi été développé. Celui-ci introduit le concept de la consommation équivalente. Un modèle Simulink a été mis en œuvre pour l'étude de cet algorithme qui a été par la suite développé en utilisant Stateflow sur le modèle du véhicule hybride.

Les deux algorithmes d'optimisation ont été testés sur un profil de conduite de 60 secondes (profil « Cycle1_Test60s »). Le tableau 4.1 suivant présente les résultats des simulations des deux algorithmes d'optimisation ainsi que les résultats des algorithmes basés sur des règles.

Tableau 4.1 Résultats des simulations des algorithmes à base de règles et à base d'optimisation (Profil de conduite de 60 secondes)

Stratégie	Consommation H2 [g]	SOC final [%]
Thermostat	2.02	79.66
PI	3.53	84.58
Rendement Maximal	4.70	87.50
Logique floue	3.61	85.07
Optimisation Globale	3.66	85.0
ECMS	3.64	84.63

Les résultats de la consommation de combustible et du SOC final obtenus avec ECMS ainsi que ceux obtenus par les algorithmes PI et de logique floue sont similaires à ceux obtenus par l'algorithme d'optimisation globale. Cependant, comme on peut observer sur le diagramme des puissances à la figure 4.3, avec l'optimisation globale, la PAC fournit presque toute la puissance demandée par la conduite du véhicule et le SC est utilisé principalement pour la récupération de l'énergie lors de freinages.

ECMS est mise en œuvre en utilisant Stateflow sur le modèle du véhicule hybride. Dans le diagramme Stateflow (voir la figure 4.9), le calcul de la puissance de la PAC qui minimise la consommation équivalente totale (équation 4.12) est effectué au moyen d'une boucle *while*. Une fonction d'optimisation telle que « Fmincon » pourrait aussi être utilisée pour ce calcul. On a pu aussi observer que la valeur de puissance moyenne de la PAC, qui a été fixée à 10 kW, n'a qu'une petite influence sur le résultat de la simulation qui dépend principalement de la fonction de pondération $f(soc)$.

Le chapitre suivant continuera les tests des algorithmes qui ont donné les meilleurs résultats de simulation, à savoir les algorithmes PI, de logique floue et ECMS.

CHAPITRE 5

SIMULATIONS SUR UN PROFIL DE CONDUITE DE LONGUE DURÉE

Dans ce chapitre, les algorithmes de gestion de l'énergie les plus performants des chapitres précédents, à savoir les algorithmes PI, de logique floue et ECMS, sont évalués avec des profils de conduite d'une plus longue durée. Le profil de conduite urbaine dénommé « *Urban Dynamometer Driving Schedule* » (UDDS) répété deux fois, qui comporte plusieurs arrêts et accélérations, est utilisé ainsi que le profil de conduite US6 encore plus exigeant. Les figures 5.1 et 5.2 présentent ces profils de conduite avec les puissances électriques du moteur qui en résultent avec le programme Matlab (Algorithme-A I-5).

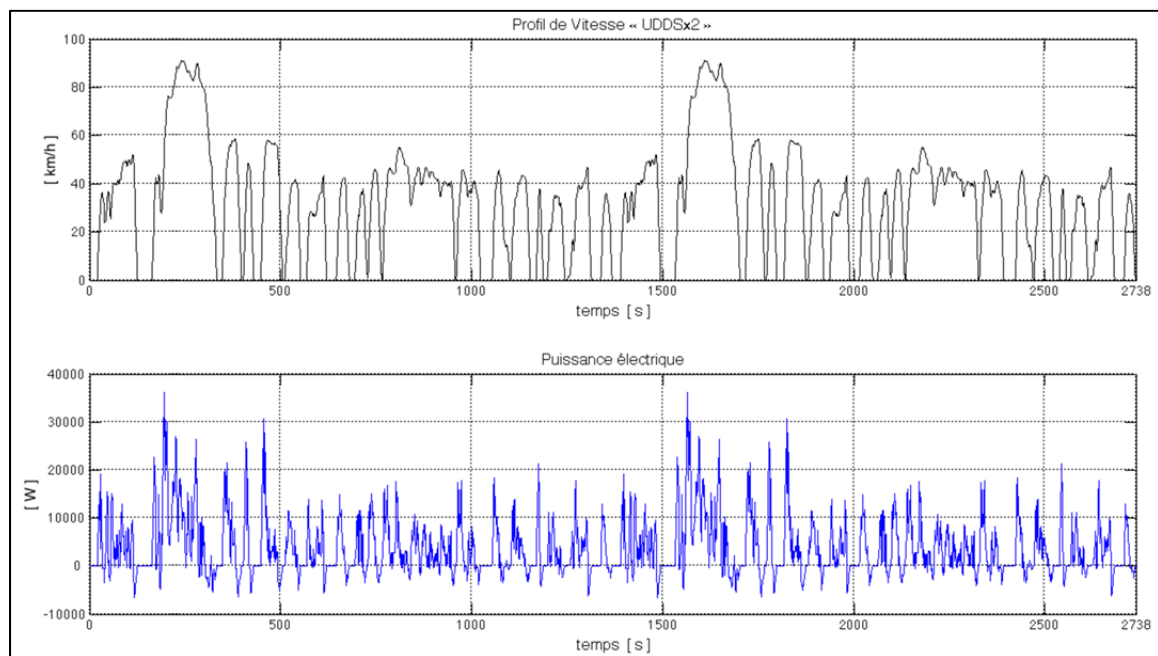


Figure 5.1 Profil de conduite UDDSx2 et puissance électrique

Le mode « Accelerator » de Simulink a été utilisé pour la réalisation des simulations sur un ordinateur avec un processeur AMD Phenom (tm) II de 2.80 GHz.

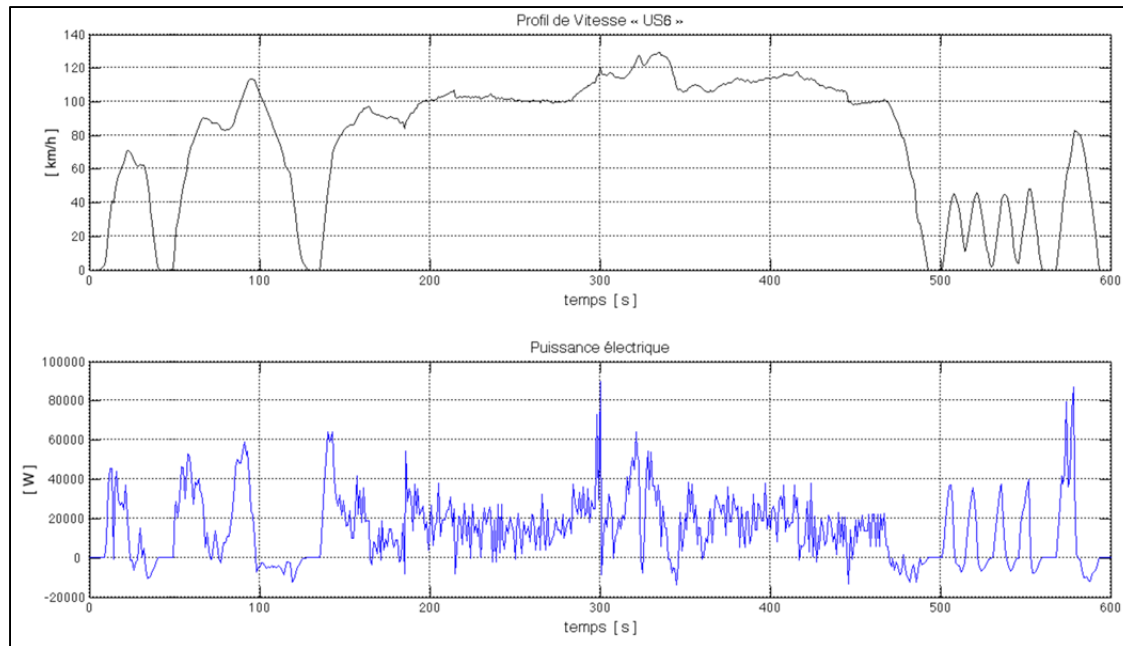


Figure 5.2 Profil de conduite US6 et puissance électrique

5.1 Simulations avec le profil de conduite UDDSx2

La figure 5.3 montre la consommation de H_2 sur le profil UDDSx2 réalisée par le véhicule à PAC sans ES à utiliser comme référence. La distance et la durée du parcours sont respectivement de 23.97 km et de 2 738 secondes.

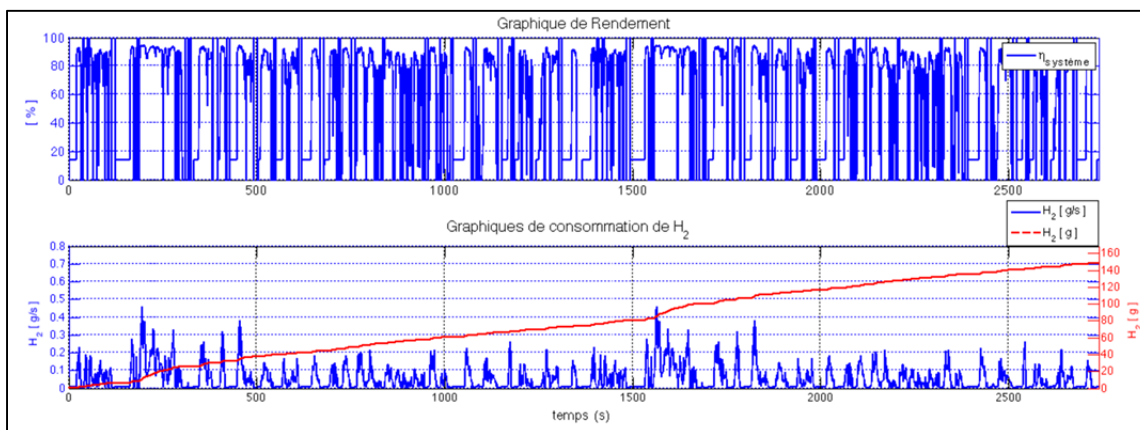


Figure 5.3 Rendement et Consommation_Profil de conduite UDDSx2
(Véhicule à PAC sans ES)

Les figures 5.7 à 5.9 présentent les résultats des simulations sur le profil UDDSx2 pour chacun des algorithmes à évaluer dans cette partie du mémoire.

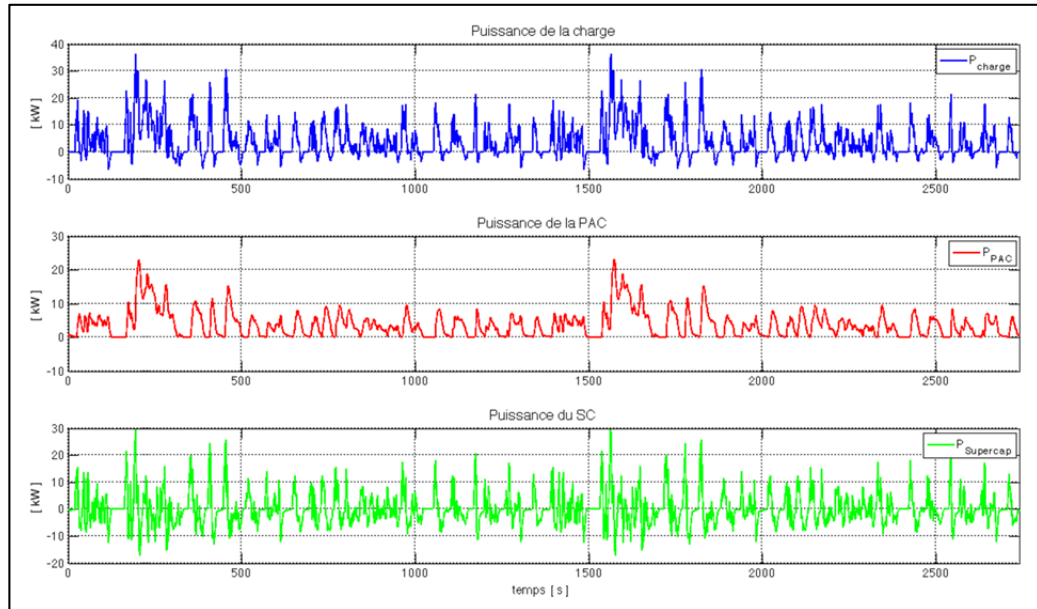


Figure 5.4 Graphique de puissances_Profil de conduite UDDSx2 (Stratégie PI)

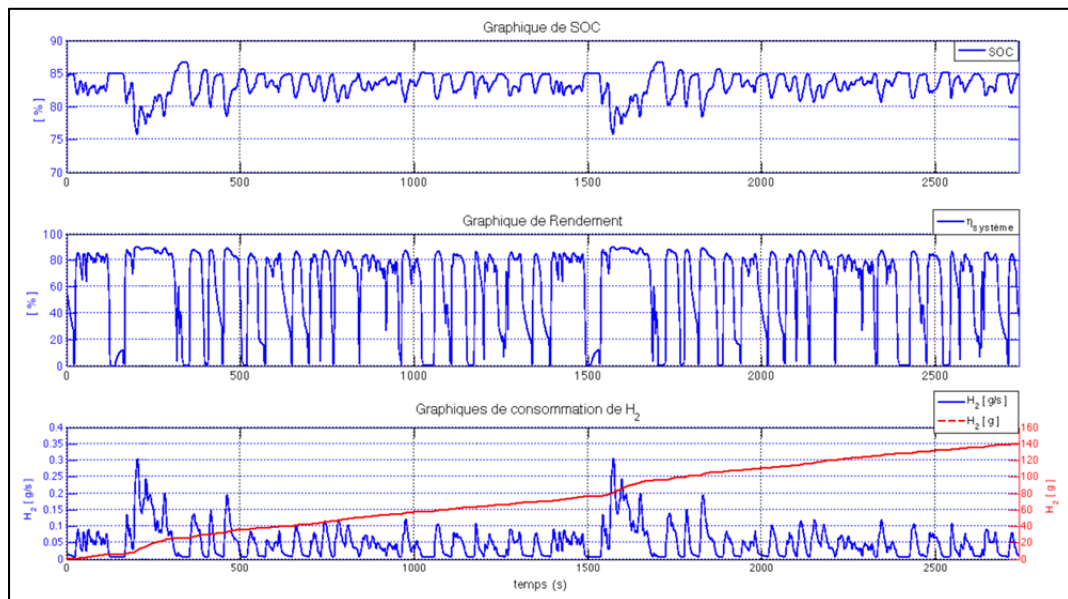


Figure 5.5 SOC, Rendement, Consommation_Profil de conduite UDDSx2 (Stratégie PI)

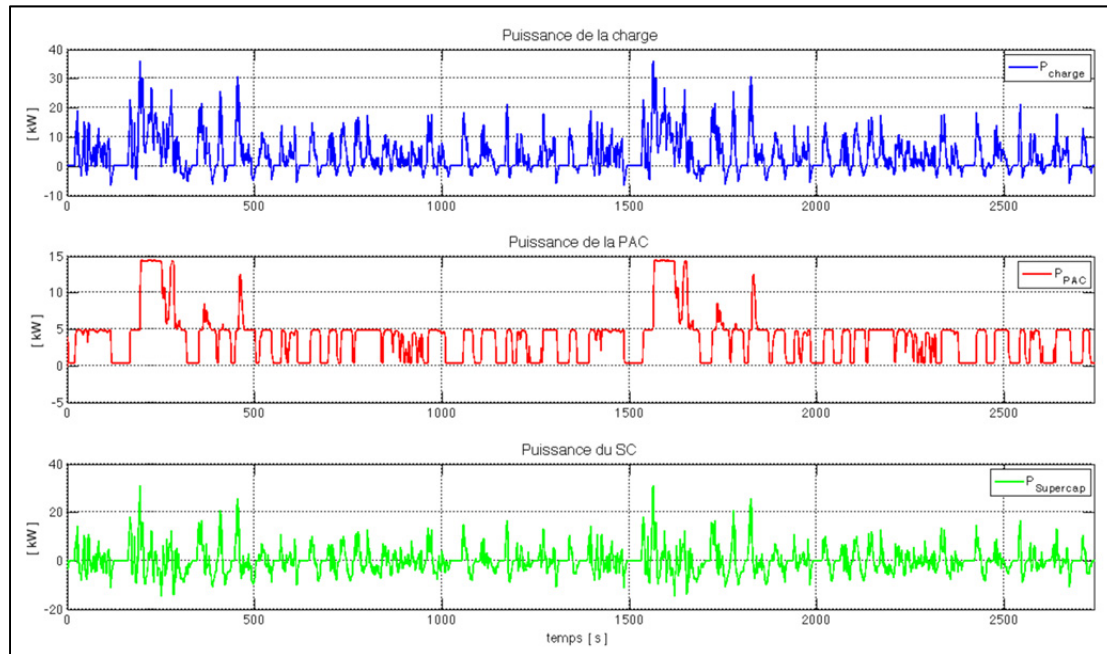


Figure 5.6 Graphique de puissances_Profil de conduite UDDSx2
(Stratégie de logique floue)

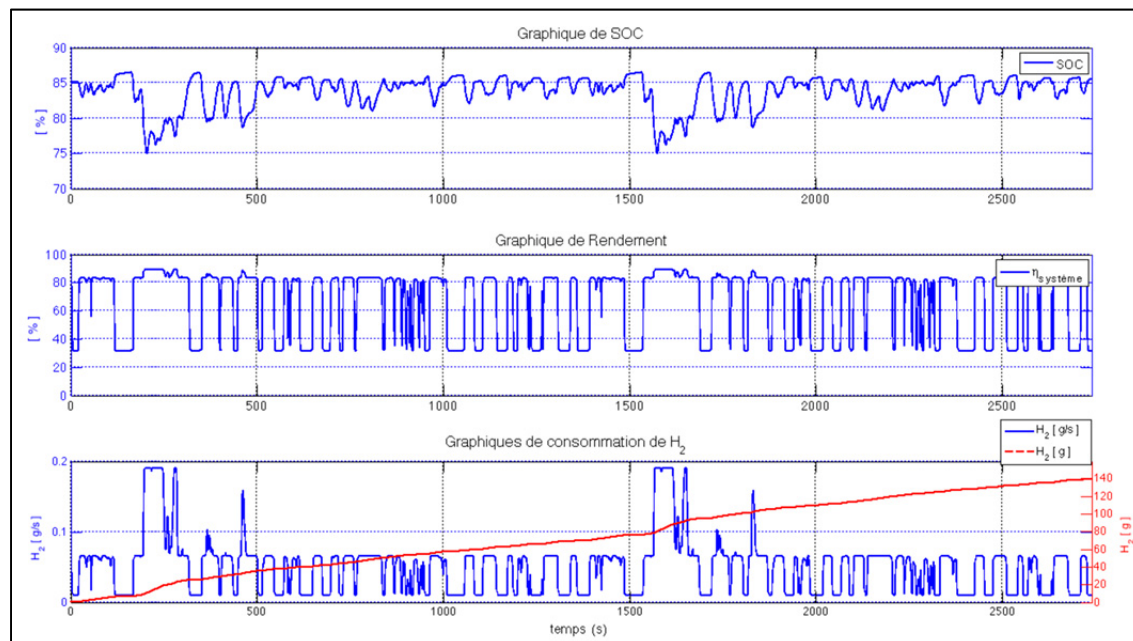


Figure 5.7 SOC, Rendement, Consommation_Profil de conduite UDDSx2
(Stratégie de logique floue)

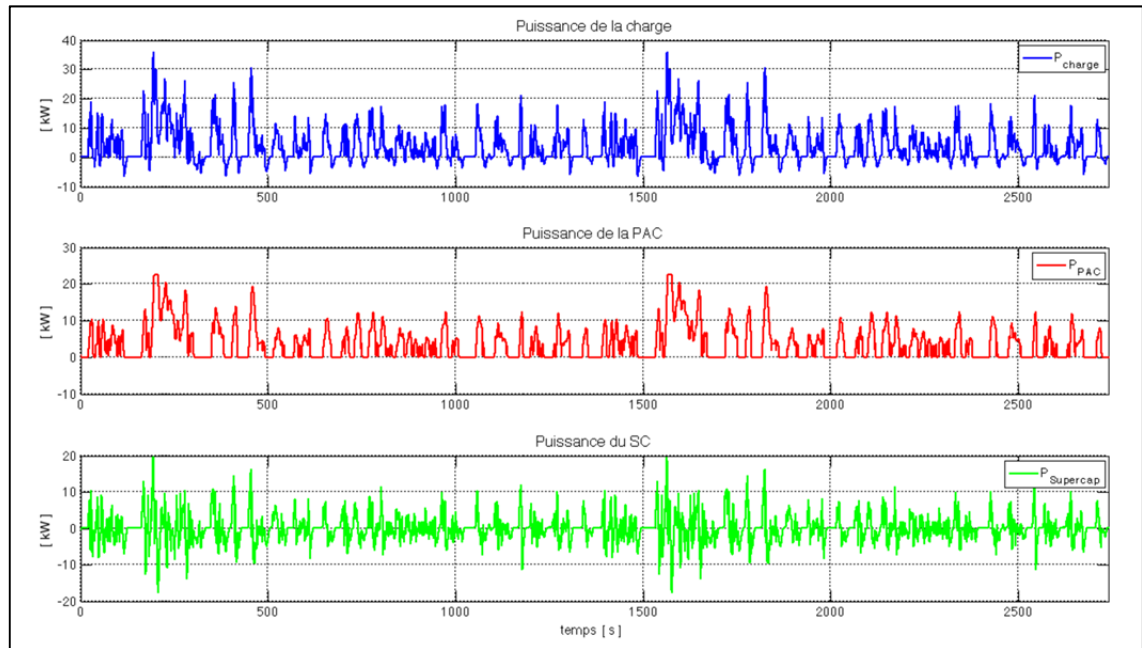


Figure 5.8 Graphique de puissances_Profil de conduite UDDSx2
(Stratégie de contrôle ECMS)

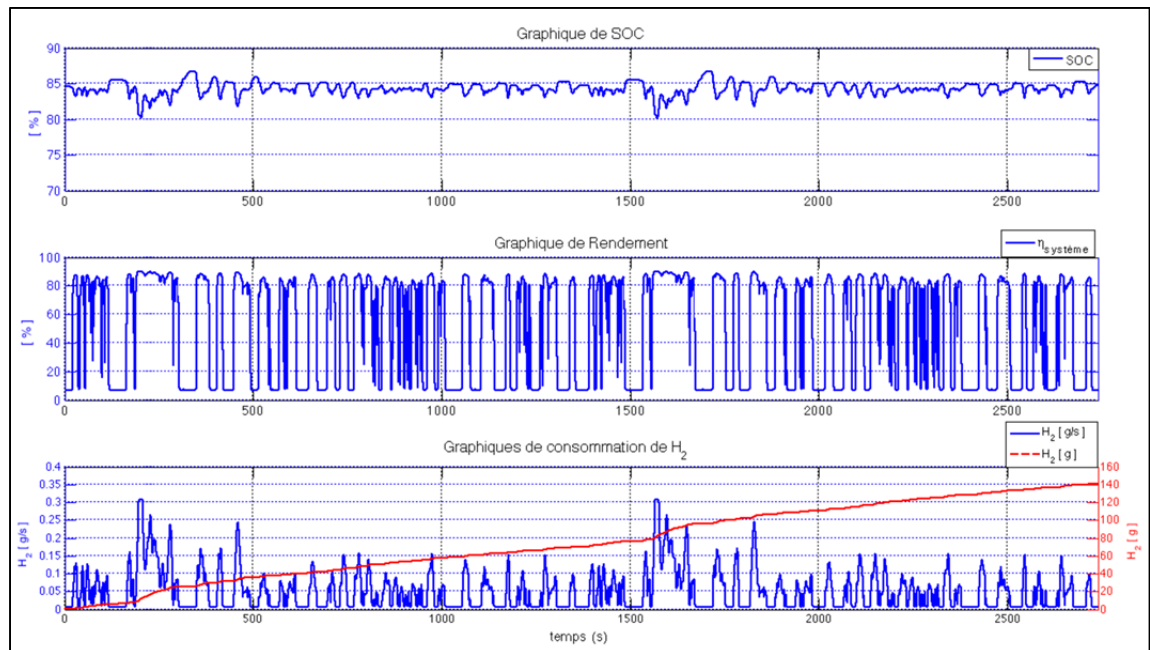


Figure 5.9 SOC, Rendement, Consommation_Profil de conduite UDDSx2
(Stratégie de contrôle ECMS)

Le tableau 5.1 présente un résumé des résultats des simulations pour le profil de conduite UDDSx2.

Tableau 5.1 Résultats obtenus des simulations avec le profil de conduite UDDSx2 de 2 739 secondes

Stratégie	Cons_H ₂ [g]	SOC final [%]	Durée de la simulation [s]
Algorithme PI	140.12	84.81	189.7261
Algorithme de logique floue	139.53	85.55	244.593
Algorithme ECMS	140.87	84.72	327.3884
Véhicule à PAC sans ES	148.63	-	80.478

5.2 Simulations avec le profil de conduite US6

La figure 5.10 montre la consommation de H₂ sur le profil US6 réalisée par le véhicule à PAC sans ES à utiliser comme référence. Dans ce cas, la distance et la durée du parcours sont respectivement de 12.88 km et de 600 secondes.

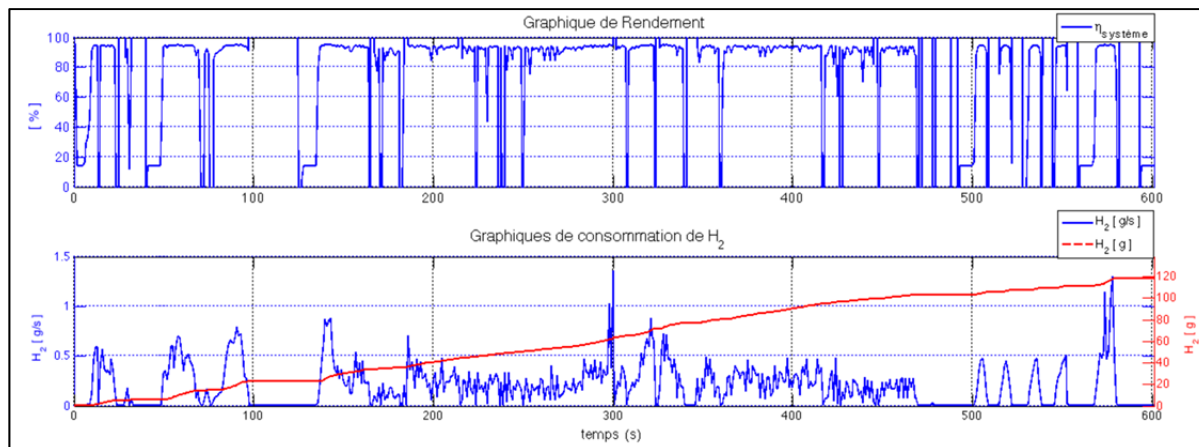


Figure 5.10 Rendement et Consommation_Profil de conduite US6 (Véhicule à PAC sans ES)

Les figures 5.11 à 5.16 présentent les résultats des simulations sur le profil US6 pour chacun des algorithmes à évaluer dans cette partie du mémoire.

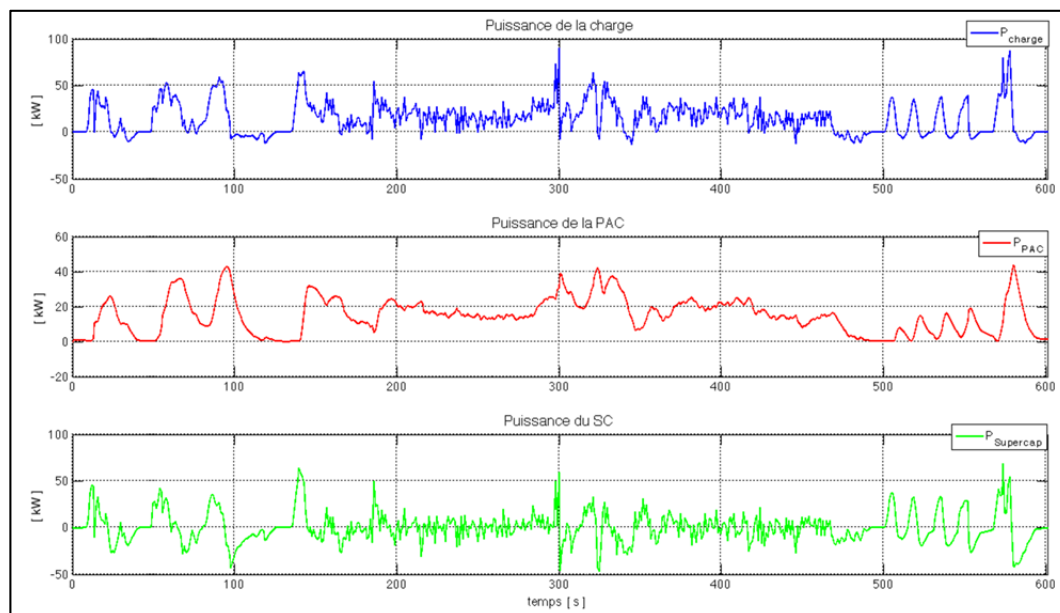


Figure 5.11 Graphique de puissances_Profil de conduite US6 (Stratégie PI)

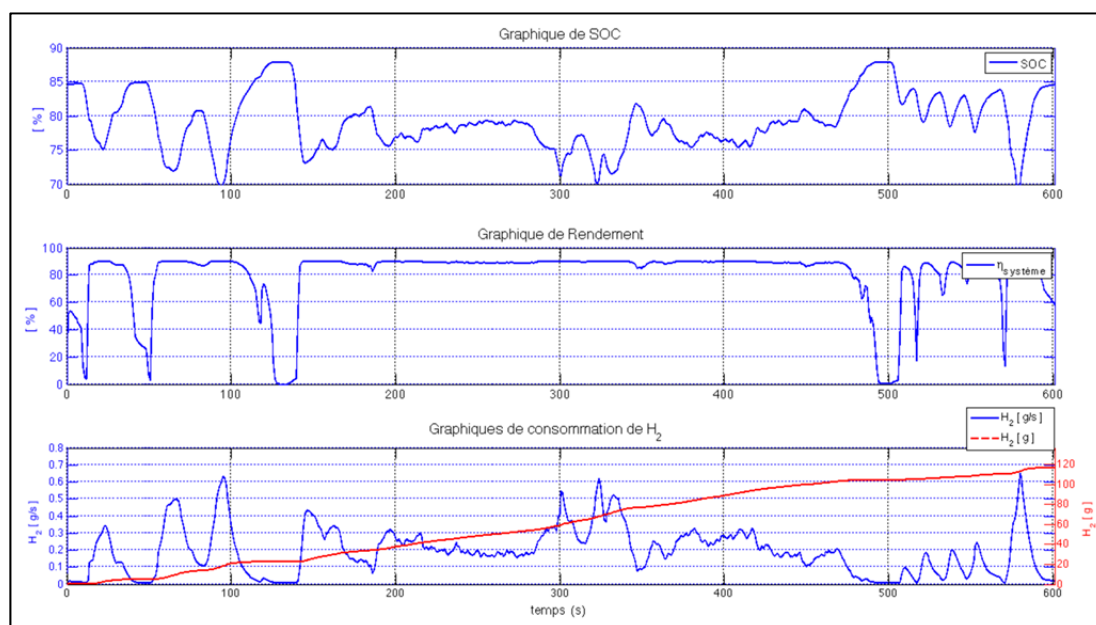


Figure 5.12 SOC, Rendement, Consommation_Profil de conduite US6 (Stratégie PI)

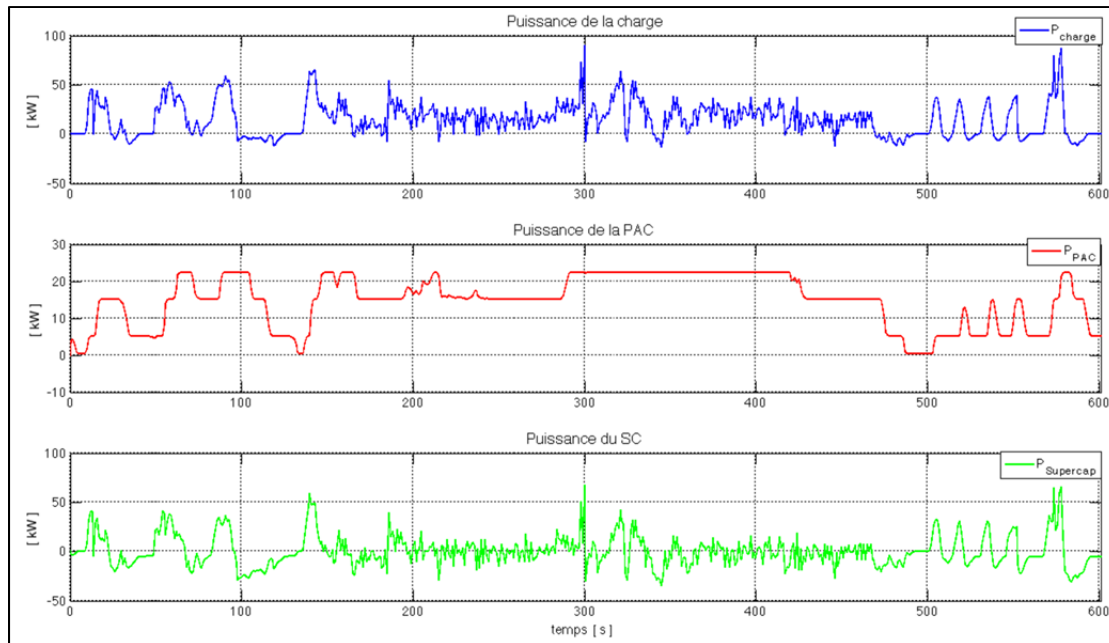


Figure 5.13 Graphique de puissances_Profil de conduite US6
(Stratégie de logique floue)

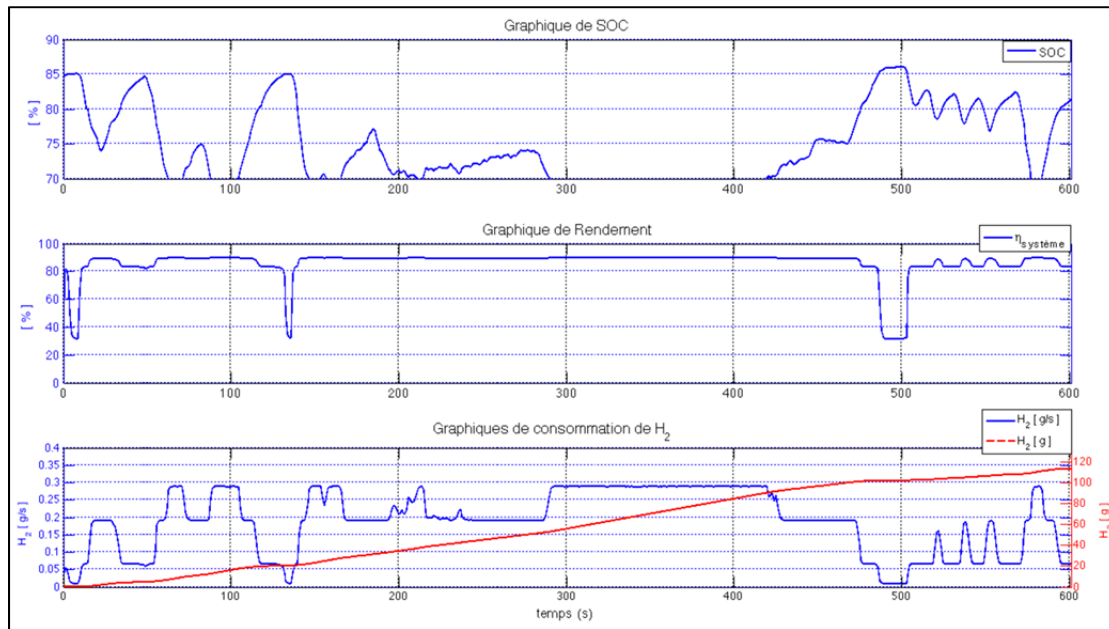


Figure 5.14 SOC, Rendement, Consommation_Profil de conduite US6
(Stratégie de logique floue)

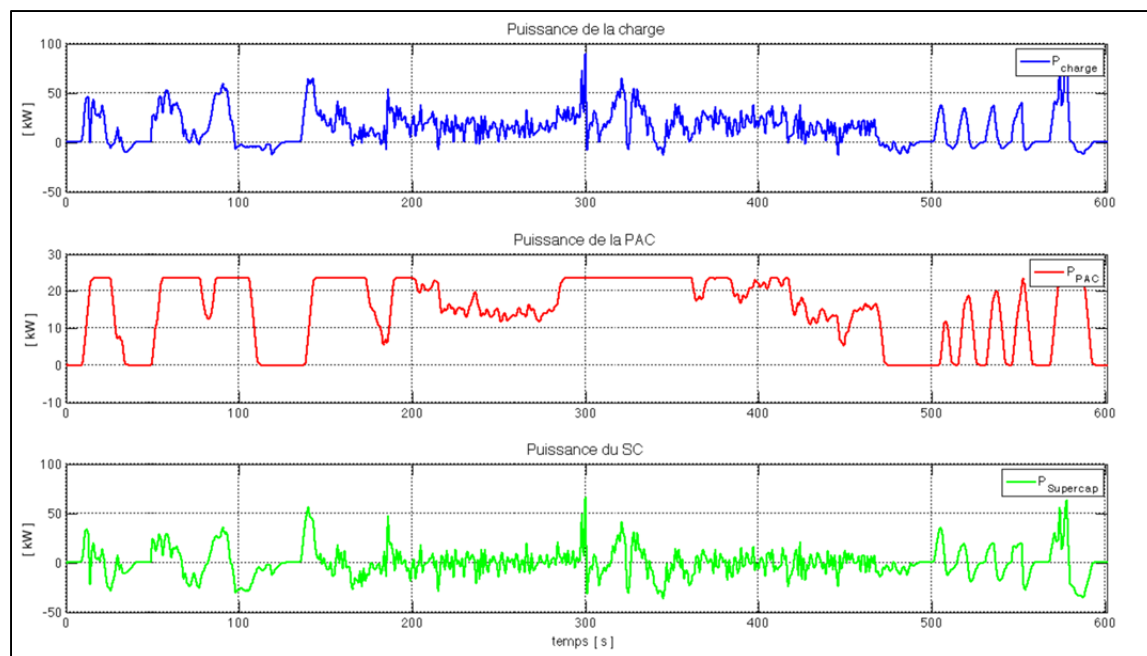


Figure 5.15 Graphique de puissances_Profil de conduite US6
(Stratégie de contrôle ECMS)

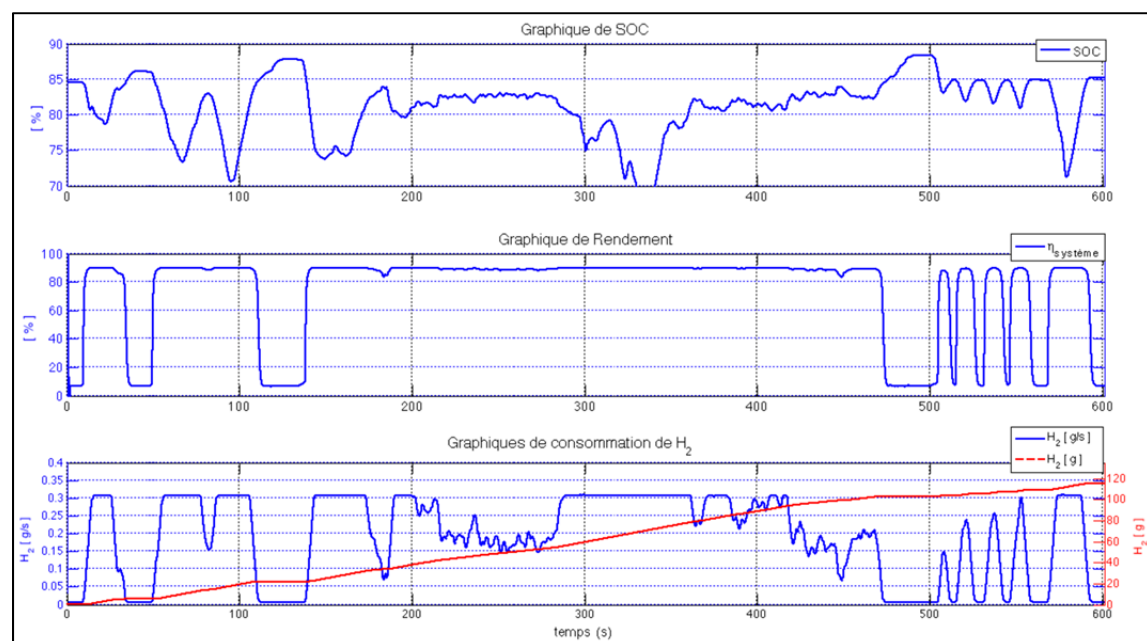


Figure 5.16 SOC, Rendement, Consommation_Profil de conduite US6
(Stratégie de contrôle ECMS)

Le tableau 5.2 suivant résume les résultats des simulations

Tableau 5.2 Résultats obtenus des simulations avec le profil de conduite US6 de 600 secondes

Stratégie	Cons_H ₂ [g]	SOC final [%]	Durée de la simulation [s]
Algorithme PI	116.69	84.56	53.9487
Algorithme de logique floue	113.08	81.32	90.1817
Algorithme ECMS	115.39	85.21	96.9941
Véhicule à PAC sans ES	118.56	-	31.956

Dans ce cas, l'algorithme de logique floue n'a pas conservé le SOC désiré de 85% à la fin du cycle de conduite. Donc, pour faire des comparaisons avec les deux autres algorithmes dont le SOC final est bien conservé, il faut déterminer la quantité de combustible additionnelle pour charger le supercondensateur jusqu'à 85%. En utilisant le modèle du véhicule hybride avec la PAC chargeant uniquement le supercondensateur, il est déterminé qu'une augmentation de 5% du SOC requiert 1.5 g d'hydrogène. En conséquence, il faut à peu près 1.25 g de combustible pour amener le SOC de 81.32% à 85%. De ce fait, la consommation réelle de combustible obtenue avec l'algorithme de logique floue pour le parcours US6 devient 114.33 g qui sera utilisé pour faire des comparaisons avec les autres algorithmes.

5.3 Conclusions

Ce chapitre a testé la performance des algorithmes PI, de logique floue et ECMS sur les profils de conduite urbaine UDDS répété deux fois et US6. Le tableau 5.3 suivant compare les résultats de consommation et d'économie de combustible obtenus avec les algorithmes pour un SOC final du SC de 85%. La consommation de H₂ du véhicule à PAC sans ES est utilisée comme référence pour le calcul de l'économie de combustible. Elle est de 148.63 g dans le cas du profil UDDsx2 et de 118.56 g dans les cas du profil US6.

Tableau 5.3 Tableau comparatif de la consommation et de l'économie de combustible obtenues avec les algorithmes

Profil de conduite	Stratégie	Cons_H2	Économie de combustible	Distance et durée du parcours
UDDSx2	PI	140.12 g	8.51 g	23.97 km /2 739 s
	Logique floue	139.53 g	9.1 g	23.97 km /2 739 s
	ECMS	140.87 g	7.76 g	23.97 km /2 739 s
US6	PI	116.69 g	1.87 g	12.88 km /600 s
	Logique floue	114.33 g	4.23 g	12.88 km /600 s
	ECMS	115.39 g	3.17 g	12.88 km /600 s

Dans le cas du parcours US6, la consommation de combustible obtenue pour l'algorithme de logique floue a été corrigée en prenant en compte la quantité de combustible qui est nécessaire pour la recharge du supercondensateur jusqu'à un SOC de 85%. C'est justement avec cet algorithme que l'on obtient une meilleure économie de combustible sur les deux parcours de longue durée utilisés. Les deux autres algorithmes ont bien conservé le SOC désiré à la fin des deux cycles de conduite.

L'algorithme PI a été le plus simple à construire. De plus, son réglage est facile à réaliser et son temps d'exécution est court. Le tableau 5.4 suivant compare des caractéristiques des trois algorithmes.

Tableau 5.4 Tableau comparatif des caractéristiques
des algorithmes PI, de logique floue et ECMS

Stratégie	Mise en œuvre	Réglage	Temps d'exécution
Algorithme PI	simple	facile à réaliser	bas
Algorithme de logique floue	de difficulté moyenne	compliqué	moyenne
Algorithme ECMS	complexe	de difficulté moyenne	haut

Finalement, il faut mentionner que, dans un cas réel, le véhicule à PAC sans ES ne peut pas suivre les profils de conduite utilisés en raison de la dynamique lente du système à PAC déterminée par la constante de temps mécanique du compresseur utilisé pour comprimer l'oxygène de l'air. Dans le modèle du système à PAC (voir figure 2.14), cette dynamique lente due au compresseur est simulée par un filtre de premier ordre dans le bloc régulateur du débit d'air. Il a fallu enlever ce filtre du modèle pour parvenir à réaliser les simulations du véhicule à PAC sans ES avec les profils de conduite utilisés et ainsi obtenir les consommations de combustible à utiliser comme références.

CONCLUSIONS

Le mémoire a réalisé l'étude des algorithmes de gestion de l'énergie pour un véhicule hybride comportant une pile à combustible et un élément de stockage. Afin de bien s'acquitter de cette tâche, on a divisé le travail dans les étapes suivantes :

- la définition des formules principales qui gouvernent le fonctionnement des composants du système, à savoir la PAC, l'ES (le supercondensateur ou la batterie), le véhicule et son groupe motopropulseur;
- le dimensionnement des composantes du véhicule ;
- la modélisation du véhicule hybride ;
- la mise en œuvre des stratégies de commande.

Le véhicule hybride a été construit au moyen des blocs des boîtes à outils SimDriveline et SimPowerSystems de Matlab/Simulink. SimPowerSystems comporte les modèles déjà construits de la PAC, de la batterie et du supercondensateur et les formules déterminées pour ces éléments ont aidé à comprendre leur fonctionnement. Des sources de courant et de tension émulant la consommation des auxiliaires de la PAC ont été ajoutées au modèle de celle-ci en vue de la simulation d'un générateur à PAC. Aussi, après le dimensionnement, le supercondensateur a été choisi comme l'ES.

Un modèle d'un véhicule à PAC sans l'ES a été simulé en premier lieu. La consommation de combustible de ce véhicule a été utilisée comme base de comparaison avec la consommation de combustible du modèle du véhicule hybride utilisant un algorithme de gestion de l'énergie qui a été construit par la suite.

Les outils de Matlab/Simulink tels que *fuzzy logic*, *optimization* et *stateflow* ont été utilisés pour la mise en œuvre des algorithmes qui ont été divisés en deux parties : ceux qui sont basés sur des règles et ceux basés sur une optimisation. Trois algorithmes basés sur des règles ont été développés (PI, logique floue, rendement maximal) en plus de l'algorithme

« thermostat ». Ce dernier a permis de repérer une caractéristique importante dans le fonctionnement du véhicule hybride et qu'il faut prendre en compte lors de la conception des algorithmes : celle de favoriser le fonctionnement de la PAC lorsque l'on s'approche du SOC_{min} et de favoriser le fonctionnement de l'ES lorsque l'on s'approche du SOC_{ref} . Par rapport aux algorithmes basés sur une optimisation, deux algorithmes ont été développés : un algorithme d'optimisation globale hors ligne et un algorithme d'optimisation en temps réel dénommé « Stratégie de minimisation de la consommation équivalente » ou ECMS. L'algorithme d'optimisation globale ne peut être utilisé qu'en laboratoire, mais les résultats obtenus peuvent être utilisés pour faire des comparaisons avec ceux d'autres algorithmes de gestion de l'énergie qui fonctionnent en temps réel.

La caractéristique désirée par les algorithmes développés a été de minimiser la consommation de combustible avec un bilan d'énergie nul du supercondensateur à la fin du cycle de conduite, ce qui veut dire que le SOC final doit être égal au SOC initial fixé à 85%.

Les réglages des algorithmes ont été réalisés de façon empirique. Un parcours court de 60 secondes a initialement été utilisé pour l'évaluation des algorithmes. Par la suite, les algorithmes les plus performants de cette première évaluation, à savoir les algorithmes PI, de logique floue et ECMS, ont été évalués avec deux profils de conduite de longue durée : les profils de conduite UDDS répété deux fois et US6. L'algorithme de logique floue a donné la meilleure économie de combustible pour les deux parcours de longue durée utilisés, mais le SOC final n'a pas été conservé à la fin du cycle de conduite US6 et une procédure de recharge du SC a été réalisée pour le calcul de la consommation réelle de combustible avec un SOC final de 85%.

La performance globale de l'algorithme PI a été la meilleure sur les trois parcours utilisés. Celui-ci a donné de bons résultats de consommation de combustible et il a bien conservé le SOC désiré à la fin des trois cycles de conduite. De plus, l'algorithme est simple à construire, son réglage est facile à réaliser et son temps de simulation est court. Le tableau suivant

compare la performance des algorithmes PI, de logique floue et ECMS sur les trois parcours utilisés, ainsi que la mise en œuvre, le réglage et le temps d'exécution des algorithmes.

Stratégie	Consommation de H₂	Condition du SOC final	Mise en œuvre	Réglage	Temps d'exécution
PI	La moindre : Cycle 60s Moyenne : UDDSx2 La plus grande : US6	satisfaite pour les trois parcours	simple	facile à réaliser	bas
de logique floue	La moindre : UDDSx2 et US6 Moyenne : Cycle 60s	pas satisfaite pour US6 .	de difficulté moyenne	compliqué	moyenne
ECMS	Moyenne : US6 La plus grande : Cycle 60s et UDDSx2	satisfaite pour les trois parcours	complexe	de difficulté moyenne	haut

RECOMMANDATIONS

Le mémoire a réalisé des simulations des algorithmes sur un modèle d'un véhicule hybride et pour démontrer la validation des résultats, il faudrait réaliser une validation expérimentale. Cela n'a pas été possible dans le cadre de ce mémoire du fait de la difficulté d'implémenter un système qui permet de générer les différents cycles de conduite avec simulation de récupération d'énergie lors du freinage. Deux solutions avaient été envisagées : utiliser un système de propulsion accouplé à un système de freinage ou utiliser des charges électroniques avec une source d'énergie pour la simulation des étapes de freinage.

Le mémoire a simulé le comportement d'un générateur à PAC en utilisant des sources de tension et de courant pour émuler la consommation de puissance des auxiliaires. Il serait intéressant de modéliser ces auxiliaires et les combiner au modèle de la PAC disponible en SPS afin de disposer d'un modèle d'un générateur à PAC comme un bloc dans SPS. Cela permettrait aux chercheurs de disposer d'un modèle plus exact pour réaliser leurs études d'un système à PAC.

ANNEXE I

ALGORITHMES

Algorithme-A I-1 Programme Matlab pour générer
la figure 2.1 : Puissance du moteur vs temps d'accélération et vitesse constante.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clear all
close all
clc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Caractéristiques du véhicule (Small Car based on a 1994 Saturn
SL1)
Mv=1380;%kg
g=9.81;%m/s^2
fr=0.009;
pa=1.2;%kg/m^3
CD=0.335;
Af=2.0;%m^2
r=0.282;%m
h=0.5;%m
a=1.3;%m
b=1.3;%m
nt=0.95;
nm=0.9;
Vmax=160;%km/h
ta=10;%s
imax=0.05;
d=1.035
%Vitesse maximale
Vmax=160*1000/3600;%m/s
%Vitesse de base
Vb=38*1000/3600;%m/s
%accélération en 10s
Vf=100*1000/3600;%m/s
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Calcul du temps d'accélération en fonction de la puissance de
%traction du moteur
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Pm=([0:0.001:100])';%kW
tace1=(0.5*d*Mv*(Vf^2+Vb^2)./(1000*Pm*nt-2/3*Mv*g*fr*Vf-
1/5*pa*Af*CD*Vf^3)).*(Pm>=10)+80.*(Pm<10);
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Calcule de la vitesse (constante) en fonction de la puissance de
%traction du moteur
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Avec les données du véhicule, faire courir les lignes suivantes
pour %calculer Vx1 :
%%% syms V Pm ig;
%%% f=(Mv*g*(fr+ig)*V+1/2*pa*Af*CD*V^3)/(1000*nt)-Pm;
%%% Vx=solve(f,V);
%%% Vx1=vpa(Vx(1),5);
%Vx1 donne la vitesse en fonction de la puissance de traction du
moteur
%Vx1=((1181.6*Pm +((11225.0*ig + 101.03)^3 +
1.3962e6*Pm.^2).^ (1/2)).^(1/3)... - (1.0*(11225.0*ig +
101.03))/(1181.6*Pm +((11225.0*ig + 101.03)^3... %+
1.3962e6*Pm.^2).^ (1/2)).^(1/3))*3600/1000;

%A continuation, on utilise l'expression de Vx1 :
%Pour une pente de 0% a 150km/h
ig=0;
V1=((1181.6*Pm +((11225.0*ig +101.03)^3
+1.3962e6*Pm.^2).^ (1/2)).^(1/3)...
- (1.0*(11225.0*ig + 101.03))./(1181.6*Pm +((11225.0*ig +
101.03)^3...
+ 1.3962e6*Pm.^2).^ (1/2)).^(1/3))*3600/1000;
%Pour une pente de 5% a 100km/h
ig=0.05;
V2=((1181.6*Pm +((11225.0*ig +101.03)^3
+1.3962e6*Pm.^2).^ (1/2)).^(1/3)...
- (1.0*(11225.0*ig + 101.03))./(1181.6*Pm +((11225.0*ig +
101.03)^3...
+ 1.3962e6*Pm.^2).^ (1/2)).^(1/3))*3600/1000;

figure(2)
set(gcf,'Color','w');
[AX,h1,h2]=plotyy(Pm,tacel,Pm,V1);
xlabel('Puissance du moteur (kW)','FontSize',12)
ylabel(AX(1),'Temps d'accélération (s) de 0 à 100km/h
','FontSize',12)
ylabel(AX(2),'Vitesse Constante (km/h)','FontSize',12)
grid on

ylim(AX(1),[0,70]);
set(AX(1),'YTick',[0:round(10):70])

```



```
set(AX(2), 'ylim', [0, 300]);  
set(AX(2), 'YTick', [0, 50 100, 150, 160, 200, 250, 300])  
hold on  
  
[AX, h1, h2] = plotyy(Pm, tacel, Pm, V2);  
  
ylim(AX(1), [0, 70]);  
set(AX(1), 'YTick', [0:round(10):70])  
  
set(AX(2), 'ylim', [0, 300]);  
set(AX(2), 'YTick', [0, 50 100, 150, 160, 200, 250, 300])
```

Algorithme-A I-2 Programme Matlab pour générer la figure 2.2 :
Graphiques de puissance et d'énergie du véhicule pour les profils de conduite US6,
urbaine (UDDS) et d'auto route (HWFET)

```
clear all
close all
clc
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Caractéristiques du véhicule (Small Car based on a 1994 Saturn SL1)
Mv=1380;%kg
g=9.81;%m/s^2
fr=0.009;
pa=1.2;%kg/m^3
CD=0.335;
Af=2.0;%m^2
r=0.282;%m
h=0.5;%m
a=1.3;%m
b=1.3;%m
nt=0.92;
nm=0.9;
Vmax=150;%km/h
ta=10;%s
imax=0.05;
d=1.035;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Profils de conduite
%load('CYC_UDDS.mat')
%load('CYC_US06.mat')
%load('CYC_HWFET.mat')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
profil={'CYC_US06.mat','CYC_HWFET.mat','CYC_UDDS.mat'};
colors={'g','b','r'};
for j=1:3
    DrivingCycle=profil{j};
    colorgraph=colors{j};
    load(DrivingCycle);
    t=zeros(length(cyc_mph(:,1)),1);
```

```

v=t;
t=cyc_mph(:,1);
v1=cyc_mph(:,2); %mph
v=(v1)/3600*1609; %m/s
a=[0;diff(v)]/(t(2)-t(1)); %*100; %m/s2
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Calcul de puissances
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Puissance mécanique du moteur = Ptraction
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Pm=(v.*(Mv*g*fr+1/2*pa*Af*CD*v.^2+d*Mv*a))/(1e3*nt); %kW
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Puissance électrique du moteur
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Pe=Pm.*(nm*(Pm<0)+1/nm*(Pm>0)); %kW
Pe_traction=Pm.*(1/nm*(Pm>0)); %kW

Pmax=max(Pe) %KW
Pmin=min(Pe) %KW

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Calcul_Energie batterie
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Efournie=trapz(t,Pe.*(Pe>0))/3600*1000 % WH
Edissipee=-trapz(t,Pe.*(Pe<0))/3600*1000 % WH
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Énergie REGENERATIVE
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
te=t;
ERegBatt=zeros(length(te),1);
for i=2:length(te)
    tt=t(1:i,1); %tt=0 when i=1
    PPe=Pe(1:i,1);

```

```

    ERegBatt(i)=-trapz(tt,PPe.*(PPe<0))/3600*1000;% WH
end
EfournieBatt=zeros(length(te),1);

for i=2:length(te)
    ttt=t(1:i,1);%tt=0 when i=1
    PPPe=Pe(1:i,1);
    EfournieBatt(i)=trapz(ttt,PPPe.*(PPPe>0))/3600*1000;% WH
end
figure(1)
set(gcf,'Color','w');
subplot(222)
h1(j)=plot(te,ERegBatt,colorgraph);%WH
title('Énergie récupérée au freinage vs temps','FontSize',14);
ylabel('Énergie reçue du moteur (WH)','FontSize',12);
xlabel('temps(s)','FontSize',12);
grid on
hold on
subplot(221)
h2(j)=plot(te,EfournieBatt,colorgraph);%WH
title('Énergie cumulative de traction vs temps','FontSize',14);
ylabel('Énergie fournie au moteur (WH)','FontSize',12);
xlabel('temps(s)','FontSize',12);
grid on
hold on
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Graphique_Puissance crête
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
te=t;
b=0;
for i=1:length(Pe)
    if b<Pe(i)
        b=Pe(i);
    end
    Pe4(i)=b;
end
subplot(223)
h3(j)=plot(te,Pe4,colorgraph)%kW
title('Puissance crête de traction vs temps','FontSize',14);
ylabel('Puissance crête (kW)','FontSize',12);

```

```

xlabel('temps(s)', 'FontSize', 12);
grid on
hold on

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Graphique_Puissance
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
subplot(224)
te5=t(1:350);
Pe5=Pe_traction(1:350);
h4(j)=plot(te5, Pe5, colorgraph) %kW
title('Puissance instantanée de traction vs temps', 'FontSize', 14);
ylabel('Puissance (kW)', 'FontSize', 12);
xlabel('temps(s)', 'FontSize', 12);
grid on
hold on
end
set(h1(1), 'color', [0, 0.5, 0], 'Linewidth', 1.5)
set(h2(1), 'color', [0, 0.5, 0], 'Linewidth', 1.5)
set(h3(1), 'color', [0, 0.5, 0], 'Linewidth', 1.5)
set(h4(1), 'color', [0, 0.5, 0], 'Linewidth', 1.5)

set(h1(2), 'Linewidth', 1.5)
set(h2(2), 'Linewidth', 1.5)
set(h3(2), 'Linewidth', 1.5)
set(h4(2), 'Linewidth', 1.5)

set(h1(3), 'Linewidth', 1.5)
set(h2(3), 'Linewidth', 1.5)
set(h3(3), 'Linewidth', 1.5)
set(h4(3), 'Linewidth', 1.5)

legend([h1(1);h1(2);h1(3)], {'US6'; 'HWFET'; 'UDDS'})
legend([h2(1);h2(2);h2(3)], {'US6'; 'HWFET'; 'UDDS'})
legend([h3(1);h3(2);h3(3)], {'US6'; 'HWFET'; 'UDDS'})
legend([h4(1);h4(2);h4(3)], {'US6'; 'HWFET'; 'UDDS'})

```

Algorithme-A I-3 Programme Matlab pour générer les figures 2.5 et 2.6 :
 Courbes de polarisation, de puissances et de rendements du modèle
FC_ANL50H2_p du logiciel ADVISOR

```
close all;
%Fuel cell model: FC_ANL50H2_P. Type Polar (Polarization curve based
%model). 50kW Net
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Stack/Cell info
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Active area per cell (m^2)
fc_cell_area=769/100/100; % estimate
% number of cells in one stack
fc_cell_num=145; % estimate
% number of stacks connected in series per string
fc_stack_num=1;
%Facteur d'échelle de la puissance
fc_pwr_scale=1;
% number of strings connected in parallel
fc_string_num=1;
% cell current density (amps/m^2)
fc_I_map=[7.6 55.6 76.9 97.9 183.5 277.3 389.1 538.5]/fc_cell_area; %
amps/m^2
% cell voltage (V) indexed by fc_I_map
fc_V_map=[143.3 134 131.8 130 123.5 117.2 110 100]/fc_cell_num; %
volts
% system efficiency map - only used for plots
fc_eff_map=[0 49.2 53.3 55.9 59.6 59.1 56.2 50.8]/100;
% fuel usage (g/s) indexed by fc_I_map
fc_fuel_map=[0.012 0.085 0.117 0.149 0.280 0.423 0.594
0.821]/fc_cell_num;
% fuel utilization factor indexed by fc_I_map (fuel consumed/fuel
supplied)
fc_fuel_utilization_map=ones(size(fc_fuel_map))*1.0; %
% net power out of the system
fc_pwr_map=[0 5 7.5 10 20 30 40 50]*1000; % W

%le point [0,143.45] est calculé par extrapolation
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fc_I_map_extrap=[0 7.6 55.6 76.9 97.9 183.5 277.3 389.1
538.5]/fc_cell_area; % amps/m^2
fc_V_map_extrap=( [143.75 143.3 134 131.8 130 123.5 117.2 110
100]/fc_cell_num)*fc_pwr_scale; % volts
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
fc_gross_pwr_map=fc_I_map_extrap.*fc_V_map_extrap*fc_cell_area*fc_cell_num*fc_stack_num*fc_string_num;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Plots
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(2)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%V vs Puissances PAC
set(gcf,'Color','w');
[AX,h1,h2]=plotyy(fc_I_map_extrap*fc_cell_area,fc_V_map_extrap*fc_cell_num,fc_I_map_extrap*fc_cell_area,fc_gross_pwr_map/1000);
set(h1,'Linewidth',1.5);
set(h2,'Linewidth',1.5);
xlabel('I [ A ]','FontSize',12);
ylabel(AX(1),'V_P_A_C [ V ]','FontSize',12);
ylabel(AX(2),'Puissance [ kW ]','FontSize',12);
grid on
ylim(AX(1),[0,160*fc_pwr_scale]);
set(AX(1),'YTick',[0:round(20*fc_pwr_scale):160*fc_pwr_scale]);
set(AX(2),'ylim',[0,70*fc_pwr_scale]);
set(AX(2),'YTick',[0:round(10*fc_pwr_scale):70*fc_pwr_scale]);
hold on
[AX,h3,h4]=plotyy(fc_I_map*fc_cell_area,fc_V_map*fc_cell_num,fc_I_map*fc_cell_area,fc_pwr_map/1000);
ylim(AX(1),[0,160*fc_pwr_scale]);
set(AX(1),'YTick',[0:round(20*fc_pwr_scale):160*fc_pwr_scale]);
set(AX(2),'ylim',[0,70*fc_pwr_scale]);
set(AX(2),'YTick',[0:round(10*fc_pwr_scale):70*fc_pwr_scale]);
set(h4,'LineStyle','--');
h=[h1
h2
h4];

```

```
M={'V_P_A_C ( I )';'P_b_r_u_t_e ( I )';'P_n_e_t_t_e ( I )'};
legend(h,M,'FontSize',12)
figure(3)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Rendements PAC
set(gcf,'Color','w');
h5=plot(fc_gross_pwr_map,fc_V_map_extrap/1.25*100);%1.48 si liquide;
1.25 %si l'eau produit sous forme gazeuse

set(h5,'Linewidth',1.5)
axis([0 60000 0 90])
grid on
hold on
h6=plot(fc_pwr_map,fc_eff_map*100,'g');
set(h6,'color',[0,0.5,0],'Linewidth',1.5);
legend([h5;h6],{'\eta_t_o_t';'\eta_g_l_o_b_a_l'},'FontSize',12);
xlabel('Puissance [ W ]','FontSize',12);
ylabel('Rendement \eta [ % ]','FontSize',12);
xt=get(gca,'XTick');
set(gca,'XTickLabel',sprintf('%6d|',xt));
```

Algorithme-A I-4 Programme Matlab pour générer la figure 2.15 :
Courbe de polarisation et courbes de puissances (générateur à PAC de 100 kW).

[illegible]

[illegible]


```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
figure(5)
set(gcf, 'Color', 'w');

[AX,h9,h10]=plotyy(Inet_PAC,Rendement_GLOBAL,Inet_PAC,PowerNet_PAC5
0KW/
1000);

xlabel('I _N_E_T  PAC [ A ]','FontSize',12);

ylabel(AX(1),'Rendement \eta [ %
'],'FontSize',12,'Color',[0,0.5,0])
ylabel(AX(2),'Puissance [ kW ]','FontSize',12,'Color','b');
grid on

set(AX(1),'ylim',[0,100]);
set(AX(1),'YTick',[0:10:100],'YColor',[0,0.5,0]);
set(AX(2),'ylim',[0,70*fc_pwr_scale]);
set(AX(2),'YTick',[0:round(10*fc_pwr_scale):70*fc_pwr_scale],'YColor',
'r','b');
set(h9,'Linewidth',1,'LineStyle','-','color',[0,0.5,0]);
set(h10,'LineStyle',':','Linewidth',1.5);
hold on

[AX,h11,h12]=plotyy(Inet_PAC,Rendement_SYST*100,Inet_PAC,PowerNet_P
AC50KW/1000);

ylabel(AX(2),'Puissance [ kW ]','FontSize',12);

set(AX(1),'ylim',[0,100]);
set(AX(1),'YTick',[0:10:100],'YColor',[0,0.5,0]);
set(AX(2),'ylim',[0,70*fc_pwr_scale]);
set(AX(2),'YTick',[0:round(10*fc_pwr_scale):70*fc_pwr_scale],'YColor',
'r','b');
set(h11,'color','m','Linewidth',1.5,'LineStyle','--');
set(h12,'LineStyle',':','color','b');

legend([h9:h11:h10],{'\eta_g_l_o_b_a_l';'\eta_s_y_s_t_è_m_e';'P_n_e
_t_t_e ( I )'},'FontSize',12)

```

Algorithme-A I-5 Programme Matlab pour calculer
la puissance électrique du véhicule

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Caractéristiques du véhicule (Small Car based on a 1994 Saturn
SL1)
Mv=1380;%kg
g=9.81;%m/s^2
fr=0.009;
pa=1.2;%kg/m^3
CD=0.335;
Af=2.0;%m^2
r=0.282;%m
h=0.5;%m
a=1.3;%m
b=1.3;%m
nt=0.95;
nt2=0.55;
nm=0.9;
nm2=0.55;
%Vmax=150;%km/h
Vmax=160;%km/h
ta=10;%s
imax=0.05;
d=1;%1.035;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
Vmax=160*1000/3600;%m/s
%Vitesse de base
Vb=38*1000/3600;%m/s
%accélération en 10s
Vf=100*1000/3600;%m/s
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%pente =0
i=0;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
cyc_kmh=cyc_mph;
cyc_kmh(:,2)=cyc_mph(:,2)*1609/1000;

t=zeros(length(cyc_mph(:,1)),1);
v=t;
t=cyc_mph(:,1);
v1=cyc_mph(:,2);%mph
v2=cyc_kmh(:,2);%kmh
v=(v1)/3600*1609;%m/s

```

```

a=[0;diff(v)]/(t(2)-t(1));%*100;%m/s2
dt=(t(2)-t(1));

%calcul de puissances
Pt=v.*(Mv*g*(fr+i)+1/2*pa*Af*CD*v.^2+d*Mv*a);%W
Pm=Pt.*(nt2*(Pt<0)+1/nt*(Pt>0));%W

Pe=Pm.*(nm2*(Pm<0)+1/nm*(Pm>0))/1e3+0.1;%kW

figure(1)
set(gcf,'Color','w');
plot(t,v2,'k')

figure(2)
set(gcf,'Color','w');
plot(t,Pe,'b-')%kW
grid on

```

Algorithme-A I-6 Programme d'initialisation pour l'optimisation globale

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
clc;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Paramètres
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
global N
global VSC_ini;
global VSC_Rated;
global VSC_min;
global SOC_ini;
global SOCmin;
global SOCmax;
global C_Rated;

global y
global A
global Ab

global DT

```

```

globalPload
globalE_rated
globalEo
globalE_min
globalPsuperCap
globalRendementSC

Np=2;
Ns=7;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Choisir Profile de vitesse
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%load('CYC_UDDS.mat')
%load('trip_3UDDS.mat')
%load('CYC_US06.mat')
%load('trip_ECE2.mat')
load('cycle1_mphx2.mat')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Calculer la puissance
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Calcul_Puissance;
Calcul_Peलेctrique_Vehicule_1380kg
Pelec=[t Pe*1e3];
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
load('PsuperCap');
load('RendementSC');

Tp=length(Pe);

DT=1;
N=1:DT:Tp;
Pfcmin=700;Pfcmax=47000;

x0=Pfcmin*ones(1,length(N));
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
A=zeros(length(N),length(N));
Ab=zeros(length(N),length(N));
for i=1:length(N)
for j=1:i
A(i,j)=-DT;
Ab(i,j)=1;
end
end

```

```

b=zeros(length(N),1);
y=zeros(length(N),1);
Pload=Pe*1e3;

SOC_ini=85;
SOCmin=70;
SOCmax=100;

C_Rated=88*Np/Ns;%farads
VSC_ini=295;
VSC_Rated=48.6*Ns;%V100%
VSC_min=0.7*48.6*Ns;%V70%

E_rated=0.5*C_Rated*VSC_Rated^2;
E_min=0.5*C_Rated*VSC_min^2;

Eo=0.5*C_Rated*VSC_ini^2;
y=Ab*Pload;
lb=Pfcmin*ones(1,length(N));
ub=Pfcmax*ones(1,length(N));

```

Algorithme-A I-7 Programme Matlab: Fonction *fitness*

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function f=myfunfitness_50kW_SC4(x)
global Pload
global lb
global ub

DT=1;
f=sum(x)*DT;
end

```

Algorithmme-A I-8 Programme Matlab: Fonction contraintes

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

function [c,ceq] = myconstraints_final_50kW_SC4(x)

global N
globalVSC_ini;
globalVSC_Rated;
globalVSC_min;
globalSOC_ini;
globalSOCmin;
globalSOCmax;
globalC_Rated;
global y
global A
global Ab
global DT
globalPload
globaleE_rated
globaleEo
globaleE_min
globalPsuperCap
globalRendementSC

Psc=((Pload-x')>=0).*((Pload-
x')./(interp1(PsuperCap,RendementSC,abs(Pload-x'))/100))+((Pload-
x')<0).*((Pload-x').*(interp1(PsuperCap,RendementSC,abs(Pload-
x'))/100));
z=Ab*Psc;
c1=(E_min-(Eo-z))/(E_rated);
c2=((Eo-z)-E_rated)/(E_rated);
c=[c1;c2];
ceq=sum(Psc);
end

```


BIBLIOGRAPHIE

- Benard, Andre. 2008. « Fuel Cells: Introduction and Current Status ». MI 48824: Michigan State University, 53 p.
- Bernard, Jérôme. 2007. « VÉHICULES HYBRIDES À PILE À COMBUSTIBLE : DIMENSIONNEMENT ET STRATÉGIES DE COMMANDE ». L'Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 230 p.
- Blunier, Benjamin, et Abdellatif Miraoui. 2007. « Piles à combustible ». Ellipses Édition, Paris, 179 p.
- Blunier, Benjamin, et Abdellatif Miraoui. 2009. « 20 questions sur la pile à combustible ». Éditions TECHNIP, paris, 130 p.
- Cordon, Oscar. 2001. « Genetic fuzzy systems : evolutionary tuning and learning of fuzzy knowledge bases ». Singapore : World Scientific, 462 p.
- Ehsani, Mehrdad, et al. 2004. « Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles ». CRC Press, 419 p.
- Flaus, Jean-Marie. 2000. « La régulation industrielle : régulateurs PID, prédictifs et flous ». Hermès Science Publications, Paris, 348 p.
- Hankache, Walid. 2008. « GESTION OPTIMISÉE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE D'UN GROUPE ÉLECTROGÈNE HYBRIDE À PILE À COMBUSTIBLE ». L'Université de Toulouse, 186 p.
- Livint, Gheorghe , et al. 2011. « ELECTRIC VEHICLES–MODELLING AND SIMULATIONS ». INTECHWEB.ORG, 478 p.
- Markel, Tony, et al. 2003. « Energy Storage System Requirements for Hybrid Fuel Cell Vehicles ». In Advanced Automotive Battery Conference. (Nice, France, June 10-13, 2003).
- Motapon, Souleman Njoya. 2008. « A GENERIQUE FUEL CELL MODEL AND EXPERIMENTAL VALIDATION ». École de Technologie Supérieure, 96 p.
- Motapon, Souleman Njoya, Louis- A. Dessaint et Kamal Al-Haddad. 2014. « A comparative study of energy management schemes for a fuel-cell hybrid emergency power system of more-electric aircraft ». IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no 3, p. 1320-1334.

- Motapon, Souleman Njoya, Louis- A. Dessaint et Kamal Al-Haddad. 2014. « A robust H₂-consumption-minimization-based energy management strategy for a fuel cell hybrid emergency power system of more electric aircraft ». IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 61, no 11, p. 6148-6156.
- Ommi, Fathollah, Golnaz Pourabedin et Koros Nekofa. 2009. « Evaluation of Model and Performance of Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle in Different Drive Cycles ». International Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 5, n° 4, p. 246-252.
- Rodatz, P., G. Paganelli, A. Sciarretta et L. Guzzella. 2003. « Optimal power management of an experimental fuel cell / supercapacitor-powered hybrid vehicle ». Control Engineering Practice, vol. 13, n° 1, p. 41-53.
- Valero, Ianko. 2004. « INTERFAÇAGE ET CONTROLE COMMANDE DE PILES À COMBUSTIBLE POUR APPLICATIONS STATIONNAIRES ET TRANSPORT ». Université Joseph Fourier, 246 p.
- Zhang, Xi, et Chris Mi. 2011. « Vehicle Power Management ». Springer, 341 p.
- Zheglov, V, et al. 2009. « A new control strategy for stand-alone fuel cell-battery hybrid power supply system ». In Proceeding of Power & energy Society General Meeting 2009. PES '09.IEEE. (Calgary, AB, 26-30 July, 2009), p. 1 - 6. IEEE.